

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**OPTIMIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA GEOMETRÍA DE
INGRESO A UNA RÁPIDA ESCALONADA DESDE UN CANAL
RECTANGULAR CON FLUJO SUPERCRÍTICO DE
APROXIMACIÓN**

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

DAVID ANDÉS DURÁN HERAS

dadu02h@gmail.com

PEDRO DAVID SÁNCHEZ RAMOS

ds_16@hotmail.es

DIRECTOR: ING. MSc. EDWIN PATRICIO CASA TIPÁN

edwin_casa_21@hotmail.com

CODIRECTOR: ING. MSc. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE

ximena.hidalgob@gmail.com

Quito, agosto 2019

DECLARACIÓN

Nosotros, David Andrés Durán Heras y Pedro David Sánchez Ramos, 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 en las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

David Andrés Durán Heras

Pedro David Sánchez Ramos

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores David Andrés Durán Heras y Pedro David Sánchez Ramos, bajo nuestra supervisión.

Ing. MSc. EDWIN CASA
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. MSc. XIMENA HIDALGO
CODIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Manuel Durán y Tarcila Heras, por ser la viva expresión del más puro sentimiento que es el amor a sus hijos. A mis hermanos César, René y Carola, porque a través de su ejemplo, cariño y apoyo hemos logrado una exquisita combinación entre ser hermanos y grandes amigos.

A mi abuelita Beatriz Ortiz, porque desde mis primeros recuerdos ha sido fuente inagotable de mimos y cariño.

A mi amigo y compañero de tesis Pedro David Sánchez, por su aporte de esfuerzo y creatividad para sacar adelante el presente proyecto.

A la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional por brindarme conocimiento, amistades y experiencias.

A nuestro tutor, el Ing. MSc. Edwin Casa por su guía y compromiso con el desarrollo del presente proyecto. A todo el personal del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), por su predisposición, guía y apoyo.

A mis amigos y compañeros de lucha: Ivan Pozo, Ángel Ortiz, Bryan Vallejos y Luis Viteri, gracias por su apoyo y momentos compartidos. A mis amigos: Frank Benalcazar, Diego Calvache, Daniel Larenas, Edison Llumipanta y Juan Herrera, por ser grandes compañeros de ideales. A Majo, Maribel, Pao, Pedrito y Ricky un grupo de amigos.

A todas aquellas personas que de una u otra manera han sido inspiración para trabajar cada día en ser una mejor versión de mí.

David Durán Heras.

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanos Sebineth y Jeremías, a mi tía Miriam por ser el pilar fundamental de mi vida y por siempre ser la luz que iluminan mis días.

A mi padre por el apoyo brindado en todo este tiempo y por ser un su gran ejemplo para mí, a toda mi familia que siempre estuvo pendiente de mí desde el primer día hasta el último día que duró esta gran aventura en mi vida.

A la Escuela Politécnica Nacional y en especial a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental por los conocimientos brindados.

A mi compañero de tesis David Durán por el gran aporte con sus ideas y conocimiento y sobre todo por brindarme su amistad.

A la Ing. Ximena Hidalgo por la oportunidad de realizar esta tesis en el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), a mi tutor el Ing. Edwin Casa por la apertura prestada para con este proyecto también a los ingenieros Darío Calderón, Pablo Vera, Jorge Santamaría por compartir su conocimiento, a Manuel Flores, Juan Carlos Flores y Wilson Gualichico en la ayuda de la construcción y montaje de la tesis.

A mis amigos KATER Bryan V., Angel O., Roberto P. y Luis V., mis amigas Karina A. y Maritza Z. por todos los momentos compartidos a lo largo de este tiempo y por brindar su amistad, a mis amigos de toda la vida Michael S., Daniel T. y Santiago A.

Y a todas las personas que conocí y compartí momentos a lo largo de mi vida universitaria.

David Sánchez

DEDICATORIA

A toda mi familia, una fuente inagotable de amor y por ser la primera escuela en mi vida.

David Durán Heras.

DEDICATORIA

A la memoria de mi Madre.

David Sánchez

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	v
DEDICATORIA.....	vi
CONTENIDO.....	vii
LISTADO DE FIGURAS	xiii
LISTADO DE TABLAS	xv
LISTADO DE FOTOGRAFÍAS	xviii
LISTADO DE GRÁFICOS	xxii
LISTADO DE SÍMBOLOS	xxv
RESUMEN	xxvii
ABSTRACT	xxviii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3. ALCANCE	2
1.4. JUSTIFICACIÓN	3
1.4.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	3

1.4.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	5
1.4.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	5
2. BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE	7
2.1. BASE TEÓRICA.....	7
2.1.1. INTRODUCCIÓN.....	7
2.1.2. TIPOS DE FLUJO SOBRE UNA RÁPIDA ESCALONADA.....	8
2.1.3. FLUJO RASANTE	11
2.1.1. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO RASANTE	20
2.1.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	29
2.2. ESTADO DEL ARTE	32
2.2.1. MODELACIÓN FÍSICA EN RÁPIDAS ESCALONADAS	32
3. METODOLOGÍA.....	38
3.1.1. ANÁLISIS DIMENSIONAL ZONA NO AIREADA.....	38
3.1.2. ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA LA ZONA AIREADA	39
3.2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	40
3.2.2. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	48
3.2.3. INSTRUMENTOS DE MEDIDA USADOS EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	60
3.3. CAUDALES SELECCIONADOS PARA EL PLAN DE PRUEBAS	66
3.4. VERIFICACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	67
3.4.1. COMPROBACIÓN GEOMÉTRICA.....	67
3.4.2. FUERZAS PREDOMINANTES EN EL FLUJO QUE SE DESARROLLA EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	71
3.5. CONCLUSIONES.....	75

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
4.1. INTRODUCCIÓN.....	76
4.2. GEOMETRÍA CON DISEÑO ORIGINAL.....	76
4.2.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL FLUJO.....	77
4.2.2. CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA GEOMETRÍA ORIGINAL.....	82
4.3. DISEÑO MODIFICADO M1.....	82
4.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M1.....	83
4.3.2. RESULTADOS DEL DISEÑO MODIFICADO M1.....	85
4.3.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO.....	85
4.3.4. FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH.....	96
4.3.5. DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	101
4.3.6. CURVAS ADIMENSIONALES.....	103
4.3.7. CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA GEOMETRÍA MODIFICADA M1.....	110
4.4. DISEÑO MODIFICADO M2.....	112
4.4.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M2.....	112
4.4.2. RESULTADOS DEL DISEÑO MODIFICADO M2.....	114
4.4.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO.....	114
4.4.4. FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH.....	121
4.4.5. DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	125
4.4.6. CURVAS ADIMENSIONALES.....	127
4.4.7. COMPARACION ENTRE LOS RESULTADOS DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA MODIFICADA M2 Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS EXPRESIONES DE LA LITERATURA TECNICA.....	132

4.4.1. CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA GEOMETRÍA MODIFICADA M2	133
4.5. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	135
4.5.1. CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE	135
4.5.2. FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH	136
4.5.3. DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	137
4.5.4. CURVAS ADIMENSIONALES	138
4.6. CONCLUSIONES.....	143
4.6.1. GEOMETRÍA ORIGINAL.....	143
4.6.2. GEOMETRÍA MODIFICADA M1.....	144
4.6.3. GEOMETRÍA MODIFICADA M2.....	145
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	147
5.1. CONCLUSIONES.....	147
5.2. TRABAJOS FUTUROS	151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
ANEXO 1.....	159
REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA ORIGINAL, GEOMETRÍA MODIFICADA M1 Y GEOMETRÍA MODIFICADA M2	159
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA ORIGINAL	160
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA MODIFICADA M1	166
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA MODIFICADA M2	172
ANEXO 2.....	177
REGISTRO DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA DEL FONDO ESCALONADO.....	177

GEOMETRÍA ORIGINAL.....	178
GEOMETRÍA MODIFICADA M1	180
GEOMETRÍA MODIFICADA M2	182
ANEXO 3.....	184
DATOS LEVANTADOS EN LA COMPROBACIÓN GEOMÉTRICA.....	184
ANEXO 4.....	188
DIAGRAMAS DE FLUJO APLICADOS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	188
ANEXO 5.....	191
REGISTRO DE DATOS: PRUEBAS EN DISEÑO ORIGINAL, DISEÑO MODIFICADO m1 Y DISEÑO MODIFICADO M2.....	191
PRUEBAS EN DISEÑO ORIGINAL	192
PRUEBAS EN DISEÑO MODIFICADO M1	204
PRUEBAS DISEÑO MODIFICADO M2.....	216
ANEXO 6.....	228
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO: PRUEBAS EN DISEÑO ORIGINAL, DISEÑO MODIFICADO M1 Y DISEÑO MODIFICADO M2.....	228
PRUEBAS EN DISEÑO ORIGINAL	229
PRUEBAS EN DISEÑO MODIFICADO M1	239
PRUEBAS EN DISEÑO MODIFICADO M2.....	252
ANEXO 7.....	273
EJEMPLO PRÁCTICO DE PREDISEÑO DE UNA RÁPIDA ESCALONADA APLICANDO LAS CURVAS ADIMENSIONALES OBTENIDAS EN EL ESTUDIO	273

ANEXO 8.....	292
PLANOS DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	292

LISTADO DE FIGURAS

Figura No. 2.1: Tipos de flujo sobre una rápida escalonada.	9
Figura No. 2.2: Flujo Escalón a Escalón.....	10
Figura No. 2.3: Flujo en transición.....	10
Figura No. 2.4: Flujo rasante.....	11
Figura No. 2.5: Sub-régimen SK1.	12
Figura No. 2.6: Sub-régimen SK2.	12
Figura No. 2.7: Sub-régimen SK3.	13
Figura No. 2.8: Zonas del flujo rasante.....	14
Figura No. 2.9: Deflexión en la lámina libre en la zona parcialmente aireada.	15
Figura No. 2.10: Punto de inicio de la auto aireación.	18
Figura No. 2.11: Factores de Fricción.	23
Figura No. 2.12: Esquema de secciones de control para disipación de energía en la rápida escalonada.	26
Figura No. 2.13: Bosquejo longitudinal del modelo analizado por Kramer y Chanson.....	33
Figura No. 2.14: Vista lateral izquierda de la instalación experimental.....	34
Figura No. 2.15: Frame capturado con una cámara de alta velocidad con 732 Hz en el escalón #21, rotado 26.6° con una resolución de 1600×1200 px. ...	35
Figura No. 2.16: Vista lateral derecha de la instalación experimental.	36
Figura No. 2.17: (a) Corte longitudinal del modelo. (b) Vista lateral de la rápida lisa.....	37
Figura No. 3.1: Implantación general de la instalación experimental de la rápida con perfil escalonado en el CIERHI.....	41
Figura No. 3.2: Esquema de los elementos de la compuerta en la instalación experimental.....	47
Figura No. 3.3: Esquema de las zonas de la instalación experimental.....	48
Figura No. 3.4: Esquema de la sección de control para flujo supercrítico (Compuerta).	54

Figura No. 3.5: Esquema tridimensional del canal de la salida al pie de la rápida.	57
Figura No. 3.6: Esquema en vista tridimensional del tanque de aforo al pie de la rápida.....	58
Figura No. 3.7: Esquema de ubicación de los puntos de medición de calados en el canal de aproximación.	60
Figura No. 3.8: Esquema de ubicación de los puntos de medición de calados en el fondo escalonado.	60
Figura No. 3.9: Esquema de ubicación de los puntos de medición de calados en el canal de salida.	61
Figura No. 3.10: Esquema del vertedero rectangular.....	61
Figura No. 3.11: Esquema en corte de los puntos considerados en el levantamiento con estación total de la instalación experimental.	68
Figura No. 3.12: Esquema en planta de los puntos considerados en el levantamiento con estación total de la instalación experimental.	69
Figura No. 3.13: Esquema de los puntos considerados en el levantamiento con distanciómetro y nonio.....	70
Figura No. 5.1: Valores promedio del factor de fricción máximo y mínimo.....	151

LISTADO DE TABLAS

Tabla No. 3.1: Calado normal para diferentes pendientes para caudal de diseño de la instalación.....	43
Tabla No. 3.2: Calado normal vs pendientes para el caudal mínimo de operación.....	44
Tabla No. 3.3: Calculo de la apertura de la compuerta y de la longitud de desarrollo de la contracción del flujo para el plan de pruebas definido.	46
Tabla No. 3.4: Dimensiones geométricas del canal de aproximación.....	51
Tabla No. 3.5: Dimensiones geométricas de la rápida escalonada.	56
Tabla No. 3.6: Dimensiones geométricas del canal de salida.....	57
Tabla No. 3.7: Dimensiones geométricas del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales.	62
Tabla No. 3.8: Plan de pruebas para la instalación experimental.	67
Tabla No. 3.9: Análisis comparativo de las pendientes correspondientes al canal de aproximación y de salida, en planos y las obtenidas en el proceso constructivo para la instalación experimental.	68
Tabla No. 3.10: Promedio de mediciones realizadas en la rápida escalonada con distanciómetro.	71
Tabla No. 3.11: Números adimensionales calculados en el canal de aproximación.....	73
Tabla No. 3.12: Número adimensional de Reynolds para el perfil de fondo escalonado.....	74
Tabla No. 4.1: Resultados obtenidos a partir de la modelación numérica en ANSYS y comparación con los resultados obtenidos mediante el análisis experimental para el diseño modificado M2.	97
Tabla No. 4.2: Determinación de la concentración media de aire para la rápida escalonada con diseño modificado.....	98
Tabla No. 4.3: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Geometría Modificada M1 (calados máximos).	99

Tabla No. 4.4: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Modificada M1 (calados mínimos).	100
Tabla No. 4.5: Porcentaje de disipación de energía en la rápida escalonada con geometría modificada M1.	102
Tabla No. 4.6: Cálculos de los parámetros adimensionales a ser analizados.	103
Tabla No. 4.7: Cálculos para determinar los valores de los parámetros adimensionales a analizarse en la rápida escalonada con geometría modificada M1.	106
Tabla No. 4.8: Comparación de las concentraciones medias de aire calculadas teórica y experimentalmente con geometría modificada M1.	109
Tabla No. 4.9: Comparación de los factores de fricción calculados teóricamente y los factores de fricción calculados con el modelo físico.	109
Tabla No. 4.10: Comparación de la disipación de energía entre los cálculos obtenidos del modelo físico y los cálculos teóricos.	110
Tabla No. 4.11: Resultados obtenidos a partir de la modelación numérica en ANSYS y comparación con los resultados obtenidos mediante el análisis experimental para el diseño modificado M2.	122
Tabla No. 4.12: Determinación de la concentración media de aire para la rápida escalonada con diseño modificado.	123
Tabla No. 4.13: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Geometría Modificada M2 (calados máximos).	124
Tabla No. 4.14: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Geometría Modificada M2 (calados mínimos).	124
Tabla No. 4.15: Porcentaje de disipación de energía en la instalación experimental con geometría modificada M2.	126
Tabla No. 4.16: Cálculos de los parámetros adimensionales a ser analizados en la instalación experimental.	127
Tabla No. 4.17: Cálculos de los parámetros adimensionales a ser analizados en la instalación experimental con geometría modificada M2.	130

Tabla No. 4.18: Comparación de las concentraciones medias de aire calculadas teórica y experimentalmente con geometría modificada M2.....	132
Tabla No. 4.19: Comparación de los factores de fricción calculados teóricamente y los factores de fricción obtenidos experimentalmente.	132
Tabla No. 4.20: Comparación de la disipación de energía entre los resultados teóricos y los resultados experimentales.	133
Tabla No. 4.21: Concentración media de aire para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.	135
Tabla No. 4.22: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico en la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2 (calados máximos).	136
Tabla No. 4.23: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico en la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2 (calados mínimos).	136
Tabla No. 4.24: Comparación de disipación de energía entre Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.	137

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía No. 3.1: Instalación experimental de la rápida con perfil escalonado en el laboratorio del CIERHI.....	41
Fotografía No. 3.2: Tanque de abastecimiento, tubería de ingreso y accesorios.	49
Fotografía No. 3.3: Tanque de abastecimiento y estructura de soporte.....	50
Fotografía No. 3.4: Colocación del canal de aproximación 1.8 (m) ubicado dentro del tanque de abastecimiento.	51
Fotografía No. 3.5: Impermeabilización de la tapa en el canal de aproximación (1.80 m) construido en acrílico, ubicado en el tanque de abastecimiento.	52
Fotografía No. 3.6: Instalación del tramo externo del canal de aproximación, con una pendiente de 2% para garantizar un flujo supercrítico.....	52
Fotografía No. 3.7: Empate del canal de aproximación con la rápida escalonada.....	53
Fotografía No. 3.8: Perspectiva del canal de aproximación en la instalación de la rápida escalonada para un flujo supercrítico con geometría original.	53
Fotografía No. 3.9: Construcción de la compuerta a ser ubicada en el tramo interno del canal de aproximación del tanque de abastecimiento.	54
Fotografía No. 3.10: Compuerta ubicada a 0.80 m del inicio del tramo interno del canal de aproximación del tanque de abastecimiento.	55
Fotografía No. 3.11: Vista en perspectiva de la sección escalonada de la rápida en la instalación experimental.	56
Fotografía No. 3.12: Canal de salida al final de la rápida escalonada.	57
Fotografía No. 3.13: Tanque de aforo y pantallas de uniformización del flujo.....	59
Fotografía No. 3.14: Canal de aforo, pantalla uniformizadora y vertedero.....	59

Fotografía No. 3.15: Vertedero rectangular para el aforo del caudal de aforo de la instalación experimental de la rápida escalonada.	62
Fotografía No. 3.16: Limnómetro instalado en el canal de aforo de la instalación experimental de la rápida escalonada.	63
Fotografía No. 3.17: Cinta métrica ubicada en la rápida escalonada.....	64
Fotografía No. 3.18: Estación total (marca Topcon).	64
Fotografía No. 3.19: Nivel topográfico (marca Wild Heerbrugg Switzerland).	65
Fotografía No. 3.20: Probeta graduada de plástico.....	65
Fotografía No. 3.21: Calibrador pie de rey o nonio, utilizado para la medición de las huellas y contrahuellas de los escalones en la instalación experimental.....	65
Fotografía No. 3.22: Distanciómetro o medidor láser utilizado para la medición de las longitudes de los escalones en la instalación experimental.....	65
Fotografía No. 3.23: Longitud del escalón, huella y contrahuella en la instalación experimental de la rápida escalonada.	70
Fotografía No. 3.24: Perspectiva del canal de aproximación.	72
Fotografía No. 3.25: Vista frontal de la rápida escalonada (Fondo escalonado).....	74
Fotografía No. 4.1: Prueba 0. Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones e identificación del punto inicial de aireación.	77
Fotografía No. 4.2: Prueba 0. Vista superior al flujo a la entrada a la rápida escalonada.....	78
Fotografía No. 4.3: Prueba 0. Vista lateral derecha, flujo al pie de la rápida e inicio del canal de salida.....	78
Fotografía No. 4.4: Prueba 5. Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones de la rápida escalonada.	79
Fotografía No. 4.5: Prueba 5. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire.	79

Fotografía No. 4.6: Prueba 5. (A) Vista frontal del flujo y (B) Vista lateral izquierda del flujo en la rápida escalonada.....	80
Fotografía No. 4.7: Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.....	80
Fotografía No. 4.8: Vista lateral de la Instalación experimental con el perfil curvo liso instalado.....	84
Fotografía No. 4.9: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.....	85
Fotografía No. 4.10: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	86
Fotografía No. 4.11: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.	86
Fotografía No. 4.12: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.	87
Fotografía No. 4.13: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	87
Fotografía No. 4.14: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	88
Fotografía No. 4.15: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en la rápida escalonada.	88
Fotografía No. 4.16: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.	89
Fotografía No. 4.17: Vista lateral de la Instalación experimental con el perfil curvo escalonado instalado.	113
Fotografía No. 4.18: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.....	114
Fotografía No. 4.19: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.....	114

Fotografía No. 4.20: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.	115
Fotografía No. 4.21: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	115
Fotografía No. 4.22: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	116
Fotografía No. 4.23: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.	116
Fotografía No. 4.24: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.	117
Fotografía No. 4.25: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	117
Fotografía No. 4.26: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.	118
Fotografía No. 4.27: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en la rápida escalonada.	118
Fotografía No. 4.28: Prueba 5, Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	119
Fotografía No. 4.29: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.	119
Fotografía No. 4.30: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.	120

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico No. 3.1: Diseño del inicio del perfil escalonado en la geometría original.....	48
Gráfico No. 4.1: Curva de diseño del perfil escalonado en la geometría original.....	77
Gráfico No. 4.2: Perfil de flujo y propuesta de optimización a colocarse en el perfil escalonado de la rápida.....	83
Gráfico No. 4.3: Variación de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P0.	91
Gráfico No. 4.4: Variación de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P1.	92
Gráfico No. 4.5: Variación de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P2.	93
Gráfico No. 4.6: Variación de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P3.	94
Gráfico No. 4.7: Variación de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P4.	95
Gráfico No. 4.8: Variación de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P5.	96
Gráfico No. 4.9: Valores de factores de fricción para calados máximos y mínimos.....	100
Gráfico No. 4.10: Porcentajes de disipación de energía en la rápida escalonada con geometría modificada M1.....	102

Gráfico No. 4.11: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la Ec. (3-1).....	104
Gráfico No. 4.12: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la Ec. (3-2).....	105
Gráfico No. 4.13: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ecuación (3-3).	107
Gráfico No. 4.14: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ecuación (3-4).	108
Gráfico No. 4.15: Valores de factores de fricción para calados máximos y mínimos.....	125
Gráfico No. 4.16: Porcentajes de disipación de energía en la rápida escalonada con geometría modificada M2.	126
Gráfico No. 4.17: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ec. (3-1)......	128
Gráfico No. 4.18: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ec. (3-1).....	129
Gráfico No. 4.19: Curva adimensional de los parámetros descritos en la ec. (3-3)......	130
Gráfico No. 4.20: Curva adimensional de los parámetros descritos en la ec. (3-4).	131
Gráfico No. 4.21: Valores promedios de factores de fricción para calados máximos y mínimos en la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.	137
Gráfico No. 4.22: Porcentajes de disipación de energía en la rápida escalonada para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.	138
Gráfico No. 4.23: Curvas adimensionales para la zona no aireada en la Geometría Modificada M1 y Geometría Modificada M2.....	139
Gráfico No. 4.24: Curvas adimensionales en la zona no aireada para Geometría Modificada M1 y Geometría Modificada M2.	140

Gráfico No. 4.25: Curvas adimensionales en la zona aireada para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.....	141
Gráfico No. 4.26: Curvas adimensionales en la zona aireada para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.....	142
Gráfico No. 5.1: Comparación porcentual de disipación de energía entre Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.	150

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definición	Unidad
f_e	Factor de fricción de Darcy-Weisbach para flujo bifásico	Adimensional
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
h	Altura del escalón	m
l	Longitud del escalón	m
k_s	Rugosidad de forma	m
q	Caudal unitario	$m^3/s.m$
Fr	Número de Froude	Adimensional
Re	Número de Reynolds	Adimensional
We	Número de Weber	Adimensional
α	Ángulo de inclinación de la rápida escalonada	$^\circ$
ρ	Densidad del agua	kg/m^3
μ	Viscosidad dinámica del agua	$N.s/m^2$
σ	Tensión superficial del agua	N/m
ν	Viscosidad cinemática del agua	m^2/s
H_d	Altura de la rápida escalonada	m
B	Ancho de la rápida escalonada	m
Q	Caudal	l/s
Q_{min}	Caudal mínimo de operación	l/s
Q_{max}	Caudal máximo de operación	l/s

Símbolo	Definición	Unidad
y_c	Profundidad crítica	m
y_u	Profundidad de flujo en la zona uniforme	cm
y_w	Profundidad de agua clara	cm
V_w	Velocidad de agua clara	m/s
y_i	Profundidad de flujo en el punto de inicio de auto aireación	cm
L_i	Longitud medida desde la cresta de la rápida escalonada hasta el punto donde se inicia la auto aireación	cm
C_m	Concentración media de aire	Adimensional
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	%
V_r	Velocidad representativa de una sección obtenida mediante modelación numérica	m/s

RESUMEN

Ante el rápido crecimiento de las ciudades andinas en el Ecuador, la conducción de grandes caudales por importantes desniveles topográficos es requerida. Por ello, ante la falta de información técnica, es necesario el estudio de estructuras que le permitan al diseñador hidráulico asumir este reto.

El presente trabajo de titulación se enfoca en el estudio de una rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° , huella y contrahuella de 5 (cm) y flujo de aproximación en régimen supercrítico. El objetivo es a través de la modelación física optimizar la geometría de ingreso al fondo escalonado hasta lograr un comportamiento hidráulico adecuado y evaluar la disipación de energía.

Se han construido y evaluado tres configuraciones geométricas; la geometría original, la geometría modificada M1 y la geometría modificada M2. La geometría original en su zona de ingreso obedece a un perfil parabólico escalonado, al ejecutar el plan de pruebas se observa un comportamiento hidráulico inadecuado porque el flujo se despega del fondo escalonado para los caudales más altos del plan de pruebas. La geometría modificada M1 es un perfil curvo liso que se ajusta al perfil del flujo al ingreso a la rápida con la operación del caudal máximo en la geometría original. Se corrige la separación del flujo en los caudales de operación altos, pero se producen el choque del flujo con los primeros escalones provocando rebotes hacia aguas debajo de la rápida para el rango de caudales bajos. La geometría modificada M2 es un perfil curvo escalonado que mantiene la curvatura de M1. Con esta modificación se logra un comportamiento hidráulico adecuado

Finalmente, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en la evaluación de comportamiento hidráulico, factor de fricción y disipación de energía para las dos geometrías modificadas M1 y M2. También se han desarrollado curvas adimensionales como una herramienta para el diseñador hidráulico.

Palabras Clave: Rápida Escalonada, Flujo Supercrítico, Comportamiento Hidráulico y Disipación de Energía.

ABSTRACT

Given the rapid growth of the Andean cities in Ecuador, the conduction of large flows through important topographic slopes, is required. Therefore, in the absence of technical information, it is necessary to study structures that allow the hydraulic designer to take on this challenge.

This present titling work focuses on the study of a stepped spillway with an inclination angle of 45° , treads and risers of 5 (cm) and approximation flow in a supercritical regime. The goal is reached through the physical modeling, optimizing the geometry of entry to the stepped bottom until adequate hydraulic behavior is achieved and energy dissipation is evaluated.

Three geometric configurations have been constructed and evaluated, the original geometry, the modified geometry M1 and the modified geometry M2. The original geometry in its entrance zone is due to a parabolic profile. From running the test plan an unsuitable hydraulic behavior is observed because the flow is detached from the stepped bottom for the higher flow rates of the test plan. The modified geometry M1 is a smooth curved profile which fits the stepped bottom separate flow with the maximum flow in the original geometry. The flow separation is corrected, but rebounds occur due to shock flow with the first steps. The modified geometry M2 is a stepped curved profile that keeps the curvature of M1. With this modification a suitable hydraulic performance is achieved.

Finally, a comparison between the results obtained in the evaluation of hydraulic performance, friction factor and energy dissipation for the two modified geometries M1 and M2 is performed. Dimensionless curves have also been developed as a tool for the hydraulic designer.

Keywords: Stepped Spillway, Supercritical Flow, Hydraulic Behavior and Energy Dissipation.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En la zona andina del Ecuador se desarrollan varias ciudades sobre topografías abruptas, esta situación ocasiona normalmente que el flujo en los colectores que recogen las aguas servidas y aguas lluvias presente un régimen supercrítico. El crecimiento urbano de estas ciudades exige al diseñador hidráulico que implemente estructuras especiales de descarga en el cual estas cumplan adecuadamente la función de disipar energía al descargar importantes caudales venciendo grandes desniveles topográficos. La descarga debe garantizar la estabilidad de los márgenes del río y evitar que se produzca socavación en cauces de los cuerpos receptores (Haro y Jara, 2010).

De acuerdo con Yasuda et al. (2001), Chanson et al. (2001) y Ohtsu et al. (2004), las rápidas escalonadas son efectivas para la disipación de energía cuando se tienen grandes desniveles en estructuras de caídas (Cantillo, 2017). Los escalones aumentan considerablemente la disipación de energía a lo largo de la rápida escalonada y reducen el tamaño de las estructuras anexas a la estructura hidráulica principal como el cuenco de disipación y los muros de protección (Chafi et al., 2010).

En la primera etapa del proyecto de investigación PIMI 16-06 se reporta el diseño hidráulico de una rápida escalonada con 45 grados de inclinación que opera con flujo de aproximación subcrítico. Sin embargo, en lugares en donde la topografía es accidentada, las fuertes pendientes producen predominancia de las fuerzas inerciales en el flujo, obteniendo así un sistema que trabaje con régimen supercrítico (Lucero y Santamaría, 2018).

A pesar de ser el régimen supercrítico predominante en zonas de alta montaña, no se tienen criterios, ni recomendaciones claras y definitivas para el diseño de rápidas escalonadas con flujo de ingreso en régimen supercrítico (Cantillo, 2017). Debido a esta situación, el diseñador se ve obligado a añadir estructuras adicionales que

permitan cambiar el flujo de aproximación a régimen supercrítico a subcrítico, aquello representa un incremento tanto en el espacio de implementación como en el costo del proyecto.

Por ello, el presente estudio experimental busca analizar el comportamiento hidráulico del flujo en la rápida escalonada con flujo de aproximación supercrítico y optimizar la geometría que empata el canal rectangular con flujo de aproximación supercrítico a la rápida escalonada. Las geometrías implementadas serán evaluadas con respecto a su comportamiento hidráulico y su eficiencia en disipación de energía.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Optimizar experimentalmente la geometría de ingreso hacia la rápida escalonada desde un canal rectangular con flujo supercrítico determinando la eficiencia en disipación de energía en la rápida escalonada para un rango definido de caudales de operación.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar experimentalmente las características del flujo y la eficiencia en disipación de energía con la geometría inicial para un rango de caudales de operación.
- Proponer al menos dos modificaciones de optimización geométrica del perfil de ingreso a la rápida escalonada.
- Evaluar experimentalmente el flujo y la eficiencia en disipación de energía en cada una de las modificaciones instaladas.
- Comparar los resultados experimentales obtenidos entre la geometría inicial y cada una de las modificaciones realizadas.

1.3. ALCANCE

Los resultados esperados de la investigación experimental, dentro de la segunda fase (canal de aproximación con flujo supercrítico) se detallan a continuación:

- Diseño de las modificaciones geométricas a ejecutarse en la Instalación Experimental para obtener flujo de aproximación supercrítico.
- Implementación en la Instalación Experimental de las modificaciones geométricas propuestas, para obtener flujo de aproximación supercrítico.
- Calibración de la Instalación Experimental modificada.
- Ejecución del Plan de Pruebas para el estudio del flujo en la instalación experimental con geometría original en un rango de caudales determinado.
- Procesamiento de la información recolectada en las pruebas.
- Análisis de resultados obtenidos en el plan de pruebas de la geometría original.
- Diseño, construcción y calibración de la propuesta de optimización geométrica de la instalación experimental.
- Análisis de resultados obtenidos en el plan de pruebas de la geometría optimizada propuesta.
- Comparación de resultados entre el diseño geométrico original y el diseño de optimización. De ser necesario, se harán otras modificaciones geométricas que optimicen su funcionamiento, para lograr condiciones adecuadas en el flujo y en la disipación de energía.

1.4. JUSTIFICACIÓN

1.4.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En las rápidas escalonadas se forman dos regiones; la zona no aireada y la zona aireada. Estas dos zonas son separadas por el punto inicial de aireación. La mayor parte de disipación de energía se produce en la zona aireada, en esta zona se crea un pseudo-fondo formado por los bordes de los escalones. Debajo del pseudo-fondo se forman vórtices de recirculación. Estos remolinos de recirculación son mantenidos por la transmisión de la tensión de corte desde la corriente principal (Toombes y Chanson, 2007). El punto inicial de aireación se encuentra más aguas arriba en una rápida escalonada que en una rápida lisa, esto se da debido a un

aumento del espesor de la capa límite turbulenta y el nivel de alta turbulencia producida por los escalones (Pfister y Hager, 2011).

El rendimiento hidráulico de rápidas escalonados a altas velocidades debe ser estudiado a mayor profundidad debido a la gran preocupación por vulnerabilidad de la estructura a sufrir daños por cavitación (Amador et al., 2009). Al aumentar la velocidad y la profundidad del flujo se encontró que también aumenta la velocidad de difusión de aire en el flujo. Esta correlación positiva indica que la turbulencia de flujo es un factor clave para el proceso de desarrollo de auto-aireación (Wei et al., 2016).

Un punto importante de análisis es también la estabilidad de la superficie libre dentro del régimen de flujo. Con flujo a altas velocidades se observa inestabilidad; se registraron elevaciones y fluctuaciones de superficie libre en el flujo aireado y no aireado. El perfil de superficie libre indica un incremento de volumen de flujo y una sección de flujo rápidamente variado junto al punto de inicio de la auto-aireación (Kramer y Chanson, 2018).

La modelación física es la reproducción, a escala reducida, de fenómenos estados o procesos relevantes del flujo del agua para mediante la interpretación de resultados, buscar la optimización de la estructura en estudio (Castro et al., 2007). Los modelos físicos permiten que los técnicos sean capaces de prever qué pasará en el prototipo en situaciones de particular interés mediante observación del comportamiento del modelo (Mateos, 2000).

Con los resultados obtenidos se podrá evaluar experimentalmente la disipación de energía, pues a la fecha se cuenta con información parcial o insuficiente, en lo relacionado a valores reales de coeficientes de fricción, así como la incidencia de la introducción de aire en los mismos. Estos coeficientes que se aplican en la etapa de diseño son prácticamente los que definen los porcentajes de disipación de energía esperados durante la operación de estas obras y por lo tanto determinan los criterios de diseño para todo el sistema de obras que continúan aguas abajo o sistemas de protección de cauces receptores en los tramos de restitución (Guachamín y Simbaña, 2018).

1.4.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

El análisis del flujo en un canal rectangular con régimen supercrítico que se aproxima a una rápida de fondo escalonado, las características del flujo rasante sobre dicha estructura y la eficiencia de la disipación de energía a lo largo de una rápida escalonada deben fundamentarse en resultados experimentales de un modelo físico, donde para un rango de caudales establecido, se pueda observar y medir experimentalmente el funcionamiento hidráulico de las estructuras. Los resultados obtenidos permiten evaluar el comportamiento hidráulico de las estructuras y de ser necesario, encaminar un proceso de optimización del sistema (López and Soto, 2016).

La segunda fase del proyecto de investigación PIMI 16-06 dentro del que se desarrolla el trabajo de titulación, parte con la estructura experimental restante de la primera fase de este proyecto, esta será sometida a un análisis experimental con una estructura de ingreso con flujo supercrítico de aproximación. Con los resultados observados en la geometría inicial se procederá a presentar al menos dos propuestas de optimización geométrica. Se procesarán los datos observados con la finalidad de evaluar el efecto que el flujo de aproximación supercrítico tiene sobre la disipación de energía en la rápida escalonada con 45 grados de inclinación. Finalmente se comparará la eficiencia en disipación de energía que presenta la instalación experimental tanto en la geometría inicial como en cada una de las modificaciones geométricas.

1.4.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El desarrollo del presente proyecto de titulación permitirá evaluar una rápida escalonada con flujo de aproximación supercrítico de forma cualitativa (interacción flujo – estructura) y cuantitativamente (porcentaje de energía disipada). Los resultados que se obtendrán en el presente trabajo de titulación podrán ser aplicados para diseños de rápidas escalonadas con flujo de aproximación supercrítico aplicables en topografías accidentadas y abruptas como las que caracteriza a la zona andina del Ecuador, este tipo de estructuras de descenso, con grandes desniveles (mayores a 50 m) y que deben operar con amplios rangos

de caudales (hasta $150 \text{ m}^3/\text{s}$), son frecuentemente utilizadas en obras hidráulicas de descarga, que son requeridas para permitir el descenso y la restitución de los caudales, garantizando al mismo tiempo la estabilidad de las laderas y lechos de los cauces receptores o, la estabilidad del sistema de estructuras que se desarrollan aguas abajo de estas descargas (Guachamín y Simbaña, 2018).

CAPÍTULO 2

2. BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE

2.1. BASE TEÓRICA

2.1.1. INTRODUCCIÓN

El diseño de canales escalonados ha sido desarrollado por más de 3 milenios (Chanson, 1995). Un número considerable de estructuras han sido construidas aplicando esta técnica durante el siglo XIX y a principios del siglo XX que fue cuando la técnica se estancó debido a que ya no cumplía con los requerimientos de la época. Avances tecnológicos en materiales y técnicas de construcción como el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) que permiten su construcción de manera rápida y económica impulsaron el renacimiento del interés por este tipo de estructuras hasta la actualidad que se continúa desarrollando investigación sobre este tema (Chanson, 2015).

Los canales escalonados o también conocidos como rápidas escalonadas son estructuras que permiten conducir y al mismo tiempo disipar energía del flujo entre dos puntos con altas pendientes entre ellos, casos que usualmente se presentan en superficies con topografías abruptas, generalmente en ciudades andinas.

Los escalones en la rápida escalonada aumenta considerablemente la resistencia al flujo y la disipación de energía, esto permite que las estructuras adicionales al pie de rápida, necesarias para disipar la energía residual del flujo al final de la rápida escalonada antes de que el flujo sea reinsertado al cauce natural, sean de menores dimensiones ya que su demanda de disipación será menor. Otra ventaja de las rápidas escalonadas es la auto-aireación del flujo que contribuye a prevenir riesgos de cavitación en la estructura (Flores, 2015).

En las últimas décadas, los perfiles escalonados a más de ser construidos en vertederos de excesos presas, también son comúnmente empleados para estructuras de drenaje pluvial en zonas andinas donde existen cambios considerables de pendiente y se vuelve necesaria la disipación de energía para

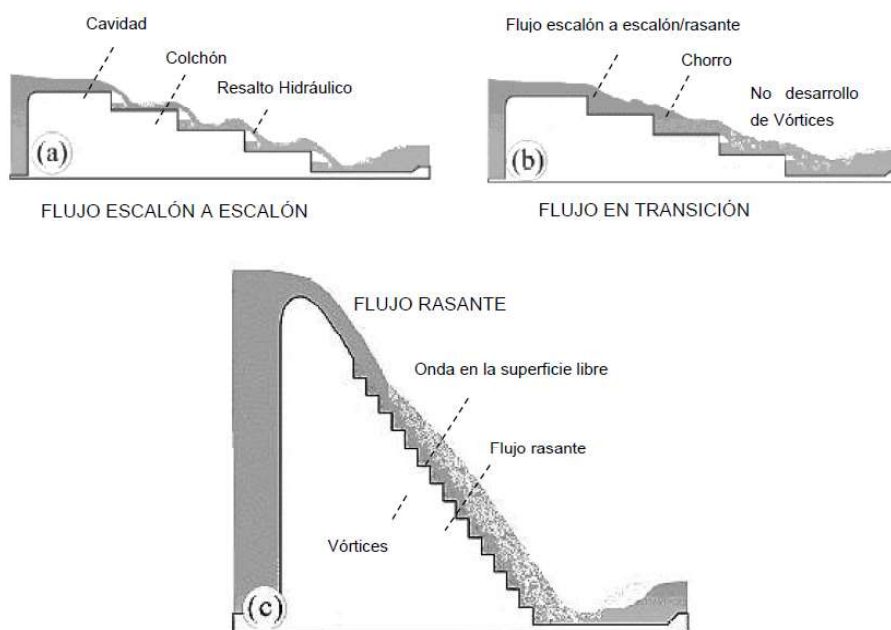
evitar la erosión de cauces naturales, en plantas de depuración o en cursos de aguas artificiales o naturales para re-oxigenación de agua e incluso en fuentes de parques urbanos por motivos estéticos (Amador, 2005).

A pesar de su amplia aplicabilidad y las ventajas económicas e hidráulicas que los vertederos escalonados presentan con respecto a los vertederos lisos, los cuencos disipadores y los disipadores de salto en sky, la naturaleza altamente turbulenta y el gran contenido de aire en el flujo que circula a través de una rápida escalonada han impedido el desarrollo de un modelo analítico confiable para predecir sus características, por ello el análisis de este flujo debe realizarse por medio de estudios experimentales (Flores, 2015).

2.1.2. TIPOS DE FLUJO SOBRE UNA RÁPIDA ESCALONADA.

El flujo sobre una rápida escalonada depende de ciertas características de la configuración de la estructura incluyendo la pendiente del canal, la geometría de los escalones y del caudal circulante (Felder, 2013). En una rápida escalonada el flujo se clasifica dentro de tres tipos de vertido; flujo de escalón en escalón (napple flow) para caudales pequeños, flujo en transición para caudales intermedios y flujo rasante (skimming flow) para caudales mayores (Chanson, 2002). La importancia del estudio del flujo sobre una rápida escalonada radica en que la cantidad de energía disipada es relativa a su tipo de vertido (Felder, 2013).

Figura No. 2.1: Tipos de flujo sobre una rápida escalonada.



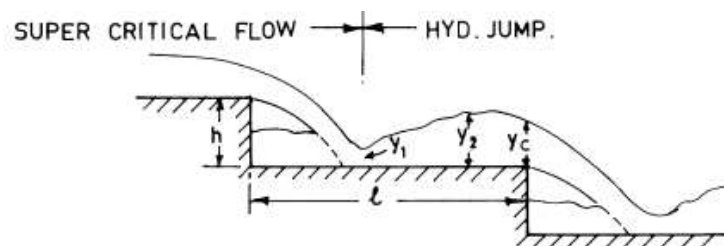
FUENTE: (Pfister and Hager, 2011)

2.1.2.1. FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN (NAPPE FLOW)

Se presenta en una rápida escalonada funcionando con caudales pequeños, se caracteriza por estar conformado por una serie de saltos desde el escalón superior hacia el escalón inferior. La disipación de energía se produce a través de la ruptura del chorro en el aire, por el choque del chorro en la cara horizontal del escalón inferior y en ocasiones por la formación de resalto hidráulico en el escalón (Chanson, 2015).

La formación del resalto hidráulico en el escalón es más probable en rápidas escalonadas con pendientes relativamente menores y caudales pequeños. De acuerdo a las condiciones de diseño, se puede variar la geometría de la rápida escalonada para tener dimensiones variables de los escalones, implantación de pantallas al filo de los escalones para asegurar el resalto hidráulico y escalones con pendiente adversa (Khatsuria, 2005). Las presiones y sus fluctuaciones son aspectos muy importantes que influyen en el comportamiento dentro de una rápida escalonada, por ello la ventilación es esencial para evitar inestabilidades en la estructura (Chanson, 2015).

Figura No. 2.2: Flujo Escalón a Escalón

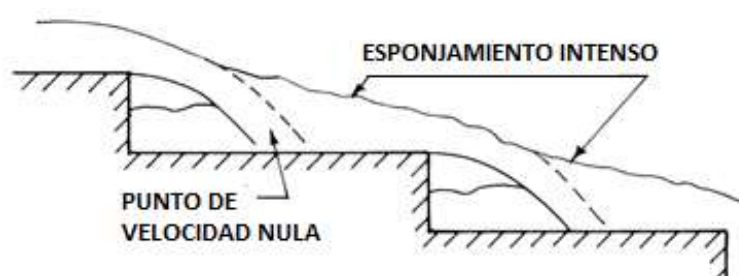


FUENTE: (Khatsuria, 2005)

2.1.2.2. FLUJO EN TRANSICIÓN

El flujo en transición se presenta en una rápida escalonada operando con caudales intermedios entre los que se producen el flujo escalón a escalón y el flujo rasante. El flujo en transición es caracterizado por ser un flujo con movimiento caótico asociado con fluctuaciones de presión y una intensa salpicadura. Estas características producen variaciones irregulares en la profundidad del flujo, esto provoca que las paredes laterales de la estructura tengan que ser más altas comparadas con las necesarias en los otros tipos de flujo en una rápida escalonada, por ello la literatura recomienda evitar el diseño de rápidas escalonadas con flujo en transición (Chanson, 2015).

Figura No. 2.3: Flujo en transición.



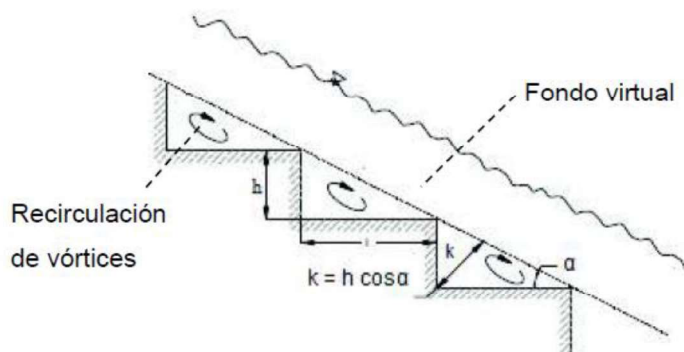
FUENTE: (Khatsuria, 2005)

2.1.2.3. FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW)

El flujo rasante, también conocido como el flujo de diseño, se presenta para caudales mayores que en los otros tipos de flujo en una rápida escalonada (Chanson, 2015). En este régimen el flujo se puede dividir en dos zonas relevantes,

estas son definidas por un fondo virtual formado por una línea que une los vértices en el cual se une la huella y contrahuella de cada escalón.

Figura No. 2.4: Flujo rasante.



FUENTE: (Frizell, 2006)

La primera zona relevante en el flujo rasante es la que se produce sobre el fondo virtual, es conocido como el flujo primario y se caracteriza por ser un flujo bifásico compuesto por agua y aire. Este es soportado tanto por los vértices de los escalones como por los vórtices formados en cada escalón, ese contacto aporta a la disipación de energía a través de fricción.

La segunda es una zona inferior al fondo virtual, está formada por celdas triangulares debido a la geometría de los escalones. Dichas celdas permiten la formación del flujo secundario; en estas cavidades el agua se encuentra en constante recirculación debido a la transferencia de momento desde el flujo primario hacia el secundario, esta permanente transferencia permite la disipación de energía cinética en los vórtices (Chanson, 2015).

2.1.3. FLUJO RASANTE

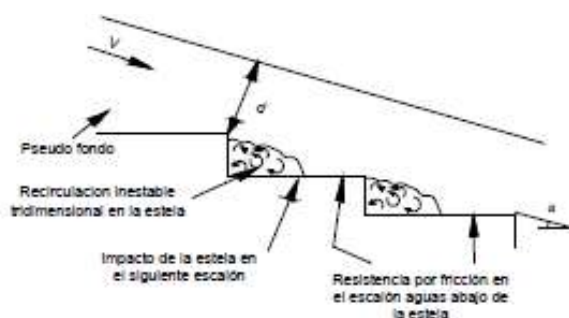
2.1.3.1. TIPOS DE FLUJO RASANTE

Chanson (1997a) propone dividir al flujo rasante en tres sub-regímenes, esta clasificación se basa en el comportamiento de los vórtices que se forman entre los vértices de los escalones, en el flujo secundario. Los tres sub-regímenes propuestos por Chanson son:

a) Flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario (SK1).

Se presenta en rápidas escalonadas con pendientes moderadas y caudales de operaci3n bajos. En este sub-régimen los v3rtices recirculantes ocupan s3lo la mitad aguas arriba de la huella del escal3n; el chorro impacta aproximadamente en la mitad del escal3n y escurre paralelo a la huella del escal3n provocando fricci3n entre el flujo y los escalones.

Figura No. 2.5: Sub-régimen SK1.

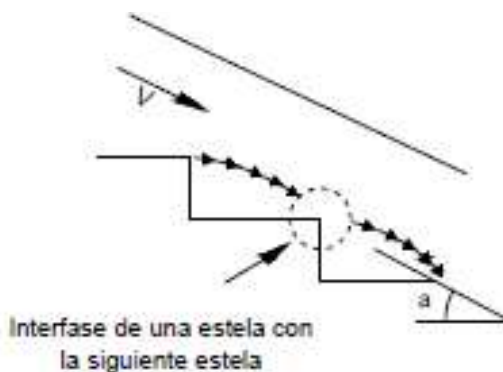


FUENTE: (Flores, 2015)

b) Flujo rasante con cavidad casi-completamente ocupada por el flujo secundario (SK2).

Se desarrolla en rápidas escalonadas con pendientes moderadas y caudales de operaci3n intermedios. El flujo escurre paralelo al fondo virtual y los v3rtices que se desarrollan en el flujo secundario abarcan la mayor parte de la huella del escal3n, en ocasiones interfieren con los v3rtices aguas abajo.

Figura No. 2.6: Sub-régimen SK2.

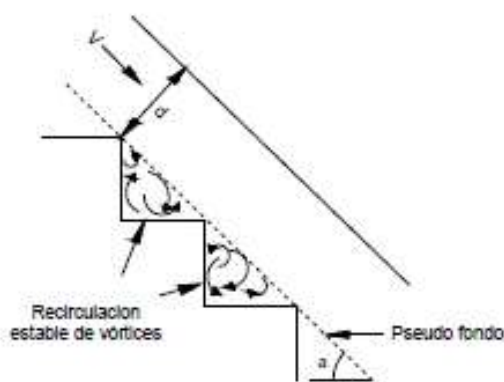


FUENTE: (Flores, 2015)

c) *Flujo rasante con una recirculación estable del flujo secundario (SK3).*

Para rápidas escalonadas con más pendiente ($\alpha > 22^\circ$) y caudales de operaci3n mayores se presenta el flujo SK3. En este sub-régimen el flujo escurre paralelo al fondo virtual y los v3rtices recirculantes ocupan completamente la huella del escal3n presentando un tamaño cuasi estable.

Figura No. 2.7: Sub-régimen SK3.



FUENTE: (Flores, 2015)

Mateos & Elviro (1992), como resultado de sus estudios experimentales observan que el intervalo de tiempo en el cual el flujo secundario permanece en la cavidad del escal3n es de 0.25 segundos. En fin, se puede concluir que el sub-régimen de flujo rasante es una funci3n del caudal, la altura y longitud del escal3n (Flores, 2015).

2.1.3.2. REGIONES DEL FLUJO RASANTE EN RÁPIDAS ESCALONADAS

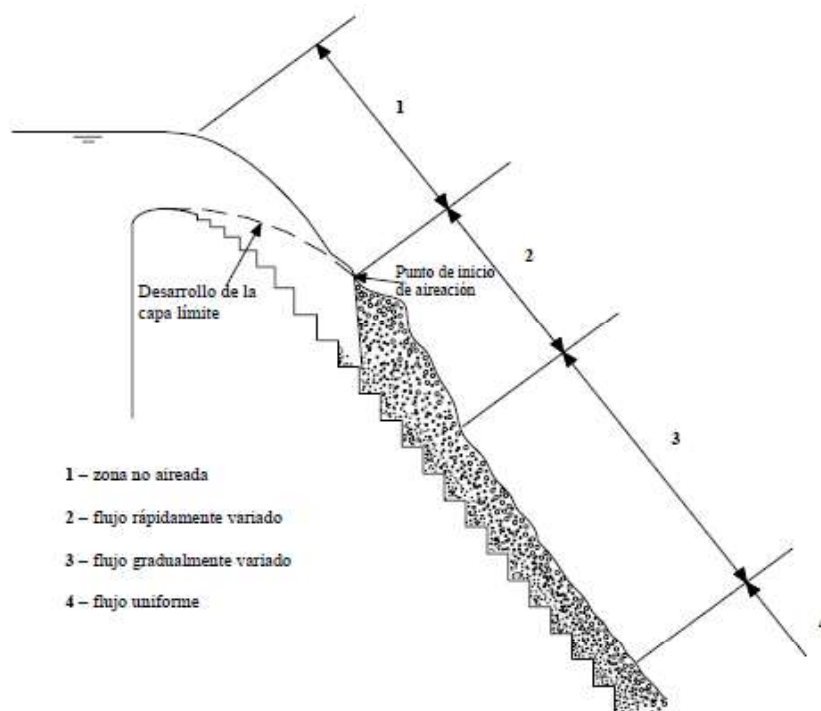
Como se ha descrito en las secciones anteriores, el flujo rasante sobre una rápida escalonada se divide en flujo primario; un flujo bifásico conformado por agua y aire que escurre sobre un fondo virtual y un flujo secundario; flujo recirculante conformado por v3rtices que se producen en las cavidades de los v3rtices de los escalones y forman el fondo virtual.

Según Matos (1999), el flujo rasante sobre una rápida escalonada puede ser dividido en cuatro diferentes regiones:

- 1) Flujo no aireado

- 2) Desarrollo del flujo parcialmente aireado
- 3) Desarrollo del flujo totalmente aireado
- 4) Completo desarrollo del flujo aireado (estado de equilibrio o uniforme)

Figura No. 2.8: Zonas del flujo rasante.



FUENTE: (Amador, 2005b)

1) *Flujo No Aireado*

En la cresta, que es la zona inicial de la rápida escalonada en donde empieza el desarrollo de la capa límite, el flujo es claro y sin aireación. En esta sección la superficie libre del flujo es lisa y transparente.

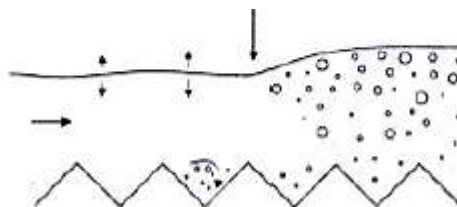
Chanson (1994), estableció que las ecuaciones que estiman el crecimiento de la capa límite es 2.8 veces mayor en las rápidas escalonadas que en las rápidas lisas.

2) *Flujo Parcialmente Aireado*

Continuando el recorrido del flujo hacia aguas abajo se llega al punto de inicio de la aireación, este punto representa la ubicación en la cual la zona superior de la capa límite alcanza la superficie libre y la turbulencia genera el inicio de la aireación natural del flujo. Luego del punto inicial de aireación se presenta una zona en la

cual la aireación en el flujo no ocupa completamente la sección transversal de los escalones. En esta zona también se puede observar una relevante deflexión en la lámina libre.

Figura No. 2.9: Deflexión en la lámina libre en la zona parcialmente aireada.



FUENTE: (Amador, 2005b)

3) *Flujo Completamente Aireado*

Luego de la zona de flujo parcialmente aireado, se presenta una nueva zona conocida como la del flujo completamente aireado. En esta zona, la aireación en el flujo ocupa completamente la sección transversal de los escalones, y los valores de concentración media de aire, velocidad y calado continúan variando gradualmente hacia aguas abajo.

4) *Flujo Aireado Uniforme o en Estado de Equilibrio*

Luego de pasar por las regiones descritas anteriormente, el flujo ingresa a la sección final que es la zona de flujo uniforme, en esta zona se alcanza el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción, el flujo se ha desarrollado completamente, y no existen variaciones en las características hidráulicas del flujo como la concentración media de aire, velocidad y calado (Amador, 2005b).

Debido a la complejidad para determinar el régimen uniforme considerando la evolución del flujo a lo largo de la rápida, Matos (2000a) propone la siguiente expresión: recomienda una (H_u) igual a:

$$\frac{H_u}{y_c} \approx 30 \quad (2-1)$$

Boes y Hager (2003a) sugieren una expresión más específica:

$$\frac{H_u}{y_c} \approx 24 (\sin \alpha)^{2/3} \quad (2-2)$$

$$\frac{H_u}{y_c} > 15 \text{ a } 20 \quad (2-3)$$

Donde:

H_u : Altura mínima de la rápida escalonada necesaria para la formación de flujo en régimen uniforme (m).

y_c : Calado crítico (m).

2.1.3.3. ECUACIONES EMPÍRICAS QUE DESCRIBEN EL FLUJO RASANTE

1) *Flujo No Aireado*

- *Capa Límite Turbulenta*

En las rápidas escalonadas, la zona no aireada se encuentra en función de la evolución de la capa límite turbulenta, que es una región sobre la cual se tiene un flujo irrotacional, esta capa sufre un aumento progresivo de su espesor hasta que se iguala a la altura del agua y se inicia la auto-aireación.

La distribución de velocidades en la capa limite sigue la siguiente ley potencial:

$$\frac{U(y)}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/N} \quad (2-4)$$

Donde:

U: Velocidad media

y: Altura de la rápida escalonada

U_0 : Velocidad del flujo irrotacional

δ : Espesor de la capa límite (definido como la distancia de la pseudo – solera 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 y Yasuda, 1997) o 3.3 según (Matos, 1999).

Dentro de la literatura técnica se encuentran expresiones que permiten estimar la evolución de la capa límite en rápidas escalonadas. Amador et al. (2006b), propone la siguiente expresión:

$$\frac{\delta}{L} = 0.112 \left(\frac{L}{k_s} \right)^{-0.309} \quad (2-5)$$

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

Por otra parte, Meireles (2004) propone una expresión para mayor rango:

$$\frac{\delta}{L} = 0.114 \left(\frac{L}{k_s} \right)^{-0.311} \quad (2-6)$$

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

Donde:

- δ : Espesor de la capa límite (m).
 L: Distancia al umbral del aliviadero (m).
 k_s : Rugosidad de forma (m).

2) Flujo Aireado

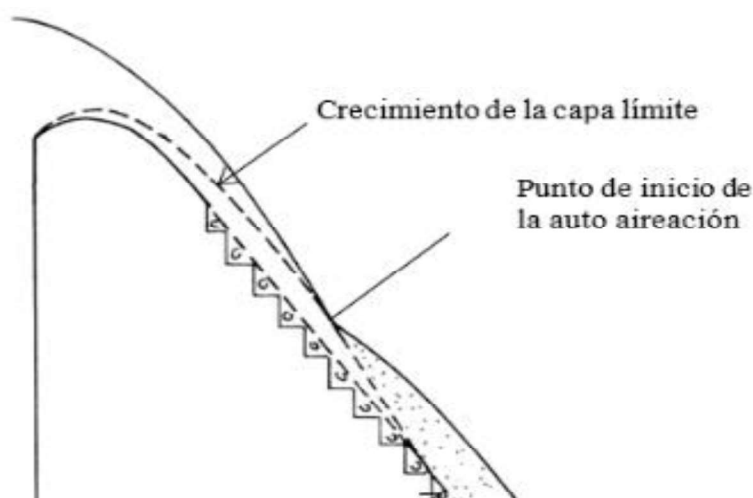
- *Ubicación del Punto de Inicio de la Auto-aireación*

Los canales escalonados, debido a la rugosidad que brindan sus escalones, se genera una zona no aireada de menor longitud comparada con la que se genera una rápida lisa en donde la aireación del flujo muchas veces está limitada a caudales bajos. Esta zona no aireada se encuentra limitada por el comportamiento de la capa límite turbulenta.

El punto de inicio de la auto-aireación toma lugar cuando la capa límite turbulenta alcanza la superficie libre. Esta es la ubicación crítica en donde las fluctuaciones

turbulentas del flujo 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 (Amador, 2005b).

Figura No. 2.10: Punto de inicio de la auto aireación.



FUENTE: (Khatsuria, 2005)

Chanson (1994a) propone las siguientes expresiones para determinar el punto de inicio de la auto-aireación en rápidas escalonadas con inclinaciones entre $6.8^\circ \leq \alpha \leq 59^\circ$:

$$\frac{L_i}{h \cos \alpha} = 9.719 (\sin \alpha)^{0.0796} Fr^*{}^{0.712} \quad (2-7)$$

$$\frac{Y_i}{h \cos \alpha} = 0.4034 \frac{Fr^*{}^{0.592}}{(\sin \alpha)^{0.04}} \quad (2-8)$$

$$Fr^* = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \alpha (h \cos \alpha)^3}} \quad (2-9)$$

Por otra parte, Meireles et al. (2012) propone para una rápida escalonada con un ángulo $\alpha = 53^\circ$:

$$\frac{L_i}{k_s} = 6.75 Fr_r^*{}^{0.76} \quad (2-10)$$

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.35 Fr_r^*{}^{0.59} \quad (2-11)$$

Donde:

- α : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada en grados
- h : Altura del escalón (contrahuella) (m).
- y_i : Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación (m).
- F_r^* : Número de Froude rugoso
- k_s : Rugosidad de forma (m).
- q_w : Caudal unitario (m^2/s).
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).
- L_i : Distancia medida desde el ingreso a la rápida hasta el inicio de introducción y arrastre de aire (m).

- Profundidad de agua clara Y_w , *Altura Característica* Y_{90}

Para definir la profundidad del flujo bifásico Y_{90} que es la distancia ortogonal medida desde el fondo del canal hasta la superficie libre cuando la concentración de aire C es igual al 90%, es necesario definir la profundidad de agua clara Y_w , que es la distancia ortogonal al fondo del canal que al ser multiplicada por la velocidad media del agua clara V_w da como resultado el caudal unitario (q_w) (Naudascher, 2002).

$$y_w = \int_0^{y_{90}} (1 - C) dy \quad (2-12)$$

Al integrar esta ecuación hasta y_{90} , y al definir C como la concentración media de aire en el calado, la expresión resultante es:

$$y_w = (1 - C_m) \cdot y_{90} \quad (2-13)$$

Boes y Hager (2003a) proponen la siguiente expresión para calcular la profundidad del flujo bifásico en flujo uniforme:

$$\frac{y_{90}}{y_c} = 0.215 (\sin \alpha)^{-1/3} \quad (2-14)$$

Donde:

α : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada.

y_c : Profundidad crítica (m).

y_{90} : Profundidad del flujo mixto uniforme correspondiente al 90% de concentración de aire (m).

y_w : Profundidad de agua clara (m).

C : Concentración de aire

C_m : Concentración media de aire

- *Altura de Paredes Laterales*

Las paredes laterales forman parte de la estructura de una rápida escalonada y cumplen la función de evitar el desbordamiento del flujo circulante. Su diseño puede ser ejecutado una vez se conozca el calado característico del flujo uniforme (Y_{90}) para el caudal de diseño. La expresión para su cálculo es la siguiente:

$$H_{pared} = \eta \cdot y_{90} \quad (2-15)$$

Donde:

η : Coeficiente de seguridad ($\eta = 1.2$ para presas de hormigón y $\eta = 1.5$ para presas de materiales sueltos).

y_{90} : Calado del flujo bifásico en flujo uniforme.

2.1.1. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO RASANTE

Cuando se tienen pendientes pronunciadas, es más eficiente diseñar rápidas escalonadas para flujo rasante debido a que permite obtener una mayor disipación de energía comparada con las rápidas lisas (Amador, 2005b). Por esta razón, es importante estudiar las características hidráulicas que relacionan el flujo rasante con la disipación de energía.

2.1.1.1. CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE EN EL FLUJO

A través de prototipos y observaciones en laboratorio se ha podido resaltar la alta aireación en el flujo de una rápida escalonada. A partir del punto de inicio de la auto aireación, que es el punto en el cuál la zona superior de la capa límite alcanza la superficie libre y la turbulencia genera el inicio de la aireación natural del flujo, comienza la inserción de aire en el flujo y esta va incrementando aguas abajo hasta llegar al flujo uniforme (Amador, 2005b).

El estudio de la aireación radica en la prevención de cavitación, pues se ha demostrado que una de las ventajas de la aireación es controlar la cavitación incluso para altos caudales unitarios, como también en la importancia de determinar la altura del flujo bifásico para establecer la altura necesaria de las paredes laterales de la rápida escalonada y evitar el desbordamiento del flujo o sus salpicaduras. En el flujo rasante, la zona superior es no aireada hasta llegar al punto de inicio de aireación, después del cual el flujo se convierte en rápidamente aireado (Chanson, 2015).

Un concepto importante dentro del estudio del flujo bifásico agua-aire es la concentración de aire (C), se define como el volumen de aire no disuelto dentro del flujo auto-aireado, la expresión para calcular la concentración media de aire (C_m) es la siguiente:

$$C_m = \int_0^{y_{90}} C \cdot dy \quad (2-16)$$

Varios investigadores proponen expresiones para el cálculo de la concentración media de aire, entre las principales tenemos:

Hager (1991), propone para inclinaciones entre $30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ en régimen uniforme:

$$C_m = 0.75 (\sin \alpha)^{0.75} \quad (2-17)$$

Chanson (1994a), en flujo uniforme para rápidas escalonadas con inclinaciones entre $6.8^\circ \leq \alpha \leq 59^\circ$ plantea:

$$C_m = 0.8 \operatorname{sen} \alpha \quad (2-18)$$

Matos (1999), propone una ecuación en la cual la concentración media de aire está en función del ángulo de inclinación de la estructura.

$$C_m = 0.76 (\sin \alpha)^{0.82} \quad (2-19)$$

Boes y Hager (2003a), considerando que la concentración media de aire al inicio de la auto-aireación es del 0.01% para pendientes en el rango $26^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$

$$C_m = 1.2 \times 10^{-3} (240^\circ - \alpha) \quad (2-20)$$

Donde:

α : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada.

C_m : Concentración media de aire

2.1.1.2. RESISTENCIA AL MOVIMIENTO

A lo largo de las últimas décadas, varios estudios sobre rápidas escalonadas se han enfocado en determinar la disipación de energía que estas estructuras permiten obtener, para ello es necesaria la inserción del concepto de coeficiente de fricción y definir un proceso para estimar el valor de este actuando sobre la estructura.

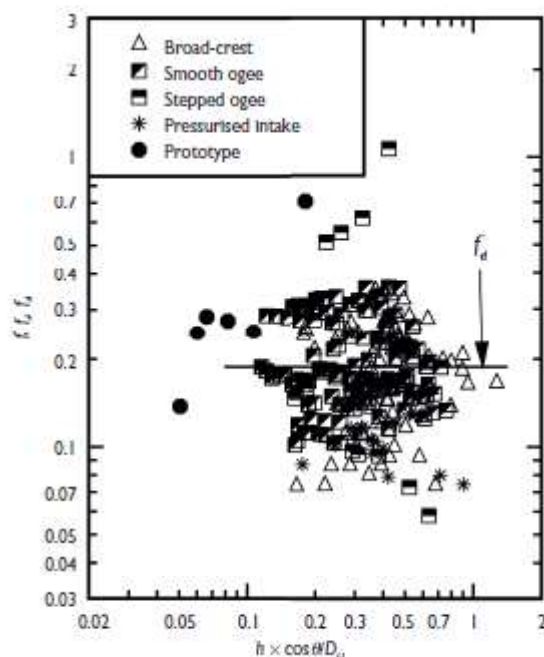
Según Mateos (1994) y Chanson (2000), en flujo rasante la resistencia al movimiento está definida por el flujo secundario existente en la cavidad horizontal formada por las aristas de los escalones y por la transferencia de cantidad de movimiento entre el flujo primario y el secundario. Esta resistencia al movimiento está en función de variables tales como: el ángulo de inclinación de la rápida escalonada y la geometría de los escalones. La longitud de la contrahuella del escalón condiciona la introducción y el arrastre del aire en el flujo (Casa, 2016).

Algunos autores consideran inadecuado el uso de las ecuaciones de Gauckler-Manning o Darcy-Weisbach para calcular las pérdidas de energía en los escalones

debido a que ellos sostienen la predominancia de la resistencia de forma. A pesar de ello, la gran mayoría de los estudios plasmados en la literatura se encuentran basados en la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo del coeficiente de fricción equivalente y la disipación de energía en flujo rasante. Este planteamiento se justifica debido a su sencillez de aplicación para efectos de dimensionamiento de rápidas escalonadas (Amador, 2005b).

Para calcular el valor del factor de fricción equivalente para rápidas escalonadas se han propuesto muchas ecuaciones debido a la complejidad que se presenta al medir ciertas propiedades hidráulicas en el flujo bifásico. Dentro de la literatura se reporta un rango de valores para el coeficiente de fricción equivalente que va desde 0.06 hasta 1.1 (Chanson, 2015).

Figura No. 2.11: Factores de Fricción.



FUENTE: (Chanson, 2015)

El coeficiente de Darcy-Weisbach o también conocido como coeficiente de fricción equivalente (f_e) en la región uniforme, está definido por la siguiente expresión:

$$f_e = \frac{8g \left(\int_{y=0}^{y=y_{90}} (1 - C) dy \right) S_f}{\bar{U}^2} \quad (2-21)$$

Dónde:

C: Concentración de aire

Y_{90} : Altura característica del flujo en el punto donde la concentración de aire es 90% (m).

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

S_f : Pendiente motriz

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

El f_e considerado para representar canales anchos y aceptado para determinar disipación de energía en flujo uniforme, está dado por:

$$f_e = \frac{8 * g * Y_w^2 * Y_w * S_f}{q_w^2} \quad (2-22)$$

Para condiciones de flujo uniforme, la pendiente de la línea de energía S_f es igual a la pendiente del fondo ($\text{sen } \alpha$), entonces:

$$f_e = \frac{8 * g * Y_w^3 * \text{sen } \alpha}{q_w^2} \quad (2-23)$$

Dónde:

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

Y_w : Profundidad de agua clara (m).

S_f : Pendiente de la línea de energía

q_w : Caudal unitario (m^2/s).

Entre las expresiones más relevantes, propuestas por los investigadores para definir el factor de fricción, tenemos:

Chanson (1994), en flujo uniforme para rápidas escalonadas con inclinaciones entre $6.8^\circ \leq \alpha \leq 59^\circ$ propone:

$$f_e = 0.5 f \left(1 + \tanh \left(0.628 \times \frac{0.514 - C_m}{C_m(1 - C_m)} \right) \right) \quad (2-24)$$

$$C_m = 0.8 \sin \alpha$$

Chinnarasri (2002), para inclinaciones en el rango $15^\circ \leq \alpha \leq 59^\circ$ y para los valores de $0.1 \leq \left(\frac{k_s}{y_w} \right) \leq 2.1$ plantea:

$$\frac{1}{\sqrt{f_e}} = 2.0 + 1.19 \log \frac{y_w}{k_s} \quad (2-25)$$

Donde:

- f_e : Factor de fricción para flujo rasante uniforme
- y_w : Profundidad de agua clara (m).
- k_s : Rugosidad de forma (m).
- C_m : Concentración media de aire
- α : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada.

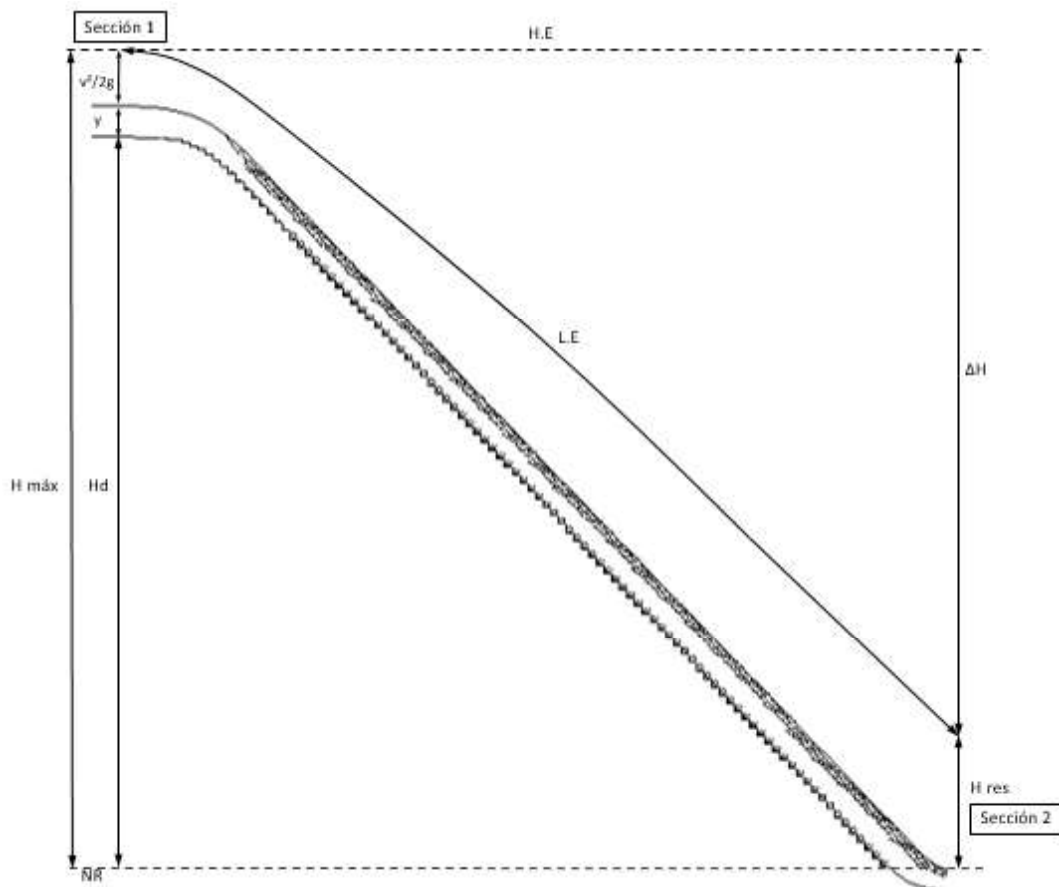
2.1.1.3. DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Estimar la disipación de la energía es esencial durante el diseño de rápidas escalonadas ya que eso nos permite conocer la energía residual al pie de la estructura y con ello diseñar la estructura adicional de disipación de energía; generalmente un cuenco disipador. Comparando con una rápida lisa, la energía residual es menor al pie de una rápida escalonada, sin embargo usualmente es necesario el diseño de estructuras adicionales de disipación al pie de la estructura, con la ventaja de que al tener menos energía residual las dimensiones de la estructura adicional de disipación será menor (Chanson, 2015).

En flujo rasante, que usualmente es el régimen de diseño para rápidas escalonadas, la disipación de energía se genera por la recirculación del flujo en los vértices de los escalones, por los vórtices que se desprenden y son arrastrados por el flujo hacia aguas abajo y por la transmisión de momento desde el flujo bifásico

hacia el flujo secundario a través de la fricción con el fondo virtual. La energía disipada (ΔH) se define como la diferencia entre la energía existente en el punto inicial de la cresta de la rápida escalonada y la energía existente al pie de la estructura (Frizell, 2006).

Figura No. 2.12: Esquema de secciones de control para disipación de energía en la rápida escalonada.



FUENTE: (Chanson, 2015)

MODIFICADO POR: Durán & Sánchez

Para un volumen de control considerado entre el inicio de la cresta de la rápida escalonada (Sección 1) y al pie de la estructura (Sección 2), la ecuación de la energía se escribe como:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (2-26)$$

Donde:

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

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

$\frac{V_n^2}{2g}$: Altura cinética (m)

α_n : Coeficiente de Coriolis

Asumiendo distribuciones de presión hidrostática, tal que $\frac{P_1}{\gamma} = Y_1$ y $\frac{P_2}{\gamma} = Y_w \cos \alpha$ (Chow, 1959), la ecuación puede expresarse como:

$$\Delta H = z_1 - z_2 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} - y_w \cos \alpha - \alpha_2 \frac{V_w^2}{2g} \quad (2-27)$$

$$\Delta H = Hd + y_1 + \alpha_1 \frac{q^2}{2gy_1^2} - \left(y_w \cos \alpha + \alpha_2 \frac{q^2}{2gy_w^2} \right) \quad (2-28)$$

$$\Delta H = Hd + y_1 + \alpha_1 \frac{y_c^3}{2y_1^2} - \left(y_w \cos \alpha + \alpha_2 \frac{y_c^3}{2y_w^2} \right) \quad (2-29)$$

$$H_{m\acute{a}x} = H_d + H_1 \quad (2-30)$$

$$H_{m\acute{a}x} = H_d + Y_1 + \alpha_2 \frac{q^2}{2gY_2^2} \quad (2-31)$$

$$H_{res} = Y_w \cos \alpha + \alpha_1 \frac{q^2}{2gY_w^2} \quad (2-32)$$

$$\Delta H = H_{m\acute{a}x} - H_{res} \quad (2-33)$$

En porcentaje:

$$\% \text{ Disipación} = \frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} * 100 \quad (2-34)$$

H_{res} : Energía residual al pie de la rápida escalonada.

ΔH : Energía disipada.

$H_{m\acute{a}x}$: Energía máxima.

- H_d : Energía de posición.
 Y_c : Calado crítico.
 f_e : Coeficiente de fricción equivalente del flujo agua – aire.
 α : Ángulo con respecto al plano horizontal de la rápida escalonada.

Para régimen uniforme en rápidas escalonadas con inclinación entre $6.8^\circ \leq \alpha \leq 59^\circ$, Chanson (1994a) propone:

$$H_{res} = Y_c \left(\left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \right) \quad (2-35)$$

Donde:

- H_{res} : Energía residual al pie de la rápida escalonada.
 Y_c : Calado crítico.
 f_e : Coeficiente de fricción equivalente del flujo agua – aire.
 α : Ángulo con respecto al plano horizontal de la rápida escalonada.

2.1.1.4. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

Las rápidas escalonadas, tener flujo bifásico conformado por aire y agua, presenta la ventaja de una mejor distribución de presiones comparando con una rápida lisa. Sin embargo, con el objetivo de evitar daños a futuro en la estructura es importante realizar un análisis de la variación de la presión en una rápida escalonada y a lo largo de sus escalones.

Diferentes autores han realizado estudios con el fin de caracterizar la variación de presiones en una rápida escalonada, entre ellos; Matos (1999), Sánchez-Juny (2001), Amador (2005), etc. Todos ellos buscan identificar las condiciones bajo las cuales se produzcan presiones bajas que determinen un daño probable por cavitación y presiones altas que puedan afectar la estabilidad de las huellas de los escalones. Inicialmente, a lo largo de la rápida escalonada se identifican dos zonas; la primera presenta mayores presiones medias y fluctuaciones donde el flujo aún no es totalmente aireado, la segunda es la zona completamente aireada, los valores de presiones medias y sus fluctuaciones son menores, sin embargo, se observa

que las presiones cambian alternativamente de un escalón a otro (Sanchez-Juny, 2001).

En los escalones, a lo largo de las huellas se pueden identificar dos zonas de presiones, una de ellas es la cercana a la arista exterior donde la presión está condicionada por el impacto del chorro en la cara horizontal del escalón, los valores máximos se obtienen mientras más cerca al vértice exterior y para caudales mayores. En la otra, la zona interior de la huella, las presiones son gobernadas por el flujo recirculante en la cavidad, en esta zona se observan valores negativos de presión (Sanchez-Juny, 2001).

A lo largo de la contrahuella, en la zona cercana a la arista exterior del escalón, se produce una zona de separación del flujo que puede provocar la presencia de presiones negativas, en cambio en la zona más cercana a la huella, debido al impacto del flujo rotatorio se tienen presiones medias positivas (Sanchez-Juny, 2001).

Para controlar que los valores de presiones negativas no sean lo suficiente importantes para generar cavitación se produce la necesidad de establecer un valor de caudal específico máximo para rápidas escalonadas debido a que ha observado que la diferencia en las presiones actuantes sobre los escalones son mayores al aumentar el caudal (Tozzi, 1992). Amador et al. (2009) al realizar estudios sobre una rápida escalonada con un ángulo de 51.3° , propone limitar la velocidad media sobre la estructura a 15 m/s correspondiente a un caudal específico máximo de $15 \text{ m}^2/\text{s}$.

2.1.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA

2.1.2.1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos en la naturaleza que ocurren dentro del campo de la hidráulica por su complejidad resultan muy difíciles resolverlos, por esta razón se los puede tratar con la aplicación de modelación numérica y técnicas experimentales conocidas como modelación física, cada uno con diferentes simplificaciones (Vergara, 1993).

El desarrollo de la modelación hidráulica ha sido notable, el desarrollo tecnológico en todos los campos de la ciencia ha permitido este desarrollo ya que gracias a esto la obtención de datos a partir de una modelación son más precisos y los resultados obtenidos serán los más cercanos a lo que en la realidad sucede (Herrera, 2004).

La construcción de un modelo tiene como propósito representar un fenómeno físico en este caso un fenómeno hidráulico, con el cual se espera predecir su comportamiento en la realidad, todo esto con el fin de ahorrar tiempo, dinero y obtener una visión más global de lo que sucede en la realidad (Mateos, 2000).

El sistema reducido es lo que se conoce como modelo, frente a la realidad que se designa como prototipo.

2.1.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

Los modelos hidráulicos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Modelos Físicos
- Modelos Numéricos

Modelos Físicos

Son la representación a escala reducida de un sistema llamado prototipo que son estructuras hidráulicas, las cuales conservan una estrecha relación entre si llamada semejanza.

La clasificación de los modelos físicos puede ser:

Respecto a la semejanza geométrica con el prototipo:

- **Similares:** La principal característica de estos modelos es que todas sus longitudes están relacionadas con el prototipo en la misma escala.
- **Distorsionados:** Este tipo de modelos son aquellos que tiene dos diferentes escalas una para las dimensiones longitudinales y otra para las dimensiones de profundidad.
- **Disímiles:** En estos modelos no existe una semejanza física con el prototipo, se ejecutan en un campo físico analógico al hidráulico.

Respecto al tipo de fronteras:

- **Fijos:** Se emplean cuando los parámetros determinantes en los fenómenos que se quiera reproducir son variaciones de nivel y de velocidad.
- **Móviles:** Estos modelos se emplean cuando se quiere hacer un análisis de la mecánica de transporte de sedimentos.

2.1.2.3. EFECTOS DE ESCALA PARA FLUJO BIFÁSICO

Como ya se mencionó anteriormente la semejanza perfecta no existe y se busca una semejanza restringida y es por esta razón que aparecen los efectos de escala, dicho efectos no tienen importancia en el prototipo en cambio en el modelo por la reducción de su tamaño cobran cierta relevancia (Herrera, 2004).

En flujos bifásicos (agua-aire) utilizando la similitud restringida de Froude la capacidad de transporte de aire en el modelo es menor ya que las dimensiones de las burbujas de aire no son reproducidas correctamente en el modelo ya que en el prototipo son proporcionalmente menores (Amador, 2005a).

Diversos estudios realizados llegaron a recomendaciones para que los efectos de escala sean lo más despreciables posibles y tener resultados correctos, a continuación, se presentan las recomendaciones más relevantes:

- Kobus propuso $Re > 10^5$ para minimización de los efectos viscosos.
- Rutschmann (1988) propuso $We > 110$ para que la influencia de la tensión superficial fuera despreciable.
- Wood refiere que la intensidad turbulenta en flujos bifásicos aumenta linealmente con la velocidad media.
- Pegram concluyo que modelos a escala 1:20 pueden representar razonablemente los resultados en prototipo.
- Mateos y Elviro (1999) consideran adecuado utilizar la semejanza de Froude, vigilando únicamente que We fuera suficientemente alto.
- Boes (2000) recomienda valores mínimos del número de $Re > 10^5$ y del número de $We > 100$ para modelar flujos aire-agua.

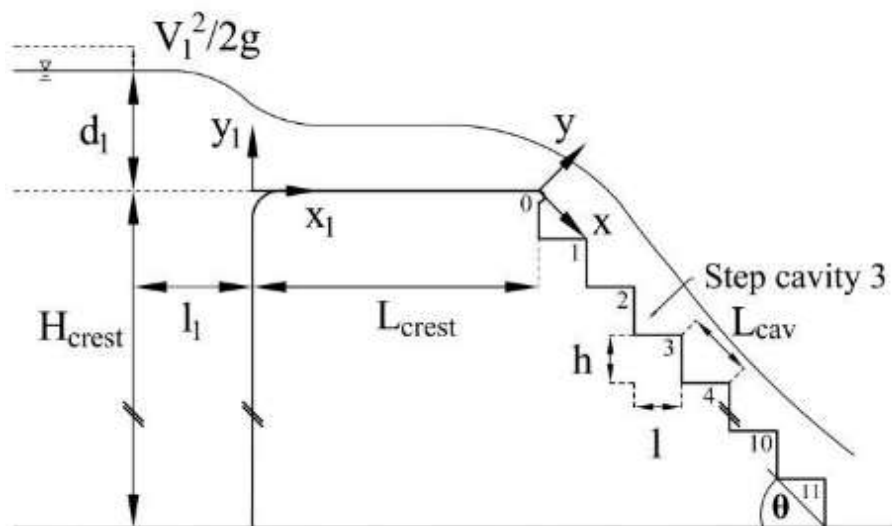
2.2. ESTADO DEL ARTE

2.2.1. MODELACIÓN FÍSICA EN RÁPIDAS ESCALONADAS

El incremento de la construcción de vertederos escalonados ha conllevado a una mayor cantidad de estudios de este tipo de obras para optimizar sus diseños y entender de mejor manera su comportamiento hidráulico. A continuación, se presenta un resumen de los estudios más recientes realizados en modelo físico de este tipo de aliviaderos:

- ***“Inestabilidades en la Superficie Libre en Flujos Bifásicos a Altas Velocidades en Vertederos Escalonados”***, estudio realizado por Kramer y Chanson, presentado en el séptimo simposio internacional de estructuras hidráulicas (ISHS 2018), este estudio fue realizado en modelo de una rápida escalonada de 45° , con flujo de aproximación subcrítico de altura de 1.10 m, el enfoque de este estudio se basa en observar y determinar las variaciones que se dan en la superficie libre del flujo después del punto de inicio de auto aireación, la instrumentación utilizada en este estudio fue el de una cámara de alta velocidad y medidores ADM (Acoustic Displacement Meter). Finalmente se concluye que el perfil de la superficie libre muestra un hinchamiento y un flujo rápidamente variado cerca al punto de auto aireación, además las observaciones realizadas muestran una gran cantidad de gotas y salpicaduras aguas abajo del punto de inicio de auto aireación. La importancia de este estudio para el presente proyecto de titulación es la inclinación de 45° y el caracterizar el comportamiento del flujo en transición y el proceso de salpicadura y goteo intenso característico de este flujo, mismo que afecta la altura de las paredes laterales del vertedero.

Figura No. 2.13: Bosquejo longitudinal del modelo analizado por Kramer y Chanson.

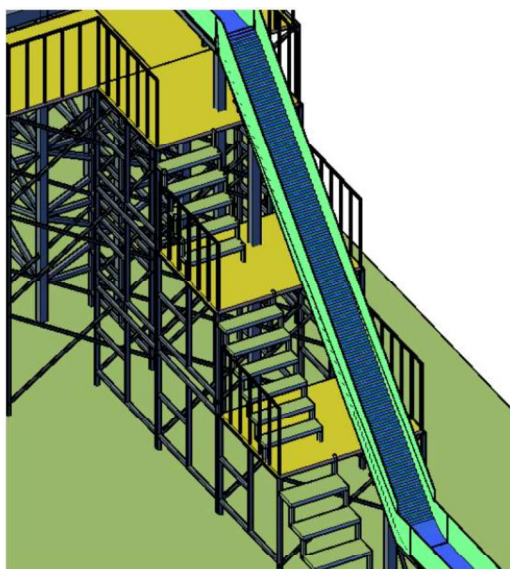


FUENTE: (Kramer y Chanson, 2018)

- **“Estudio Experimental del Flujo Rasante, con la Implementación de Estructuras Adicionales sobre el Perfil Escalonado para Incrementar la Disipación Continua de Energía”**, estudio realizado por Guachamín Katherine y Simbaña Angélica (2018). El estudio fue realizado en una instalación experimental, de una rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45, y un flujo de aproximación subcrítico. El objetivo de este estudio es evaluar la disipación de energía para condiciones de flujo rasante y añadir estructuras adicionales en este caso tabiques en forma triangular y dispuestos en forma de zigzag en cada uno de los escalones, y analizar el comportamiento hidráulico de la rápida. Como conclusión del estudio se pudo determinar que las estructuras adicionales no tuvieron el efecto esperado ya que la disipación de energía fue menor con los tabiques que en la estructura sin tabiques. Esto se da debido a que el ancho efectivo de los vórtices se reduce y produce menor disipación de energía. Lo interesante de este estudio para el presente proyecto de titulación es conocer el comportamiento del flujo en la unión del canal de aproximación con el fondo escalonado y el funcionamiento de la instalación experimental en general ya

que dicha investigación es precedente al presente trabajo de titulación y los dos han sido realizados en la misma instalación experimental con diferentes condiciones de flujo.

Figura No. 2.14: Vista lateral izquierda de la instalación experimental.



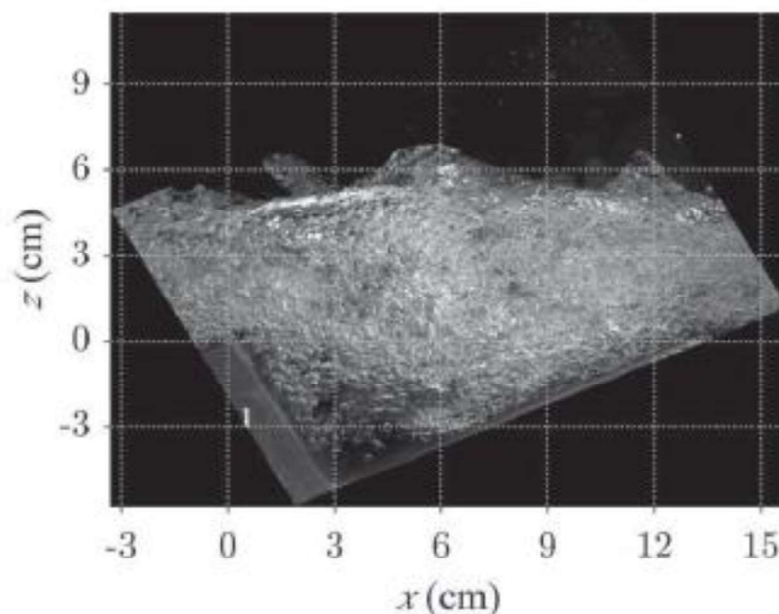
FUENTE: (Guachamín y Simbaña, 2018)

- **“Estimación Óptica en Flujos Aireados”**, estudio realizado por Daniel Bung y Daniel Valero (2016). Fue realizado en una rápida escalonada de 174 cm de alto y 50 cm de ancho, con una altura de peldaño de 6 cm y un ángulo de inclinación de la rápida de 26.6° y canal de aproximación con régimen subcrítico, la instrumentación utilizada en el proyecto fue de una cámara de alta velocidad con el fin de obtener la mayor cantidad de imágenes de alta definición. El objetivo de este estudio es procesar imágenes tomadas en la rápida escalonada con un flujo uniforme para obtener perfiles de velocidad, a partir del uso de las burbujas del flujo como trazador para obtener los perfiles ya que el método se basa en el seguimiento de los píxeles que es el reflejo del brillo de las burbujas. Se llegó a la conclusión que los resultados son válidos siempre y cuando el método aplicado sea el correcto y el número de iteraciones sean las necesarias, ya

que, si el tratamiento que se les da a las imágenes no es el correcto, los resultados no son confiables.

Lo relevante de este estudio para el presente proyecto de titulación es el estudio del comportamiento hidráulico del flujo en una rápida escalonada con instrumentos especializados.

Figura No. 2.15: Frame capturado con una cámara de alta velocidad con 732 Hz en el escalón #21, rotado 26.6° con una resolución de 1600×1200 px.



FUENTE: (Bung y Valero, 2016)

- **“Flujos Aire-Agua y Perfiles de Flujo en un Vertedero Escalonado no Uniforme”** estudio realizado por Felder Stefan y Chanson Hubert (2014). Realizado en dos tipos de vertederos escalonados con flujo de aproximación subcrítico, ambos con un ángulo de inclinación de 26.6° y un ancho de 1 m, con diferentes tipos de configuración, la una con escalones uniformes de 10 cm de altura y 20 cm de huella, la disposición de la segunda rápida es de escalones no uniformes de altura de 10 y 5 cm distribuidos en toda la longitud de la rápida, la instrumentación utilizada para la toma de datos fue una cámara fotográfica para documentar los patrones de flujo además de una sonda intrusiva para la detección de concentración de aire y por ultimo un medidor ADM (Accoustic Displacement Meter). El objeto de este estudio fue

comparar el flujo de aire-agua, concentración de aire, variación de la turbulencia entre las dos configuraciones de escalones. Finalmente, se concluye que entre las dos configuraciones no existe mayor variación entre los datos obtenidos y los cálculos realizados mediante la literatura existente. En la zona aireada de la rápida que contiene los escalones no uniformes e intercalados se observa una cierta inestabilidad del flujo, por ello se recomienda una configuración de la rápida escalonada con una disposición de escalones uniformes.

La importancia de este estudio para el presente trabajo de titulación radica en el análisis de la influencia de la geometría y disposición de escalones en el comportamiento del flujo, pues en la geometría de ingreso al perfil escalonado de nuestra instalación experimental se tienen escalones con medidas variables.

Figura No. 2.16: Vista lateral derecha de la instalación experimental.

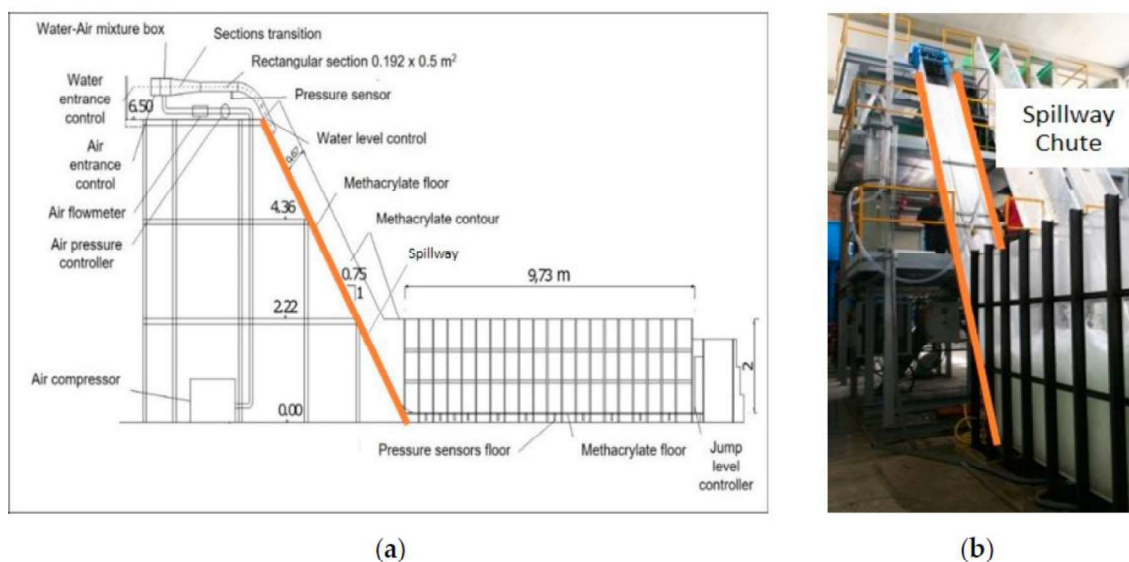


FUENTE: (Felder y Chanson, 2014)

- **“Análisis Experimental de la Influencia de la Aireación en la Disipación de Energía en Canales con Flujo Supercrítico”**, este artículo científico fue escrito por José Rebollo et al. (2019), Madrid, España. El análisis experimental fue realizado sobre un modelo físico de una rápida lisa a escala 1/10 que conecta con un canal de aproximación con flujo supercrítico. Lo relevante de este estudio para el presente proyecto de titulación es la condición de flujo supercrítico de aproximación y la inclinación pronunciada de 53.13° . Finalmente, se concluye que la aireación es la variable de mayor influencia en la disipación de energía en flujos en canales a superficie libre

bajo esas condiciones, pues con el mismo caudal al aumentar la concentración de aire también aumenta la velocidad del flujo y se reduce el coeficiente de fricción.

Figura No. 2.17: (a) Corte longitudinal del modelo. (b) Vista lateral de la rápida lisa.



FUENTE: (Rebollo et al., 2019)

En conclusión, dentro de la revisión bibliográfica se pueden encontrar una amplia variedad de estudios experimentales en rápidas escalonadas con flujo subcrítico, sin embargo, hasta la actualidad no se encuentran estudios sobre rápidas escalonadas realizados con flujo de aproximación en régimen supercrítico. Se han encontrado estudios con régimen supercrítico en canales abiertos, incluso sobre rápidas lisas, pero no se encuentra la aplicación de flujo con este régimen en aproximación a rápidas escalonadas con inclinación de 45°.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

El análisis dimensional es una herramienta matemática que ayuda a la formulación de una relación entre las magnitudes físicas (variables) que intervienen en los fenómenos hidráulicos a ser estudiados en un modelo físico, todo esto con el objetivo que las magnitudes sean manejadas con una lógica matemática y un orden para así facilitar el entendimiento del fenómeno y la correcta ejecución del proceso de investigación (Hidalgo, 2007).

Para el análisis dimensional de la instalación experimental se la dividió en dos zonas la primera la zona no aireada y la segunda la zona aireada, para ambas zonas se consideró las variables que intervienen en el fenómeno hidráulico para obtener la relación entre estas, mediante estas relaciones se pueden plantear ábacos adimensionales.

Según Boes (2000), Takahashi (2006), Felder (2009), Rezapour (2015), Krisnayanti (2017), Takahashi (2017) y Gandhi (2017) en sus estudios realizados en instalaciones experimentales, se obtuvo las siguientes relaciones de los parámetros adimensionales tanto como para la zona aireada y la zona no aireada.

3.1.1. ANÁLISIS DIMENSIONAL ZONA NO AIREADA

Según Boes (2000), Takahashi (2006), Felder (2009), Rezapour (2015), Krisnayanti (2017), Takahashi (2017) y Gandhi (2017), la función de relación entre los parámetros adimensionales es la siguiente:

$$\varphi \left(\frac{L_i}{k_s}, \frac{y_i}{k_s}, \frac{\mu}{q * \rho}, \frac{k_s * \sigma}{q^2 * \rho}, \frac{k_s^3 * g}{q^2} \right) = 0$$

Se eliminan dos parámetros adimensionales, el uno representa las fuerzas viscosas y el otro las fuerzas de tensión superficial, esto es posible debido a que la operación

de la instalación experimental opera bajo la semejanza restringida de Froude y por ende estas fuerzas no tienen un valor preponderante en el fenómeno hidráulico.

La función reducida para la instalación experimental queda de la siguiente manera:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0$$

$$\varphi \left(\frac{L_i}{k_s}, \frac{y_i}{k_s}, \frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right) = 0$$

Mediante la función reducida se obtienen las siguientes relaciones para obtener las siguientes ecuaciones adimensionales que serán graficadas y analizadas más adelante.

$$\frac{L_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right) \quad (3-1)$$

$$\frac{y_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right) \quad (3-2)$$

3.1.2. ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA LA ZONA AIREADA

Según Boes (2000), Takahashi (2006), Felder (2009), Rezapour (2015), Krisnayanti (2017), Takahashi (2017) y Gandhi (2017), la función de relación entre los parámetros adimensionales es la siguiente:

$$\varphi \left(\frac{b}{k_s}, \frac{y_u}{k_s}, C_m, f_e, \frac{E_t}{k_s}, \frac{E_r}{k_s}, \frac{\mu}{q * \rho}, \frac{k_s * \sigma}{q^2 * \rho}, \frac{k_s^3 * g}{q^2} \right) = 0$$

Debido a que la instalación experimental opera bajo la semejanza restringida de Froude se eliminan los parámetros adimensionales que representan las fuerzas viscosas y las fuerzas de tensión superficial.

$$\varphi \left(\frac{b}{k_s}, \frac{y_u}{k_s}, C_m, f_e, \frac{E_t}{k_s}, \frac{E_r}{k_s}, \frac{\mu}{q * \rho}, \frac{k_s * \sigma}{q * \rho}, \frac{k_s^3 * g}{q^2} \right) = 0$$

La función reducida para la instalación experimental quedo de la siguiente manera:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0$$

$$\varphi \left(\frac{b}{k_s}, \frac{y_u}{k_s}, C_m, f_e, \frac{E_t}{k_s}, \frac{E_r}{k_s}, \frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right) = 0$$

Mediante la función reducida se obtienen las siguientes relaciones para obtener las siguientes ecuaciones adimensionales que serán graficadas y analizadas más adelante.

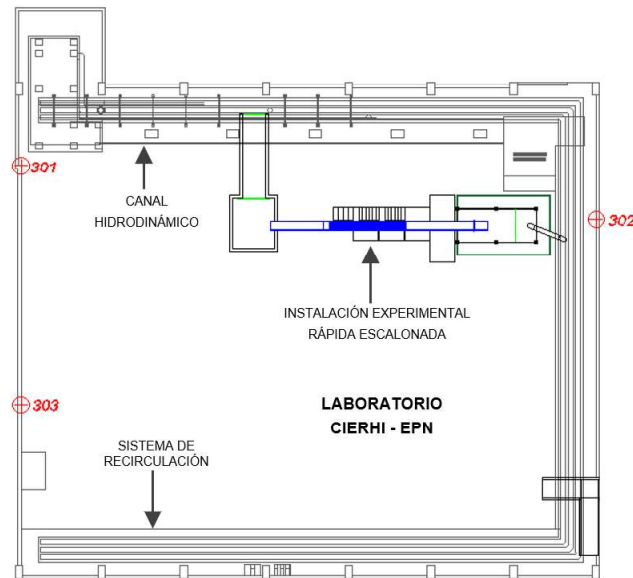
$$\frac{y_u}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right) \quad (3-3)$$

$$\frac{E_t - E_r}{E_t} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right) \quad (3-4)$$

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La construcción y el montaje de la instalación experimental fue realizado en la primera fase del proyecto PIMI-1606, para la segunda fase se ha aprovechado de la misma estructura ejecutando modificaciones geométricas para obtener un flujo de aproximación supercrítico.

Figura No. 3.1: Implantación general de la instalación experimental de la rápida con perfil escalonado en el CIERHI.



FUENTE: PIMI-1606

Fotografía No. 3.1: Instalación experimental de la rápida con perfil escalonado en el laboratorio del CIERHI.



La **Fotografía No. 3.1** muestra la estructura de la Instalación Experimental de la rápida escalonada en el laboratorio del CIERHI, ésta ha sido tomada como la estructura base para la segunda fase del proyecto PIMI-1606, es decir, sobre ella se ejecutaron las modificaciones necesarias para obtener un flujo de aproximación supercrítico y uniforme en la aproximación.

3.2.1.1. GEOMETRÍA INICIAL PARA APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICA

En la segunda etapa del PIMI-1606, para establecer un flujo de aproximación supercrítico se plantea el diseño y construcción de:

- Canal de aproximación
- Compuerta
- Geometría de empate

a) CANAL DE APROXIMACIÓN

La instalación experimental existente constaba de un canal de aproximación para régimen subcrítico, es por esta razón que se diseñó un nuevo canal de aproximación con lo cual se garantice que el flujo de aproximación sea supercrítico que es un objetivo de este proyecto de titulación.

Las consideraciones geométricas del canal para su diseño están dadas por el ancho de este que permanecerá igual que en la primera etapa de la investigación en 51.8 cm, la variante a considerar en esta etapa de la investigación es su cambio de pendiente. Para el diseño del canal de aproximación fueron considerados el caudal mínimo de operación y el caudal máximo de diseño de la instalación experimental los cuales están definidos en el plan de pruebas todo esto se realizó con el fin de evaluar la variación de los límites de los parámetros hidráulicos a lo largo del canal de aproximación.

El diseño del canal de aproximación fue realizado considerando flujo uniforme. Para calcular los parámetros hidráulicos para diferentes pendientes se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach, el valor del factor de fricción se obtuvo mediante la ecuación de Colebrook-White que aplica para flujos turbulentos, siendo esta:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3-5)$$

Dónde:

f : Factor de fricción

ε : Rugosidad absoluta del material de la pared del canal (mm)

Re : Número de Reynolds

D : Longitud característica (m), para canales (4Rh)

A continuación, se presentan los resultados de los cálculos teóricos de los parámetros hidráulicos con el caudal máximo de diseño, el caudal mínimo de la instalación experimental y variando la pendiente del canal de aproximación, mismos que fueron obtenidos con la ayuda del software FlowMaster V8i.

Tabla No. 3.1: Calado normal para diferentes pendientes para caudal de diseño de la instalación.

Q Diseño = 78 l/s										
So	3‰	4‰	5‰	6‰	7‰	8‰	1%	2%	3%	4%
V (m/s)	1.20	1.34	1.46	1.56	1.65	1.73	1.88	2.42	2.79	3.09
Yn (cm)	12.50	11.30	10.30	9.70	9.10	8.70	8.00	6.20	5.40	4.90
Fr	1.08	1.27	1.45	1.6	1.74	1.87	2.12	3.10	3.84	4.47
Re (1E+05)	4.03	4.17	4.27	4.3	4.42	4.48	4.57	4.82	4.95	5.03
Yc (cm)	13.22									
Sc	2.6‰									
Vc (m/s)	1.13									

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Dónde:

So: Pendiente del fondo del canal de aproximación

V: Velocidad (m/s)

Yn: Calado normal (cm)

Fr: Número de Froude

Re (1E+05): Número de Reynolds

Yc: Calado crítico (cm)

Sc: Pendiente crítico

Vc: Velocidad crítica (m/s)

Tabla No. 3.2: Calado normal vs pendientes para el caudal mínimo de operación.

Q Mínimo = 14 l/s										
So	3‰	4‰	5‰	6‰	7‰	8‰	1%	2%	3%	4%
V (m/s)	0.66	0.72	0.80	0.85	0.90	0.94	1.02	1.29	1.48	1.63
Yn (cm)	4.00	3.70	3.40	3.20	3.00	2.90	2.70	2.10	1.80	1.70
Fr	1.06	1.19	1.39	1.53	1.66	1.77	1.99	2.84	3.50	4.06
Re (1E+04)	9.29	9.38	9.50	9.56	9.62	9.66	9.74	9.93	10.0	10.1
Yc (cm)	4.21									
Sc	2.7‰									
Vc (m/s)	0.64									

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Dónde:

So: Pendiente del fondo del canal de aproximación

V: Velocidad (m/s)

Yn: Calado normal (cm)

Fr: Número de Froude

Re (1E+05): Número de Reynolds

Yc: Calado crítico (cm)

Sc: Pendiente crítico

Vc: Velocidad crítica (m/s)

Según la **Tabla No. 3.1** y la **Tabla No. 3.2**, para todo el rango de pendientes con las que se calcularon los parámetros hidráulicos y basados en el número de Froude el régimen de flujo es supercrítico.

La pendiente escogida para el canal de aproximación fue del 2% debido a que, para los valores mayores a esta, en este caso 3% y 4%, al ser evaluados para el caudal mínimo de la instalación, los calados resultantes fueron menores a 2 cm y esto conlleva problemas de efectos de escala con respecto a tensión superficial. Por otro lado, no se escogieron valores de pendiente menores (entre el 3% y el 1%) porque

los valores del número de Froude, calado normal y velocidad son muy cercanos al crítico y la literatura sugiere evitar este tipo de flujos por ser inestables.

El análisis para el diseño del canal de aproximación ha sido realizado para el caudal máximo debido a que este corresponde al caudal de diseño de la instalación experimental, sin embargo, el análisis más relevante ha sido realizado para el caudal mínimo de la instalación experimental para evaluar la influencia de efectos de escala, específicamente para prevenir que los calados correspondientes al caudal mínimo no estén por debajo del rango recomendado por la literatura técnica y así evitar efectos de escala.

b) SECCION DE CONTROL PARA FLUJO SUPERCRÍTICO (COMPUERTA)

Una compuerta es una placa móvil, plana o curva generalmente colocada en un canal para que controle la descarga producida. En esta investigación se colocó aguas arriba para que esta sirva como sección de control y desarrolle un flujo supercrítico de aproximación hacia la rápida escalonada.

Para este caso se tiene una compuerta plana definida por el ancho del canal de aproximación, la función es uniformizar el flujo en el canal para alcanzar régimen supercrítico uniforme variando la apertura de la compuerta para cada uno de los caudales establecidos en el plan de pruebas.

Las aperturas de la compuerta fueron calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{Y_2}{C_c} \quad (3-6)$$

Donde:

Y_2 : Calado aguas abajo de la compuerta (S.I.).

a : Apertura de la compuerta (S.I.).

C_c : Coeficiente de contracción (0.62) (Sotelo, 1997).

Para calcular la longitud L , que representa la distancia a partir de la compuerta, en la que se produce una contracción del flujo hasta alcanzar el calado Y_2 que corresponde al calado normal (Y_n) del flujo en el canal de aproximación.

El cálculo de L fue realizado mediante la siguiente ecuación según (Sotelo, 1997) :

$$L = \frac{a}{C_c} \quad (3-7)$$

Donde:

L : Longitud de desarrollo de la contracción de flujo (S.I.).

a : Apertura de la compuerta (S.I.).

C_c : Coeficiente de contracción (0.62) (Sotelo, 1997).

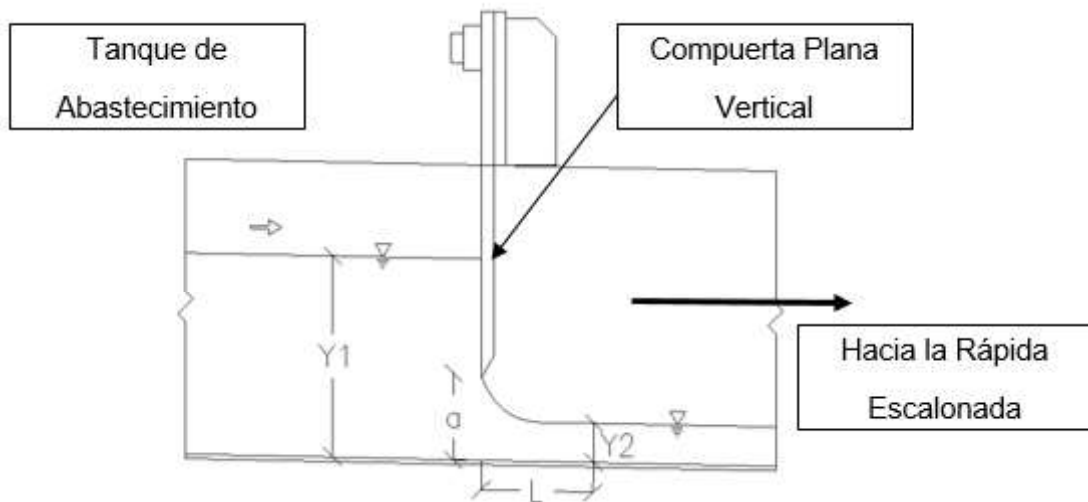
Tabla No. 3.3: Calculo de la apertura de la compuerta y de la longitud de desarrollo de la contracción del flujo para el plan de pruebas definido.

Prueba	Caudal (l/s)	$Y_2 = Y_n$ (cm)	a (cm)	L (cm)
P0	14.00	2.1	3.4	5.5
P1	22.36	2.8	4.5	7.3
P2	34.00	3.7	6.0	9.6
P3	44.72	4.3	7.0	11.3
P4	55.90	5.0	8.0	12.9
P5	77.86	6.2	10.0	16.1

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Según la **Tabla No. 3.3** la longitud L máxima es de 16.1 cm, este valor es mucho menor a la longitud del canal interno de aproximación, lo cual garantiza que la longitud de desarrollo de la contracción en la compuerta no afecte al realizar la toma de datos en el canal de aproximación.

Figura No. 3.2: Esquema de los elementos de la compuerta en la instalación experimental.



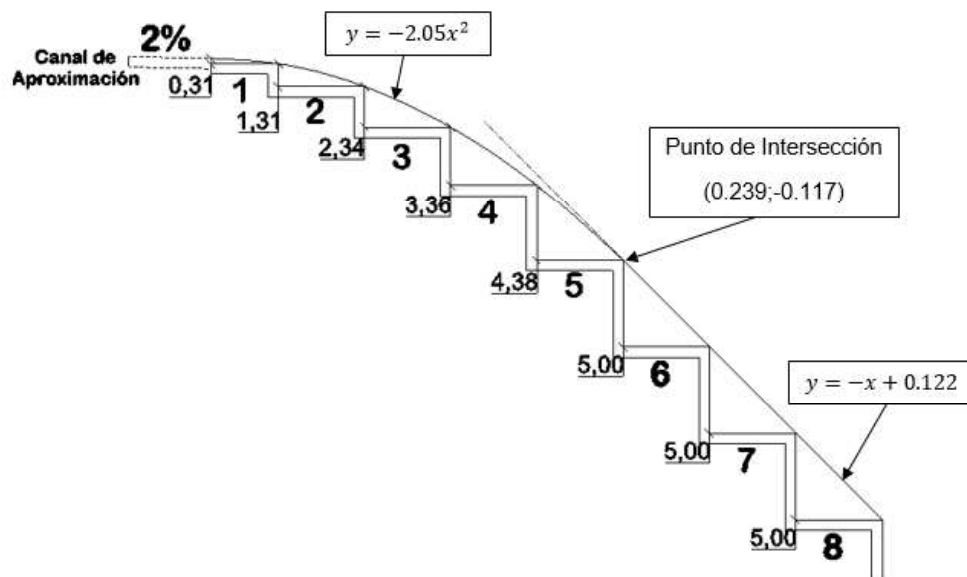
FUENTE: PIMI-1606 / REALIZADO POR: Durán & Sánchez

c) DISEÑO DEL PERFIL ESCALONADO AL INICIO DE LA RÁPIDA

El perfil escalonado se lo construyó a partir de una ecuación parabólica situada al final del canal de aproximación, se trazó una línea recta virtual con una inclinación de 45° tangente a la parábola, se obtuvo el punto de intersección entre las dos curvas y dicho punto es el límite para el desarrollo de la parábola. Esto se hizo para definir la ecuación que va a servir como perfil para la construcción de los primeros escalones de la rápida.

La parábola ajustada define los vértices de los primeros escalones de contrahuella variable y de huella de 5 cm cada uno a excepción del primero que tiene 3.9 cm, esto corresponde a los cinco primeros escalones de la rápida que se ajustan a dicho perfil.

Gráfico No. 3.1: Diseño del inicio del perfil escalonado en la geometría original.

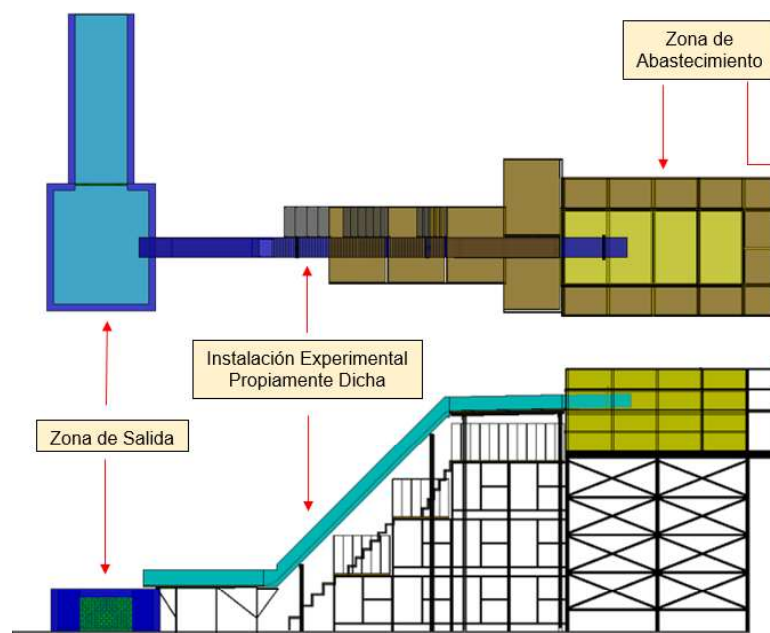


FUENTE: PIMI-1606 / REALIZADO POR: Durán & Sánchez

3.2.2. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental está compuesta por tres zonas: la zona de entrada, la instalación experimental propiamente dicha y la zona de salida.

Figura No. 3.3: Esquema de las zonas de la instalación experimental.



FUENTE: PIMI-1606

3.2.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ENTRADA

Esta es la zona inicial de la instalación experimental, se encuentra compuesta por una línea o tubería de abastecimiento y un tanque elevado con estructuras de uniformización que reciben el flujo desde la tubería de abastecimiento y tienen como función entregar el flujo de forma estable y adecuada para que sea distribuido uniformemente al canal de aproximación de la rápida cumpliendo el rango de caudales definido en el plan de pruebas.

Fotografía No. 3.2: Tanque de abastecimiento, tubería de ingreso y accesorios.



FUENTE: PIMI-1606

a) SISTEMA DE TUBERÍAS

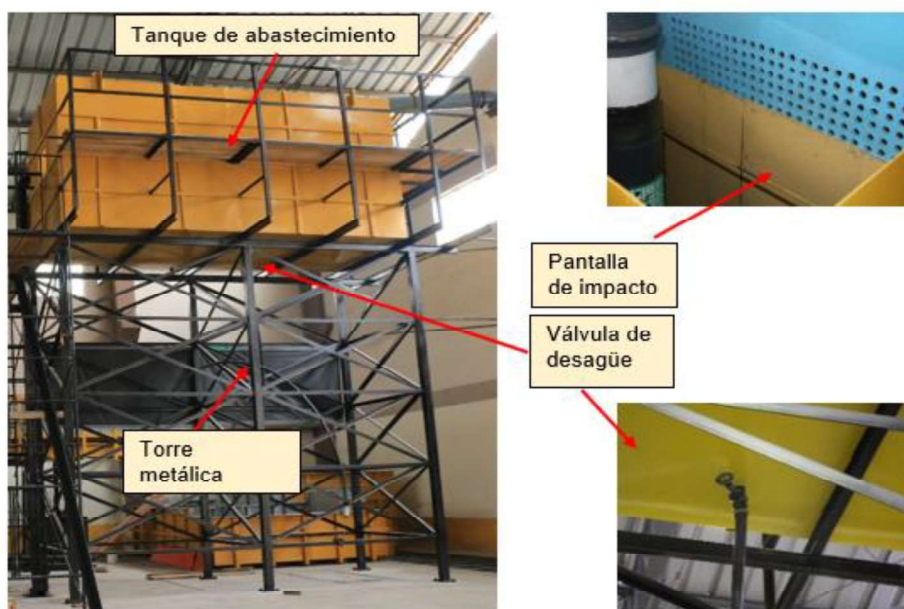
El flujo es entregado hacia el tanque de abastecimiento a través de una tubería de PVC – Presión de 250 mm de diámetro interno, la función de esta línea de alimentación es proveer del flujo de manera continua hacia el tanque de abastecimiento de la Instalación Experimental, el caudal entregado es captado a través de una derivación desde la línea principal de recirculación del laboratorio del CIERHI, este caudal es regulado por una válvula tipo mariposa ubicada al inicio de la línea de abastecimiento. El tramo final de la tubería cuenta con una superficie perforada de 1.2 (m) de longitud construida para uniformizar el flujo entregado en el tanque de abastecimiento, esta sección se ubica en dirección vertical descendente dentro del volumen del tanque.

b) TANQUE DE ABASTECIMIENTO Y UNIFORMIZACIÓN

Es una estructura de acero con capacidad máxima de 21 (m³), se encuentra ubicado a 4.60 (m) sobre el nivel del suelo soportado sobre una torre elevada de 6 columnas de acero laminado en frío. Sus dimensiones son: 4.80 (m) de largo, 2.0 (m) de ancho y 2.15 (m) de altura. Ha sido ubicado para que el largo quede en dirección del flujo con el objetivo de tener una mayor longitud de uniformización previo al ingreso del flujo hacia el canal de aproximación de la rápida escalonada.

La primera estructura de uniformización es una pantalla formada por un tablero de triplex pintado y sellado con esmalte sintético de 2.0 x 2.40 (m) ubicada dentro del tanque para uniformizar el flujo que sale de la tubería perforada de alimentación disipando energía mediante el impacto del flujo con la pantalla. La segunda es una compuerta de acrílico ubicada dentro del canal de aproximación interno a 1.80 (m) antes del inicio del canal de aproximación externo y cumple la función de regulación y uniformización del flujo captado para recorrer la Instalación Experimental.

Fotografía No. 3.3: Tanque de abastecimiento y estructura de soporte.



FUENTE: PIMI-1606

3.2.2.2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PROPIAMENTE DICHA

Se ha implementado la instalación experimental que actualmente se dispone en el CIERHI, que corresponde a la estructura de descarga con rugosidad artificial

uniformemente distribuida, sobre la cual se han ejecutado las modificaciones necesarias para alcanzar las condiciones de flujo solicitadas en el canal de aproximación, en su tramo inicial.

a) CONSTRUCCIÓN DEL CANAL DE APROXIMACIÓN

El canal de aproximación a la rápida escalonada está compuesto por dos tramos, mismos que están distribuidos de la siguiente manera: (a) un tramo de aproximación interno al tanque de abastecimiento de 1.80 m y (b) un segundo tramo de aproximación externo al tanque de 3.09 m que dirige el flujo hacia la rápida.

Tabla No. 3.4: Dimensiones geométricas del canal de aproximación.

CANAL DE APROXIMACIÓN		
Parámetro	Dimensión	Unidad
Longitud	4.89	m
Altura de paredes	0.40	m
Pendiente de fondo	2	%

FUENTE: PIMI-1606 / ELABORADO POR: Durán & Sánchez

- Tramo de Aproximación en el Interior del Tanque de Abastecimiento

El canal de aproximación comienza con un tramo tipo túnel construido dentro del tanque de abastecimiento, posee una longitud de 1.8 (m) y una pendiente del 2%.

Fotografía No. 3.4: Colocación del canal de aproximación 1.8 (m) ubicado dentro del tanque de abastecimiento.



Fotografía No. 3.5: Impermeabilización de la tapa en el canal de aproximación (1.80 m) construido en acrílico, ubicado en el tanque de abastecimiento.



- ***Tramo de Aproximación en el Exterior del Tanque de Abastecimiento***

El segundo tramo del canal de aproximación es el externo, mismo que se extiende desde el empate con el canal interno hasta el inicio de la rápida escalonada propiamente dicha; está hecho de acrílico y tiene una pendiente del 2%. Este tramo permite el paso del flujo desde el tanque de abastecimiento hacia la rápida escalonada con un régimen supercrítico.

Fotografía No. 3.6: Instalación del tramo externo del canal de aproximación, con una pendiente de 2% para garantizar un flujo supercrítico.



Fotografía No. 3.7: Empate del canal de aproximación con la rápida escalonada.



Fotografía No. 3.8: Perspectiva del canal de aproximación en la instalación de la rápida escalonada para un flujo supercrítico con geometría original.



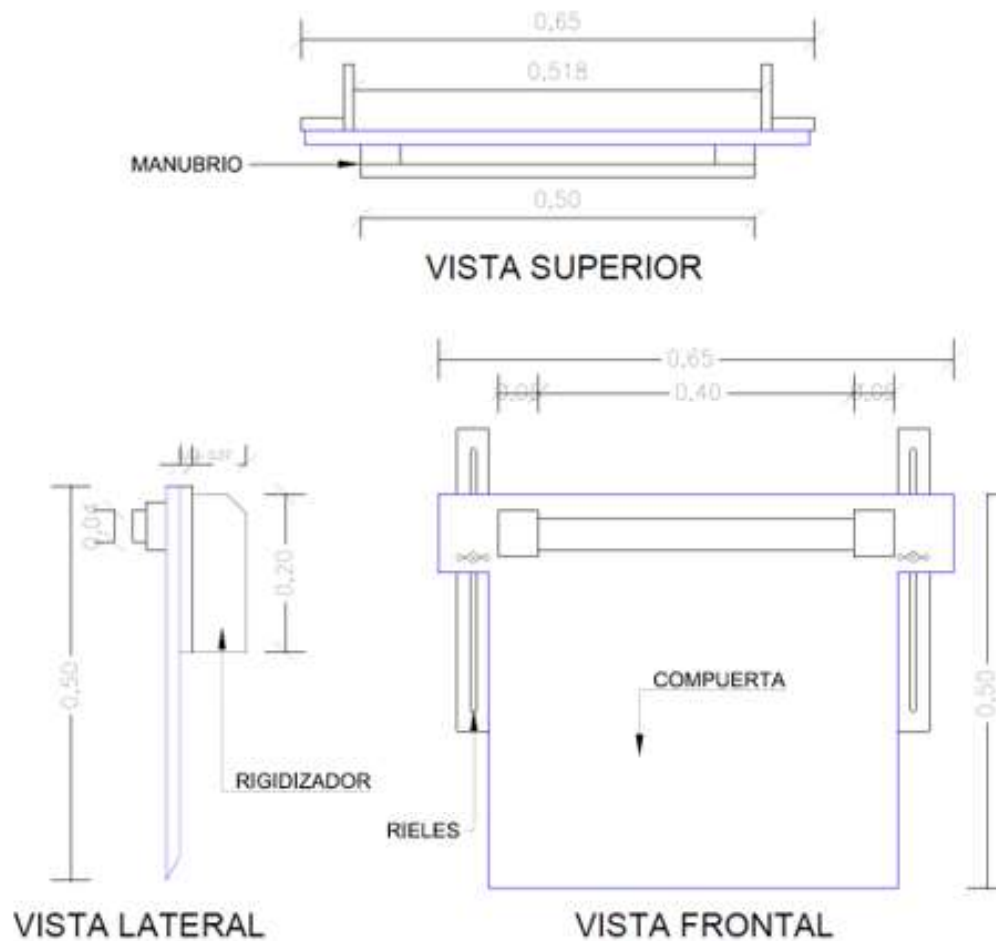
b) CONSTRUCCIÓN DE LA COMPUERTA

A la distancia de 0.8 (m) desde el inicio del canal de aproximación, se implementó una compuerta de acrílico que cumple la función de regular y uniformizar el flujo a lo largo del canal de aproximación. En la **Figura No. 3.4** se observan las dimensiones más importantes de la compuerta.

Fotografía No. 3.9: Construcción de la compuerta a ser ubicada en el tramo interno del canal de aproximación del tanque de abastecimiento.



Figura No. 3.4: Esquema de la sección de control para flujo supercrítico (Compuerta).



FUENTE: PIMI-1606 / ELABORADO POR: Durán & Sánchez

Fotografía No. 3.10: Compuerta ubicada a 0.80 m del inicio del tramo interno del canal de aproximación del tanque de abastecimiento.



3) DESCRIPCIÓN DE LA RÁPIDA ESCALONADA

La rápida escalonada tiene una inclinación de 45° con respecto a la horizontal, está conformada por 92 escalones de los cuales los primeros 6 escalones poseen contrahuellas de dimensión variable con la finalidad de tener un empate que simule la forma de un cimacio curvo próximo al canal de aproximación, intentando de esta manera tener un flujo que descienda rasante a los vértices de los escalones. Los 86 escalones siguientes tienen una dimensión constante de 5 cm de huella y 5 cm de contrahuella. La estructura de la rápida escalonada fue hecha en acrílico, dispuesta sobre un soporte de madera y columnas de acero ancladas mediante pernos a la losa del piso del laboratorio.

Fotografía No. 3.11: Vista en perspectiva de la sección escalonada de la rápida en la instalación experimental.



Tabla No. 3.5: Dimensiones geométricas de la rápida escalonada.

RÁPIDA ESCALONADA		
Parámetro	Dimensión	Unidad
Longitud horizontal	4.64	m
Longitud vertical	4.52	m
Altura total de instalación	7.00	m
Ancho	0.518	m
Altura de paredes	0.38	m
Huella de escalones	0.05	m
Contrahuella de escalones	0.05	m
Angulo de inclinación	45	°

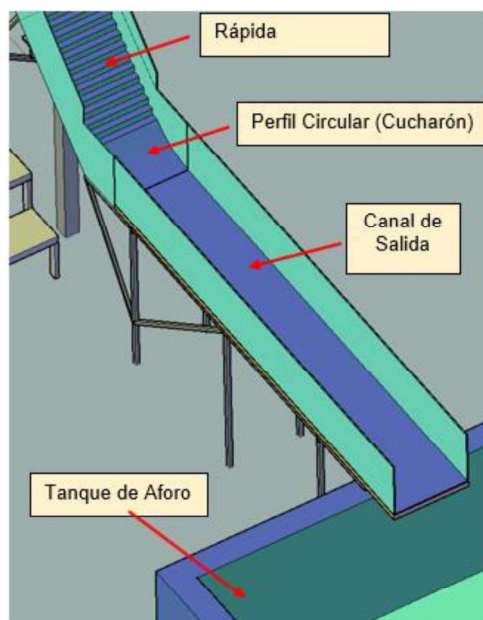
FUENTE: PIMI-1606 / ELABORADO POR: Durán & Sánchez

4) DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE SALIDA DEL FLUJO

La estructura para la salida del flujo tiene como función recibir el flujo que ha recorrido la rápida escalonada y conducirlo hacia un tanque de aforo que permita la estimación del caudal y el reingreso del flujo al sistema de recirculación del laboratorio del CIERHI. Su primer elemento es un perfil circular de 0.5 m de diámetro (cucharón) que se ubica a continuación del último escalón de la rápida escalonada propiamente dicha; posteriormente se ubica un canal de salida que

permitirá la conducción del flujo hacia el tanque de descarga. Estos elementos de la estructura de entrega fueron elaborados en acrílico transparente.

Figura No. 3.5: Esquema tridimensional del canal de la salida al pie de la rápida.



FUENTE: PIMI-1606

Fotografía No. 3.12: Canal de salida al final de la rápida escalonada.



Tabla No. 3.6: Dimensiones geométricas del canal de salida.

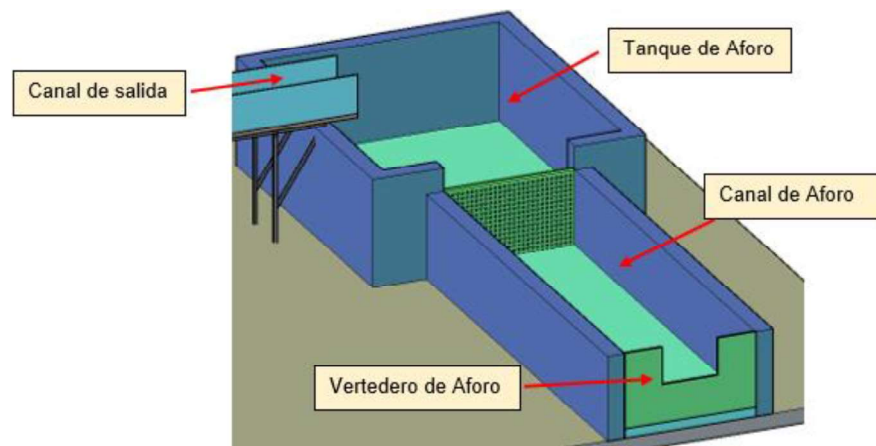
CANAL DE SALIDA		
Parámetro	Dimensión	Unidad
Longitud	3.20	m
Ancho interno	0.518	m
Altura de paredes	0.40	m
Pendiente de fondo	0.40	%

FUENTE: PIMI-1606

3.2.2.3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE SALIDA

Las estructuras que conforman esta zona tienen por función el recibir el caudal descargado desde la instalación experimental, disipar su energía, uniformizarlo, aforarlo y finalmente restituirlo al sistema de recirculación del CIERHI. Las estructuras que la componen son: (a) tanque de aforo para la amortiguación de energía y (b) canal de aforo.

Figura No. 3.6: Esquema en vista tridimensional del tanque de aforo al pie de la rápida.



FUENTE: PIMI-1606 / ELABORADO POR: Durán & Sánchez

a) TANQUE DE AFORO

Su función es recibir el flujo que es descargado desde el canal de salida, disipar su energía y uniformizar el flujo. Ha sido construido sobre una losa de cimentación de 0.10 (m) de espesor y sus paredes son de ladrillo enlucido con un mortero impermeabilizante y un acabado externo e interno con pintura tipo esmalte sintético. Su forma es rectangular y sus medidas son de 3.40 x 2.50 (m) con una altura de 1.15 (m).

A la salida del tanque se han implementado pantallas de uniformización que permiten estabilizar el flujo al ingreso del canal de aforo.

Fotografía No. 3.13: Tanque de aforo y pantallas de uniformización del flujo.

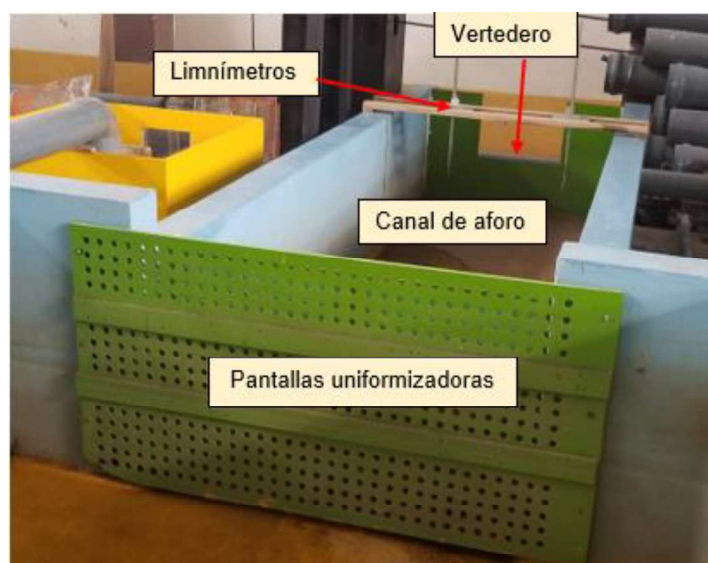


FUENTE: PIMI-1606

b) CANAL DE AFORO

Su construcción se ejecutó con los mismos materiales que el tanque de aforo, siendo sus dimensiones 4.50 x 1.40 (m) con una altura de 0.90 (m). Su función es recibir el flujo con su energía ya disipada en el tanque de aforo y uniformizado por las pantallas, de tal manera que se pueda estimar el caudal circulante mediante una correcta medición del calado por encima del vértice inferior del vertedero rectangular con doble contracción de pared delgada, mediante el uso de limnímetros.

Fotografía No. 3.14: Canal de aforo, pantalla uniformizadora y vertedero.

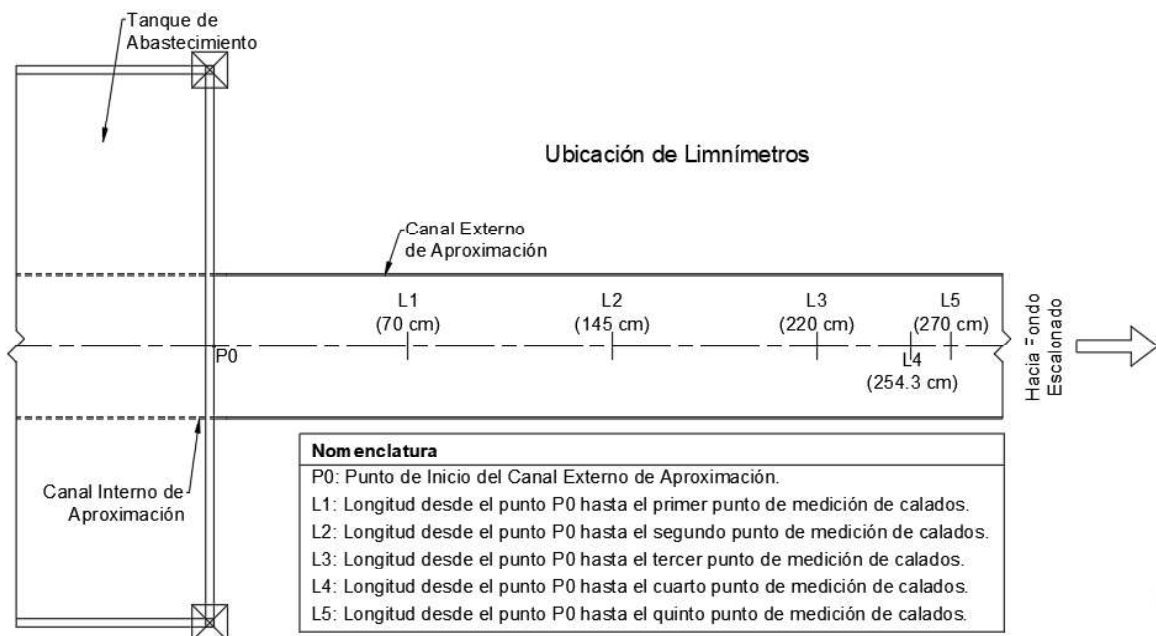


FUENTE: PIMI-1606

3.2.3. INSTRUMENTOS DE MEDIDA USADOS EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

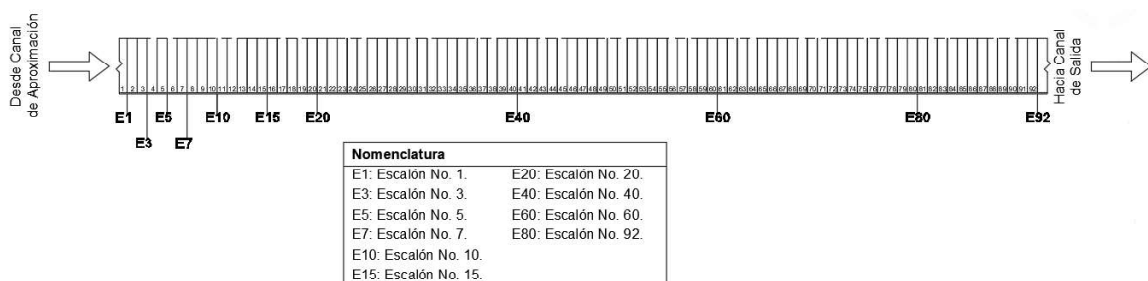
El uso de instrumentos de medición en la instalación experimental es necesario para la estimación de los parámetros hidráulicos involucrados en los fenómenos estudiados. La instrumentación más importante es: vertedero de pared delgada, limnímetros, cintas métricas, nivel topográfico, estación total, probetas, piezómetros, nonios, distanciómetros y videocámara semiprofesional.

Figura No. 3.7: Esquema de ubicación de los puntos de medición de calados en el canal de aproximación.



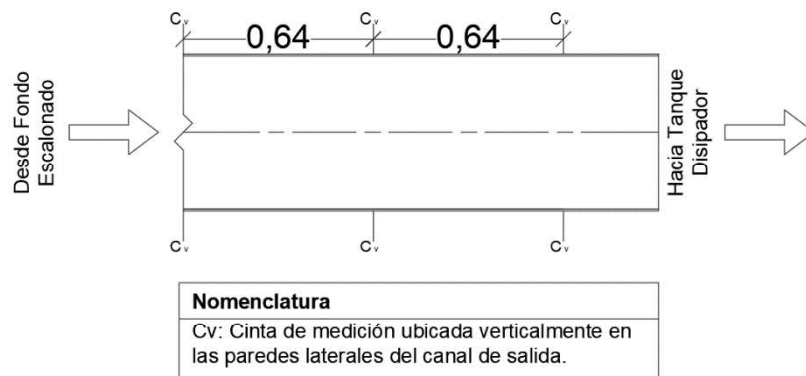
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Figura No. 3.8: Esquema de ubicación de los puntos de medición de calados en el fondo escalonado.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Figura No. 3.9: Esquema de ubicación de los puntos de medición de calados en el canal de salida.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

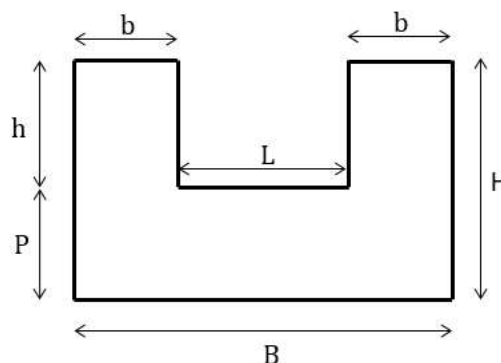
3.2.3.1. VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA CON CONTRACCIONES LATERALES

Para el aforo o estimación de caudales se instaló al final del canal de aforo un vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales, cuyo dimensionamiento se lo realizó en función del ancho del canal de aforo, así como del caudal máximo de diseño de la instalación experimental.

El vertedero 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 a 45° , garantizando así su funcionamiento como vertedero de pared delgada.

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

Figura No. 3.10: Esquema del vertedero rectangular.



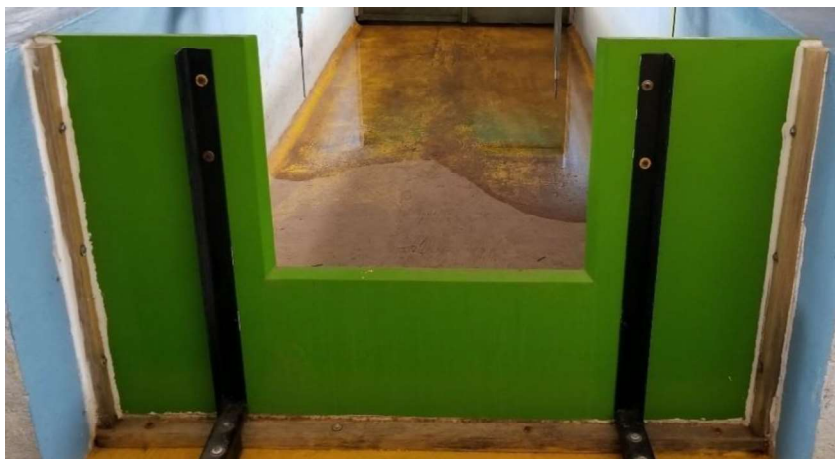
FUENTE: PIMI-1606 / ELABORADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 3.7: Dimensiones geométricas del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales.

PARÁMETRO	DIMENSIÓN	UNIDAD
H	0.80	m
B	1.40	m
L	0.60	m
b	0.40	m
h	0.40	m
P	0.40	m

FUENTE: PIMI-1606 / ELABORADO POR: Durán & Sánchez

Fotografía No. 3.15: Vertedero rectangular para el aforo del caudal de aforo de la instalación experimental de la rápida escalonada.



FUENTE: PIMI-1606

La curva de descarga de este vertedero fue obtenida en la primera etapa del proyecto PIMI-16-06, el proceso se describe en los registros del Informe de Construcción y Resultados (T1-PIMI-16-06), dando como resultado la siguiente ecuación:

$$Q = 1,1885 * h^{1,4557} \quad (3-8)$$

Donde:

Q : Caudal que circula por el vertedero (l/s)

h : Carga sobre la cresta del vertedero (cm)

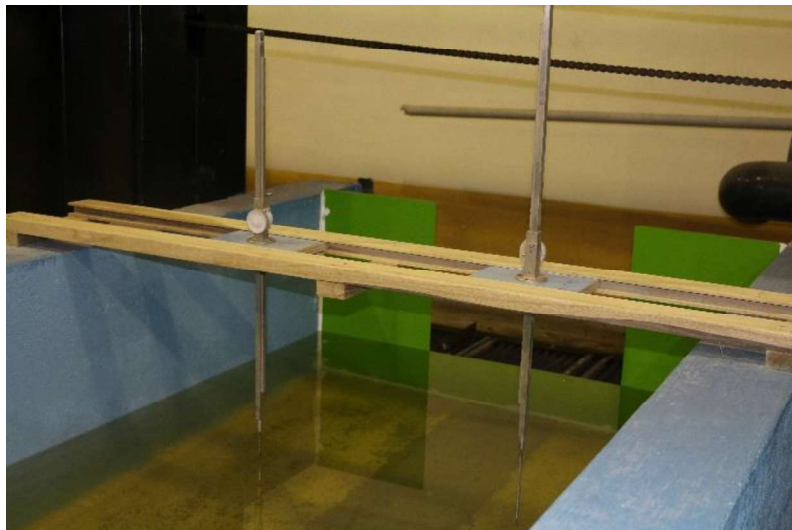
3.2.3.2. LIMNÍMETRO

Es un instrumento utilizado para medir la variación de los niveles de la superficie del agua en el canal de aforo, con un rango de variación de 0 a 600 mm y precisión de 0.1 mm.

En la instalación experimental se utilizó limnómetros móviles para la medición de los calados en los puntos de mayor importancia, haciendo posible la generación de perfiles de flujo para cada caudal del plan de pruebas y los posteriores cálculos de los parámetros hidráulicos más importantes.

En el canal de aforo se instalaron dos limnómetros móviles a lo ancho, a una distancia mínima de cuatro veces la carga de operación del vertedero (con el fin de cumplir la norma establecida), con el fin de calcular los caudales en cada prueba a partir de la altura de la carga sobre el vértice del vertedero de pared delgada, usando la ecuación de la curva de descarga del vertedero.

Fotografía No. 3.16: Limnómetro instalado en el canal de aforo de la instalación experimental de la rápida escalonada.



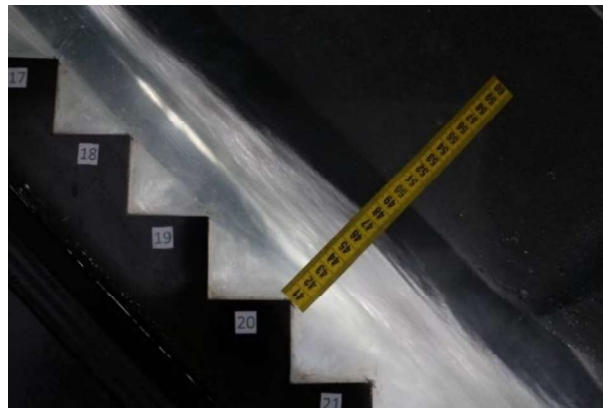
FUENTE: PIMI-1606

3.2.3.3. CINTAS MÉTRICAS

Cintas plásticas graduadas con una precisión de 1 mm, colocadas en las abscisas de mayor importancia de la instalación experimental, para conocer los calados en cada prueba. Se colocaron cintas métricas con la siguiente distribución:

- Canal de aproximación: 5 cintas distribuidas uniformemente
- Rápida escalonada: 4 cintas ubicadas en los escalones No. 20, 40, 60 y 80.
- Canal de salida: 5 cintas distribuidas uniformemente a lo largo del canal.

Fotografía No. 3.17: Cinta métrica ubicada en la rápida escalonada.



3.2.3.4. NIVEL Y ESTACIÓN TOTAL

Los equipos topográficos con los que cuenta el CIERHI son: una estación total (marca Topcon) de precisión 2 segundos y un nivel topográfico (marca Wild Heerbrugg Switzerland) de 1 mm de precisión en nivel; estos fueron utilizados para el replanteo y montaje de los componentes de la instalación experimental; además del posterior proceso de verificación de ejes, puntos vértices, niveles y pendientes.

Fotografía No. 3.18: Estación total (marca Topcon).



Fotografía No. 3.19: Nivel topográfico (marca Wild Heerbrugg Switzerland).



3.2.3.5. PROBETA

Es un recipiente plástico con graduación utilizado para mediciones de volumen. La capacidad de la probeta utilizada en este proyecto es de 1 litro y precisión de 1 mm (1 decilitro en volumen).

Fotografía No. 3.20: Probeta graduada de plástico.



Fotografía No. 3.21: Calibrador pie de rey o nonio, utilizado para la medición de las huellas y contrahuellas de los escalones en la instalación experimental.



Fotografía No. 3.22: Distanciómetro o medidor láser utilizado para la medición de las longitudes de los escalones en la instalación experimental.



3.3. CAUDALES SELECCIONADOS PARA EL PLAN DE PRUEBAS

Según la literatura técnica, para calcular el caudal mínimo de operación que garantiza la formación de flujo rasante se obtiene el calado crítico con la siguiente ecuación: (Chanson, 2015).

$$\frac{y_c}{h} = \frac{0.881}{\left(\frac{h}{l} + 0.149\right)^{0.317}} \quad (3-9)$$

Donde:

y_c : Profundidad crítica mínima (cm)

h : Altura del escalón (cm)

l : Longitud del escalón (cm)

Para el caso de estudio en la instalación experimental, los valores de huella y contrahuella en el fondo escalonado que corresponden a 5 cm, se obtiene una profundidad crítica mínima de 4.2 cm.

Por definición se sabe que:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 * g}} \quad (3-10)$$

Despejando de la ecuación se tiene que:

$$Q_{min} = \sqrt{g * B^2 * y_c^3} \quad (3-11)$$

Donde:

Q_{min} : Caudal mínimo para que se produzca flujo rasante (m³/s)

y_c : Profundidad crítica mínima (m)

B : Ancho de la rápida escalonada (m)

g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

$$Q_{min} = 14.04 \text{ l/s}$$

La Instalación experimental de la Rápida Escalonada será analizada conforme al plan de pruebas propuesto en la **Tabla No. 3.8**, este corresponde al mismo de la Etapa 1 con el objetivo de comparar los resultados entre la Etapa 1 y Etapa 2. Se considera un rango apropiado de caudales que va desde caudales bajos, pasa por intermedios hasta llegar al caudal máximo de diseño.

Tabla No. 3.8: Plan de pruebas para la instalación experimental.

PRUEBA No	CAUDAL EXPERIMENTAL (l/s)	CARACTERÍSTICAS
P0	14.04	Caudal mínimo (para cumplir con la condición de flujo rasante)
P1	23.13	Caudal bajo ($\approx 30\%$ del caudal de diseño de la instalación experimental)
P2	34.09	Caudal bajo ($\approx 40\%$ del caudal de diseño de la instalación experimental)
P3	44.50	Caudal intermedio ($\approx 50\%$ del caudal de diseño de la instalación experimental)
P4	55.88	Caudal alto ($\approx 70\%$ del caudal de diseño de la instalación experimental)
P5	78.08	Caudal máximo (caudal de diseño de la instalación experimental)

FUENTE: PIMI-1606

3.4. VERIFICACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

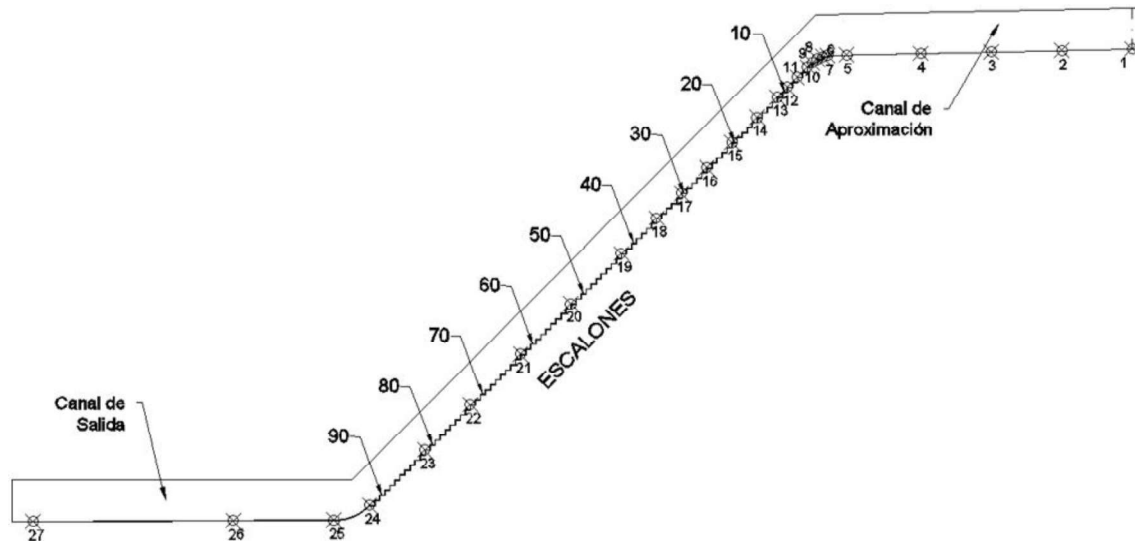
3.4.1. COMPROBACIÓN GEOMÉTRICA

3.4.1.1. VALIDEZ DE LA IMPLANTACIÓN DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL

La verificación de la construcción de la instalación experimental se la realizara a través de un levantamiento topográfico con el uso de una estación total y un nivel topográfico, los resultados obtenidos a través del levantamiento topográfico se los comparará con los diseños en planos, y así determinar errores geométricos y comprobar que estén dentro de los límites establecidos.

Los resultados del levantamiento topográfico realizado se muestran en el **ANEXO 3 (DATOS LEVANTADOS EN LA COMPROBACIÓN GEOMÉTRICA)**

Figura No. 3.11: Esquema en corte de los puntos considerados en el levantamiento con estación total de la instalación experimental.



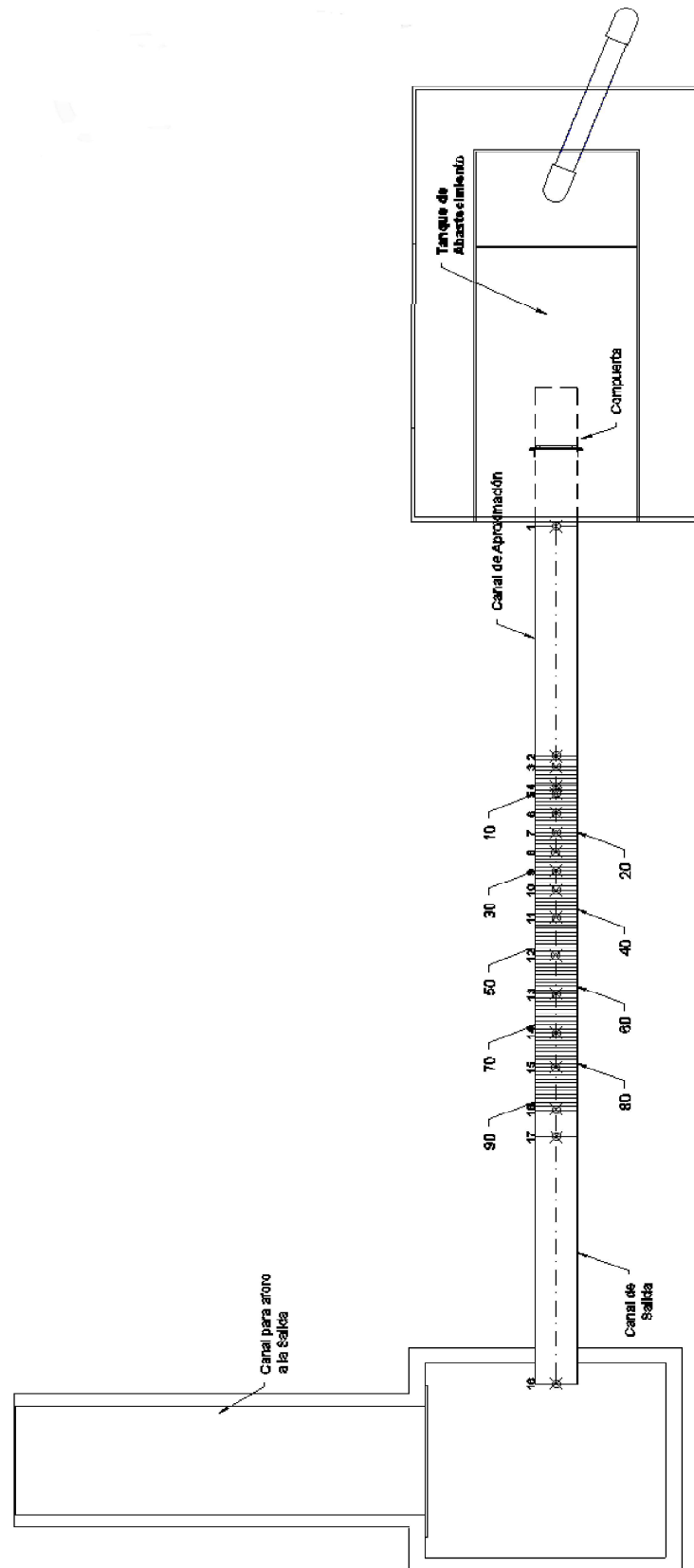
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 3.9: Análisis comparativo de las pendientes correspondientes al canal de aproximación y de salida, en planos y las obtenidas en el proceso constructivo para la instalación experimental.

PENDIENTES DEL CANAL DE APROXIMACIÓN Y CANAL DE SALIDA								
Puntos	Δh (m)		ΔL (m)		Pendiente (m/m)		Desviación (m/m)	Error %
	Planos	Instalación	Planos	Instalación	Planos	Instalación		
1-5	0.0567	0.0565	2.837	2.837	0.020	0.01992	0.00008	0.42%
20-22	0.0119	0.0117	2.960	2.960	0.004	0.00395	0.00007	1.68%

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Figura No. 3.12: Esquema en planta de los puntos considerados en el levantamiento con estación total de la instalación experimental.



3.4.1.2. GEOMETRÍA DE LOS ESCALONES

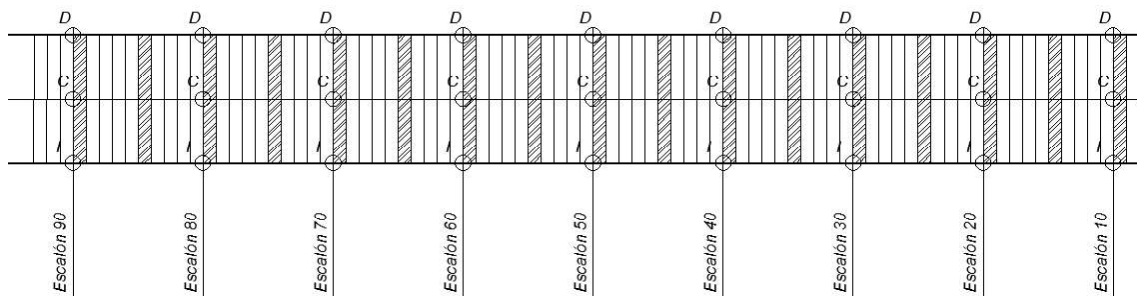
La comprobación de las medidas constructivas correspondientes al fondo escalonado se realiza mediante un distanciómetro o medidor láser y un calibrador pie de rey o nonio, es decir, determinando la longitud del escalón, así como la huella y contrahuella, respectivamente.

Fotografía No. 3.23: Longitud del escalón, huella y contrahuella en la instalación experimental de la rápida escalonada.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Figura No. 3.13: Esquema de los puntos considerados en el levantamiento con distanciómetro y nonio.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

En la **Tabla 3.10** se presenta el resumen de los resultados obtenidos de las mediciones correspondientes al fondo escalonado. Ver Anexo 3.

Tabla No. 3.10: Promedio de mediciones realizadas en la rápida escalonada con distanciómetro.

MEDICIONES CON DISTANCIÓMETRO				
Longitud Promedio Planos (cm)	Longitud Promedio Instalación (cm)	Desviación (cm)	Error (%)	Observación
51,80	51,79	0.01	0.02%	Tramo escalonado

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

La longitud de diseño para cada escalón es de 51.8 cm, mientras que la longitud constructiva promedio obtenida con el distanciómetro es de 51.79 cm, siendo el error prácticamente despreciable.

La medida de huella y contrahuella de diseño (para 86 escalones) es de 5.0 cm, mientras que en la instalación experimental son de 5.02 cm en la huella y 5.01 cm en la contrahuella con una desviación porcentual menor al 1%, mediante estos resultados se valida geoméricamente el fondo escalonado.

Las desviaciones en planta, elevación, ángulo de inclinación de la rápida, pendientes tanto del canal de aproximación y del canal de salida de la instalación experimental se encuentran dentro de los rangos admisibles.

3.4.2. FUERZAS PREDOMINANTES EN EL FLUJO QUE SE DESARROLLA EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En la instalación experimental las fuerzas predominantes en el flujo son la gravedad y la tensión superficial, es necesario entonces comprobar que los efectos de las fuerzas viscosas y de tensión superficial sean despreciables respecto de las fuerzas de gravedad y de inercia.

Para flujo monofásico las condiciones para que los efectos de escala para la zona bifásica sean despreciables son las siguientes:

- Numero de Reynolds $> 2 \times 10^4$
- Calados medidos mayores a 2 cm para evitar los efectos de tensión superficial.

Según Boes (2000) las condiciones para que los efectos de escala para la zona bifásica sean despreciables son las siguientes:

- Numero de Reynolds $> 1 \times 10^5$
- Raíz del Numero de Weber > 100 y calados medidos mayores a 2 cm.

Los números adimensionales utilizados para esta comprobación son:

- Número de Froude
- Número de Reynolds
- Número de Weber

Para la verificación se dividirá en dos zonas a la instalación las cuales son: canal de aproximación y rápida escalonada (fondo escalonado), los cálculos se realizarán únicamente en el canal de aproximación y en el fondo escalonado ya que el canal de salida no es objeto de estudio en el presente proyecto de titulación.

3.4.2.1. CANAL DE APROXIMACIÓN

En la siguiente tabla se presentan los valores de los números adimensionales calculados en función de los datos obtenidos en la instalación con geometría original ejecutando el plan de pruebas definido, siendo estos: Froude, Reynolds y Weber para el canal de aproximación.

Fotografía No. 3.24: Perspectiva del canal de aproximación.

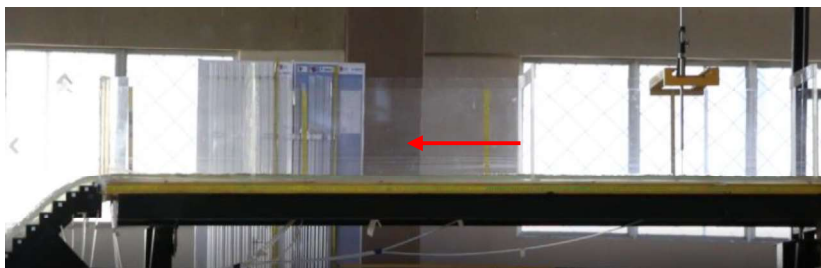


Tabla No. 3.11: Números adimensionales calculados en el canal de aproximación.

NÚMEROS ADIMENSIONALES (Canal de aproximación)					
PRUEBA	Caudal (Q)	Calado (y)	Velocidad (v)	Fr	Re
	(l/s)	(cm)	(m/s)	-	-
P0	14,48	1.9	1.46	3.38	1.03E+05
P1	23,13	2.7	1.68	3.29	1.61E+05
P2	34.09	3.3	1.99	3.49	2.32E+05
P3	44,50	4.1	2.08	3.27	2,94E+05
P4	55,88	4.8	2.23	3.23	3.61E+05
P5	78.08	6.5	2.31	2.88	4.78E+05

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

En la **Tabla No. 3.11** se indican que los valores de Froude son mayores a 1, por lo que se comprueba que se trata de un flujo supercrítico, con respecto a las fuerzas de viscosidad los valores del número de Reynolds superan al valor condicional mínimo de 1×10^5 y finalmente los calados del canal de aproximación son mayores a 2cm para todo el rango de caudales seleccionados lo cual nos garantiza que las restricciones en cuanto al efecto de la viscosidad y de la tensión superficial se cumplen y por esta razón dichas fuerzas se encuentran en el rango despreciable.

3.4.2.2. RÁPIDA ESCALONADA

En la siguiente tabla se presentan los valores de los números adimensionales calculados en función de los datos obtenidos en la instalación con geometría original ejecutando el plan de pruebas definido, siendo estos: Reynolds y Weber para la rápida escalonada.

Fotografía No. 3.25: Vista frontal de la rápida escalonada (Fondo escalonado).



Tabla No. 3.12: Número adimensional de Reynolds para el perfil de fondo escalonado.

NÚMEROS ADIMENSIONALES (Rápida Escalonada)							
PRUEBA	Caudal (Q)	Profundidad (y ₉₀)	Concentración media de aire (Cm)	Profundidad (y _w)	Velocidad (v _w)	R _e	We ^{0.5}
	(l/s)	(cm)	-	(cm)	(m/s)	-	-
P0	14.48	2.80	0.575	1.19	2.3	1.06E+05	58.6
P1	23.13	3.50		1.49	3.0	1.68E+05	83.3
P2	34.09	4.80		2.04	3.2	2.42E+05	103.8
P3	44.50	5.90		2.51	3.4	3.11E+05	121.2
P4	55.88	7.00		2.98	3.6	3.84E+05	138.6
P5	78.08	8.40		3.57	4.2	5.26E+05	175.0

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

De los valores presentados en la **Tabla No. 3.12**, se observa, que las fuerzas de viscosidad los valores del número de Reynolds superan al valor condicional mínimo de 1×10^5 y el número de Weber para los caudales de las pruebas P0 y P1 se encuentran por debajo del valor condicional mínimo es decir que con estos caudales se podría presentar ciertos problemas son respecto a la tensión superficial.

3.5. CONCLUSIONES

- Para obtener un flujo de aproximación supercrítico de manera uniforme al ingreso de la rápida escalonada, a la estructura de la instalación experimental se instaló una compuerta plana vertical de forma rectangular al inicio del canal de 0.518mx0.50m. La pendiente del canal de aproximación es de un valor del 2% que se obtuvo de su diseño y posteriormente se comprobó al calcular el número adimensional de Froude (Fr) para el rango de caudales establecidos en el plan de pruebas que se obtuvieron valores entre 2.84 y 3.10. Según la literatura técnica esto garantiza que el flujo se encuentra en régimen supercrítico en el canal de aproximación.
- La calibración geométrica para determinar la desviación entre los planos de diseño y la estructura implementada fue realizada mediante levantamiento planimétrico y altimétrico con la ayuda de estación total y nivel topográfico. Como resultados se obtuvieron desviaciones menores al 1%, lo cual está dentro de los límites aceptados para validar geoméricamente la instalación.
- El fenómeno hidráulico en la instalación experimental está regido por fuerzas gravitatorias, por esta razón el estudio fue manejado bajo el principio de similitud restringida de Froude. Para verificar los efectos de escala se dividió la instalación experimental en tres zonas; canal de aproximación, rápida escalonada (fondo escalonado) y canal de salida. Los resultados obtenidos muestran que los valores de Weber no cumplen para el caudal mínimo del plan de pruebas para el fondo escalonado, pero para los demás caudales sí cumplen. Por otro lado, los valores de Reynolds son mayores al límite recomendado ($Re > 1 \times 10^5$) en la literatura técnica, por ello se mantiene despreciable el efecto de viscosidad del flujo.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

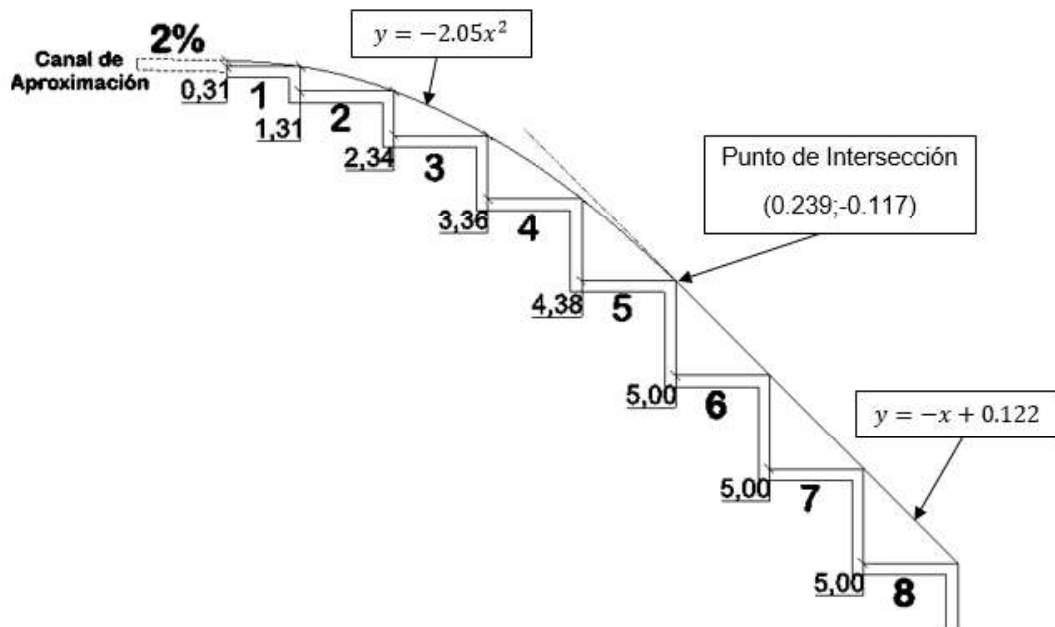
4.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos en la instalación experimental tanto con la geometría original como con las modificaciones de optimización propuestas a partir del análisis experimental de los resultados con diseño original. Inicialmente se describe a través de registro fotográfico el comportamiento hidráulico del flujo a la entrada a la rápida escalonada en cada una de las geometrías implementadas y para el rango de caudales del plan de pruebas, seguidamente se reporta los resultados experimentales tales como la concentración media de aire, el factor de fricción, los porcentajes de disipación de energía y las curvas adimensionales que describen el comportamiento hidráulico del flujo rasante según el caudal de operación. Finalmente se presenta una comparación de resultados obtenidos entre los cálculos teóricos y los obtenidos con la modelación física.

4.2. GEOMETRÍA CON DISEÑO ORIGINAL.

En la geometría con diseño original el perfil escalonado fue construido a partir de una ecuación parabólica situada al final del canal de aproximación (ingreso del perfil escalonado), también se trazó una línea virtual recta con una inclinación de 45° tangente a la parábola, el punto de intersección entre las dos curvas es el límite para el desarrollo del perfil parabólico. Dicho perfil parabólico define los vértices de los primeros escalones del perfil escalonado, la geometría de los 5 primeros escalones se compone de contrahuella con medida variable y de huella de 5 cm a excepción del primer escalón que tiene una huella de 3.9 cm, es decir, los cinco primeros escalones del fondo escalonado se ajustan al perfil parabólico.

Gráfico No. 4.1: Curva de diseño del perfil escalonado en la geometría original



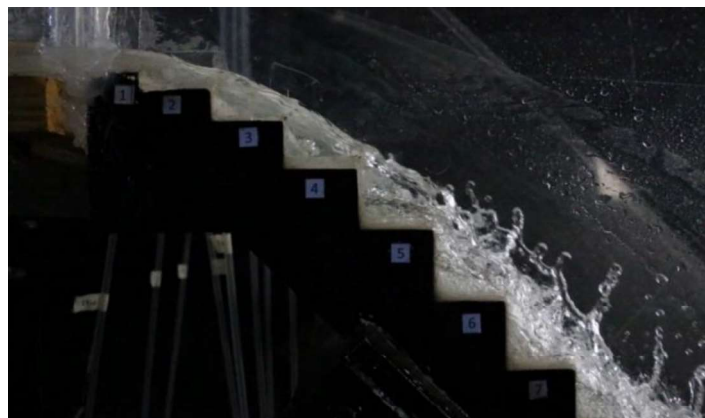
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

4.2.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL FLUJO

A continuación, se presenta un análisis del registro fotográfico observado para dos escenarios de funcionamiento, con el menor caudal del plan de pruebas y con el caudal de diseño (caudal máximo del plan de pruebas). Los escenarios para los caudales restantes del plan de pruebas se muestran en el Anexo 6.

4.2.1.1. PRUEBA P0: Q = 14,48 l/s

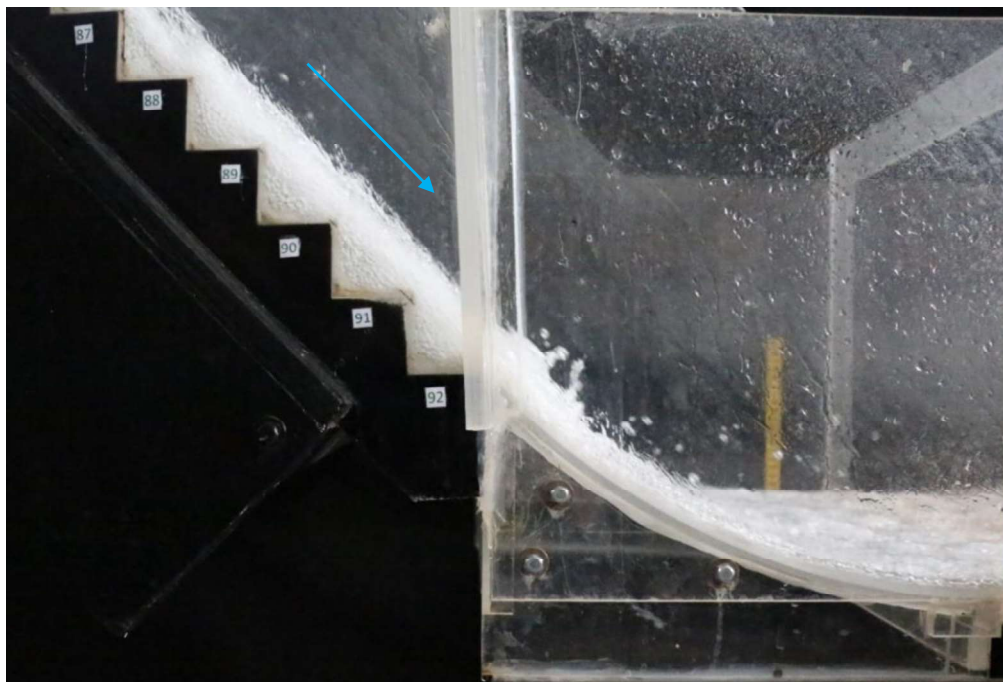
Fotografía No. 4.1: Prueba 0. Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones e identificación del punto inicial de aireación.



Fotografía No. 4.2: Prueba 0. Vista superior al flujo a la entrada a la rápida escalonada.

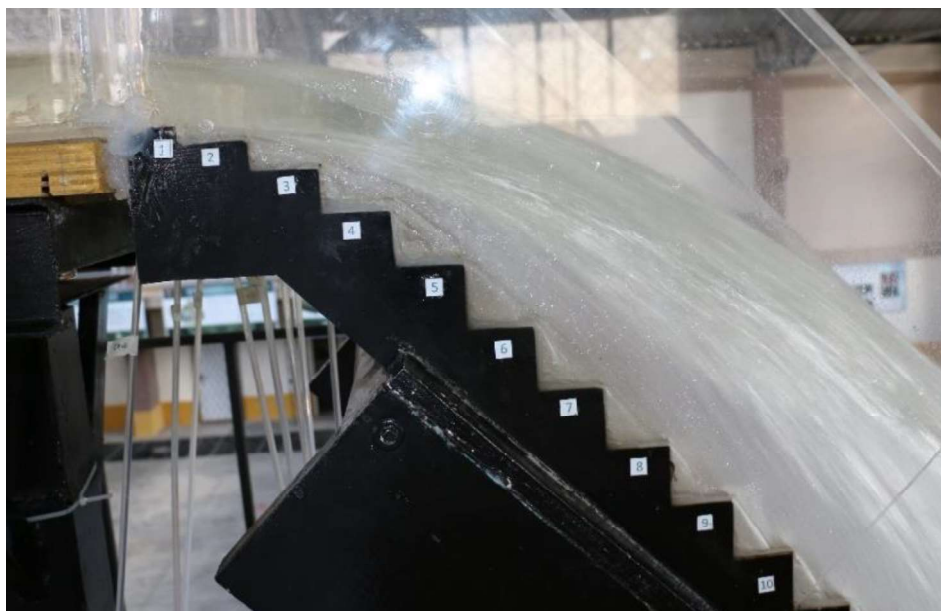


Fotografía No. 4.3: Prueba 0. Vista lateral derecha, flujo al pie de la rápida e inicio del canal de salida.



4.2.1.2. PRUEBA P5: $Q = 78.08$ l/s

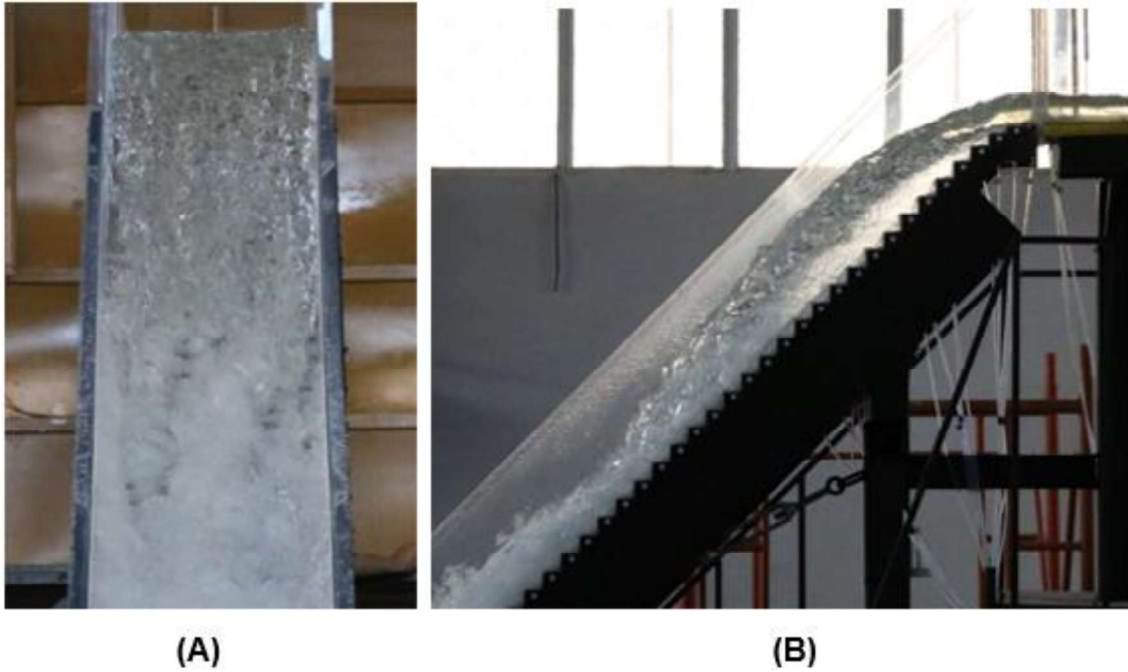
Fotografía No. 4.4: Prueba 5. Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones de la rápida escalonada.



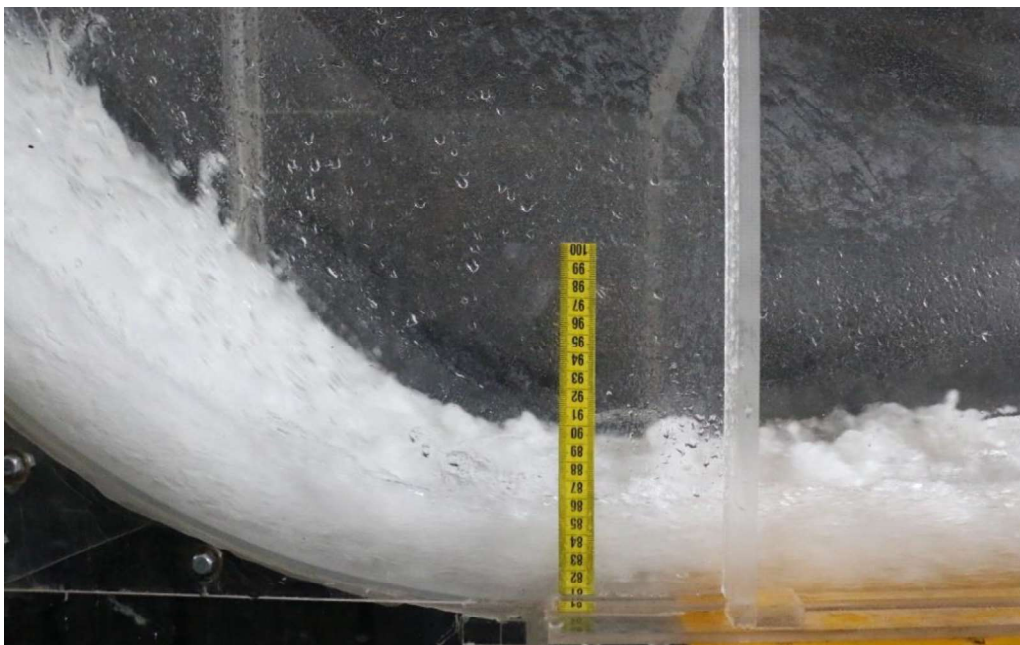
Fotografía No. 4.5: Prueba 5. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire.



Fotografía No. 4.6: Prueba 5. (A) Vista frontal del flujo y (B) Vista lateral izquierda del flujo en la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.7: Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.



A continuación se presenta una tabla con el resumen de observaciones realizadas.

GEOMETRÍA ORIGINAL						
PRUEBA	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Q (L/s)	14.48	23.13	34.09	44.50	55.88	78.08
OBSERVACIÓN	UBICACIÓN					
Aparición de los primeros vórtices intermitentes e inicio de la aireación	Escalón #4	Escalón #4	Escalón #6	Escalón #6	Escalón #7	Escalón #8
Inicio de la vorticidad constante y completa a lo largo del escalón	Escalón #6	Escalón #6	Escalón #9	Escalón #10	Escalón #12	Escalón #20
¿Existe separación entre el flujo y el fondo de la rápida escalonada?	NO	NO	SI	SI	SI	SI
Punto inicial de la separación entre el flujo y el fondo de la rápida escalonada	---	---	Escalón #1	Escalón #1	Escalón #1	Escalón #1
Punto final de la separación entre el flujo y el fondo de la rápida escalonada	---	---	Escalón #5	Escalón #6	Escalón #7	Escalón #8
Intervalo de escalones que no presentan flujo debido a la separación entre el flujo y el fondo de la rápida escalonada	---	---	Escalones #2 al #4	Escalones #2 al #5	Escalones #2 al #6	Escalones #2 al #7
¿Existe salpicadura en el flujo?	NO	NO	SI	SI	SI	SI
Punto inicial de la salpicadura	---	---	Escalón #10	Escalón #13	Escalón #20	Escalón #27
Punto final de la salpicadura	---	---	Escalón #50	Escalón #65	Escalón #70	Escalón #87
REGISTRO FOTOGRÁFICO	ANEXO 6					

4.2.2. CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA GEOMETRÍA ORIGINAL

- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría original, se observa un comportamiento hidráulico adecuado para el rango de caudales entre 14 - 23 l/s (P0 – P1). El comportamiento hidráulico de la instalación para caudales entre 34 - 78 l/s (P2 – P5) es inadecuado, en dicho intervalo de caudales se produce una separación entre el flujo y el fondo del canal en la zona de ingreso a la rápida escalonada. La separación del flujo aumenta directamente con el caudal, por lo que en la prueba con el caudal máximo de diseño P5 (78 l/s) se observa más separación y la mayor cantidad de escalones que debido al salto no tienen contacto con el flujo.
- Debido a la separación del flujo se produce un mal funcionamiento hidráulico inadecuado para los caudales intermedios y altos del plan de pruebas en la instalación experimental con geometría original. Esta condición es inaceptable para la estructura por lo que no se justifica realizar los cálculos del factor de fricción y la disipación de energía. Por lo tanto, se propone una geometría modificada M1 que corrija dicho funcionamiento hidráulico al ingreso del flujo a la rápida.

4.3. DISEÑO MODIFICADO M1

Una vez realizado el análisis del funcionamiento de la instalación experimental con diseño original, se ejecutan modificaciones en su geometría con el objetivo de corregir las deficiencias del comportamiento hidráulico observado en la geometría original y evaluar su eficiencia en disipación de energía.

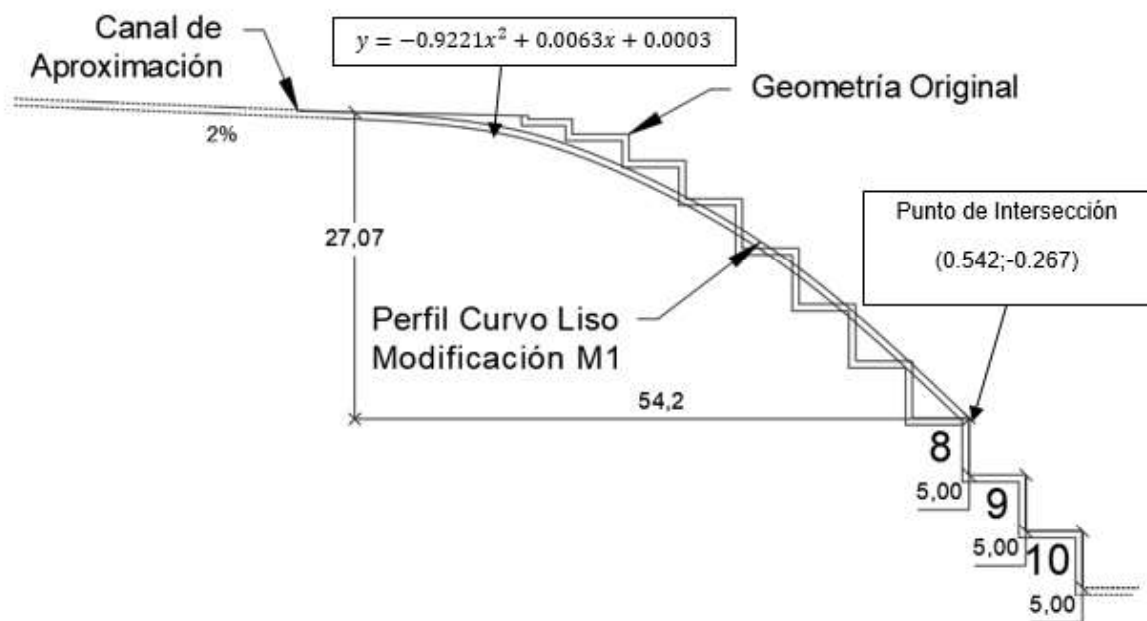
El nuevo perfil que empata el canal con la rápida se la obtuvo a partir de los datos registrados para la prueba P5 y que representa el $Q_{\text{diseño}}$ de la estructura. Con esta información fue posible definir un perfil curvo que representa la curva de la

capa límite inferior de flujo separado del fondo del canal al operar con el caudal máximo de diseño.

4.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M1

En base al mencionado perfil curvo de la lámina inferior del chorro presentado para el caudal de diseño, se procedió a realizar un diseño ajustado de la parte inicial de la rápida escalonada, reemplazando los 8 primeros escalones por un cimacio curvo, con el objetivo de evitar que se presente el desprendimiento del flujo de la superficie de la rápida, para todos los caudales ensayados. Se construyó en acrílico el cimacio de la geometría modificada M1 utilizando la ecuación ajustada del perfil curvo.

Gráfico No. 4.2: Perfil de flujo y propuesta de optimización a colocarse en el perfil escalonado de la rápida.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Figura No. 4.1: Ubicación del perfil curvo en la rápida escalonada. (Vista en planta).



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Fotografía No. 4.8: Vista lateral de la Instalación experimental con el perfil curvo liso instalado.



4.3.2. RESULTADOS DEL DISEÑO MODIFICADO M1

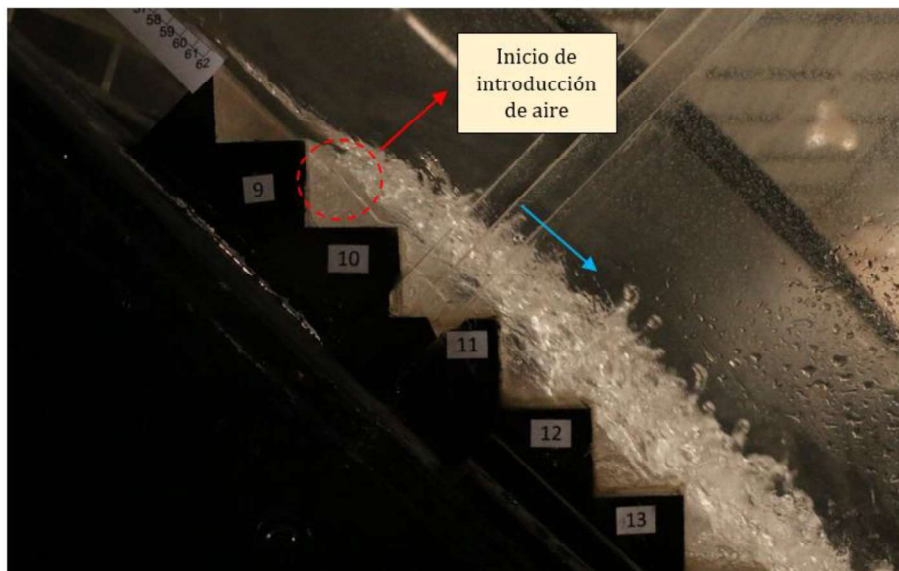
El siguiente apartado presenta los resultados de los parámetros evaluados en la instalación experimental, estos son el comportamiento hidráulico del flujo y la disipación de energía. Las propuestas de modificación geométrica tienen como objetivo optimizar la geometría de ingreso a la rápida escalonada para lograr un comportamiento hidráulico adecuado en el flujo y evaluar el porcentaje de disipación de energía para todo el rango de caudales establecido en el plan de pruebas.

4.3.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Luego de implementar en la Instalación Experimental la geometría modificada M1, se ejecuta el plan de pruebas previamente establecido y se procede a la toma de datos, de ello se obtiene el siguiente respaldo fotográfico para $Q_{mín}$ y $Q_{máx}$:

4.3.3.1. PRUEBA P0: $Q = 14,35$ l/s

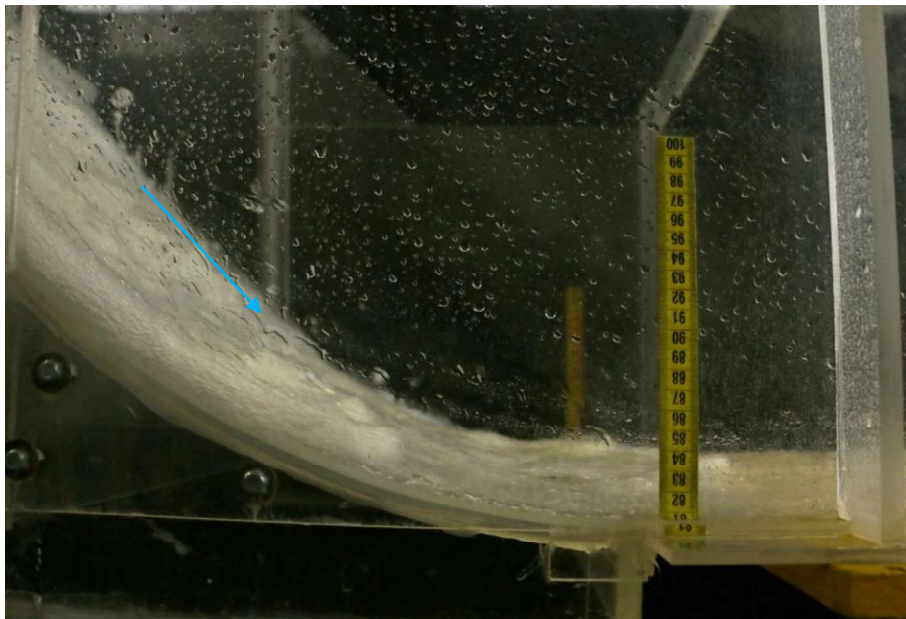
Fotografía No. 4.9: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.10: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.11: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.



4.3.3.2. PRUEBA P5: $Q = 78,05 \text{ l/s}$

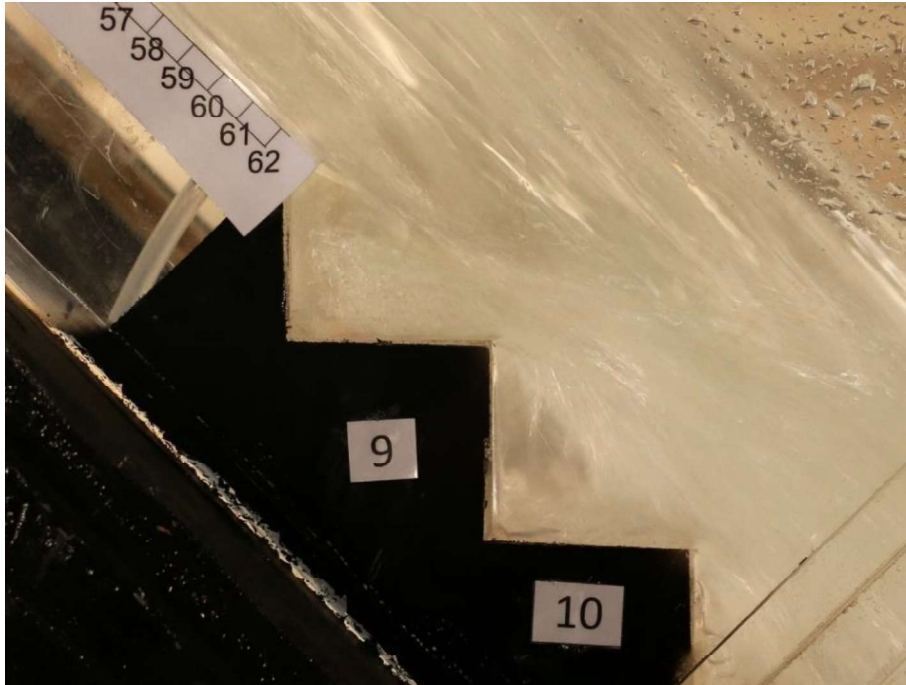
Fotografía No. 4.12: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.



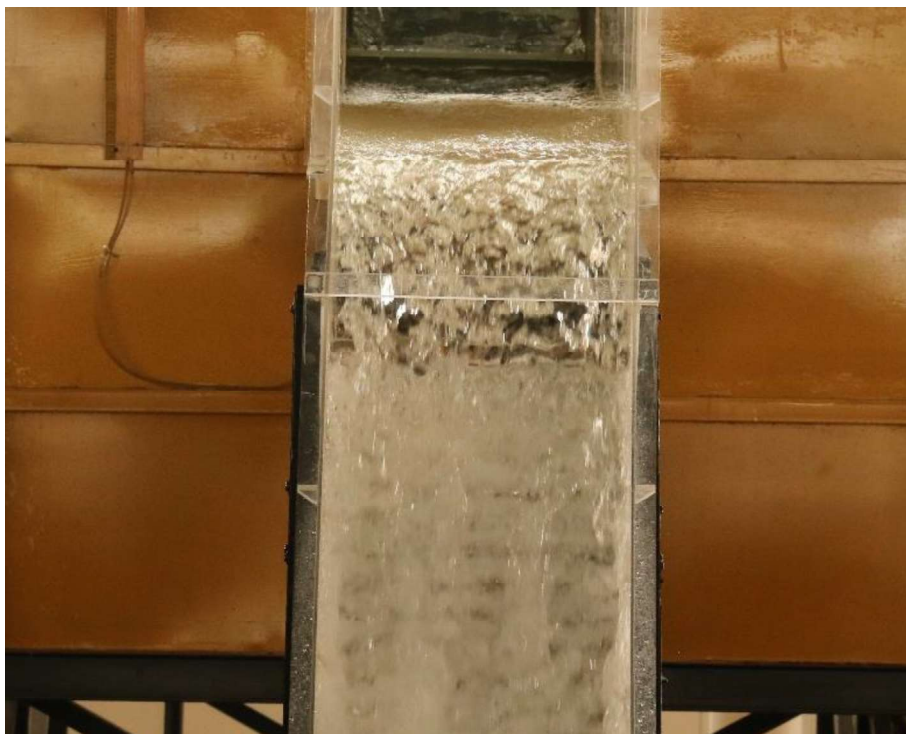
Fotografía No. 4.13: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



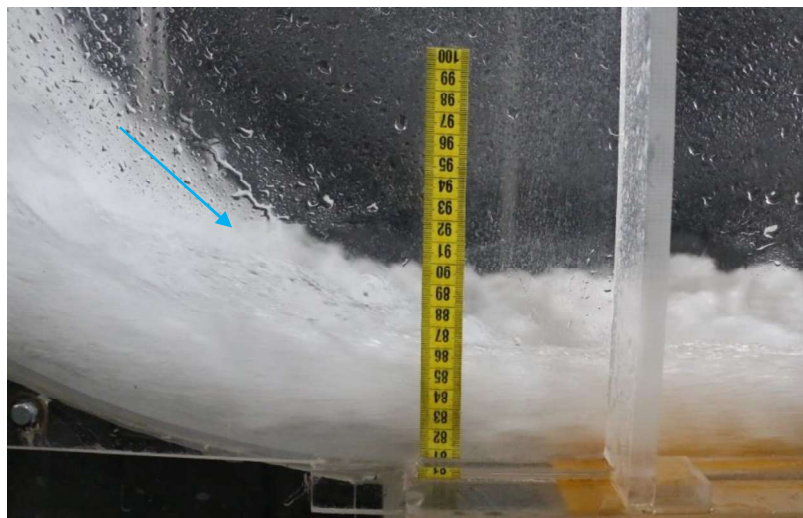
Fotografía No. 4.14: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.15: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.16: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.



Observaciones:

GEOMETRÍA MODIFICADA M1						
PRUEBA	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Q (L/s)	14.35	23.35	33.67	44.50	55.71	78.05
OBSERVACIÓN	UBICACIÓN					
Aparición de los primeros vórtices intermitentes e inicio de la aireación	Escalón #15	Escalón #10	Escalón #10	Escalón #9	Escalón #9	Escalón #9
Inicio de la vorticidad constante y completa a lo largo del escalón	Escalón #27	Escalón #12	Escalón #12	Escalón #11	Escalón #11	Escalón #10
¿Existe separación entre el flujo y el fondo del perfil curvo liso de ingreso a la rápida escalonada?	NO	NO	NO	NO	NO	NO

GEOMETRÍA MODIFICADA M1						
PRUEBA	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Q (L/s)	14.35	23.35	33.67	44.50	55.71	78.05
OBSERVACIÓN	UBICACIÓN					
¿Existe rebote debido a la transición del flujo desde el perfil curvo liso hacia el perfil escalonado?	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Punto inicial del rebote producido en la transición del flujo desde el perfil curvo liso hacia el perfil escalonado	Escalón #9	Escalón #11	Escalón #11	Escalón #9	Escalón #9	Escalón #9
Punto final del rebote producido en la transición del flujo desde el perfil curvo liso hacia el perfil escalonado	Escalón #15	Escalón #35	Escalón #17	Escalón #25	Escalón #23	Escalón #13
Intervalo de escalones que no presentan flujo debido al salto producido en los rebotes	Escalones #9 al #12	---	---	---	---	---
¿Existe salpicadura en el flujo?	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Punto inicial de la salpicadura	Escalón #15	Escalón #11	Escalón #12	Escalón #11	Escalón #11	Escalón #9
Punto final de la salpicadura	Escalón #70	Escalón #35	Escalón #43	Escalón #46	Escalón #46	Escalón #80
REGISTRO FOTOGRÁFICO	ANEXO 6					

Distribución de Presiones en el Perfil Curvo Liso

Los siguientes gráficos presentan, a través de curvas adimensionales, la distribución de presiones medidas en el eje del perfil curvo liso. Los puntos de medida son al inicio, centro y final del perfil curvo liso. Las gráficas presentadas a continuación representan la distribución de presiones en el fondo del perfil curvo liso para cada uno de los caudales del plan de pruebas.

Gráfico No. 4.3: Distribución de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P0.

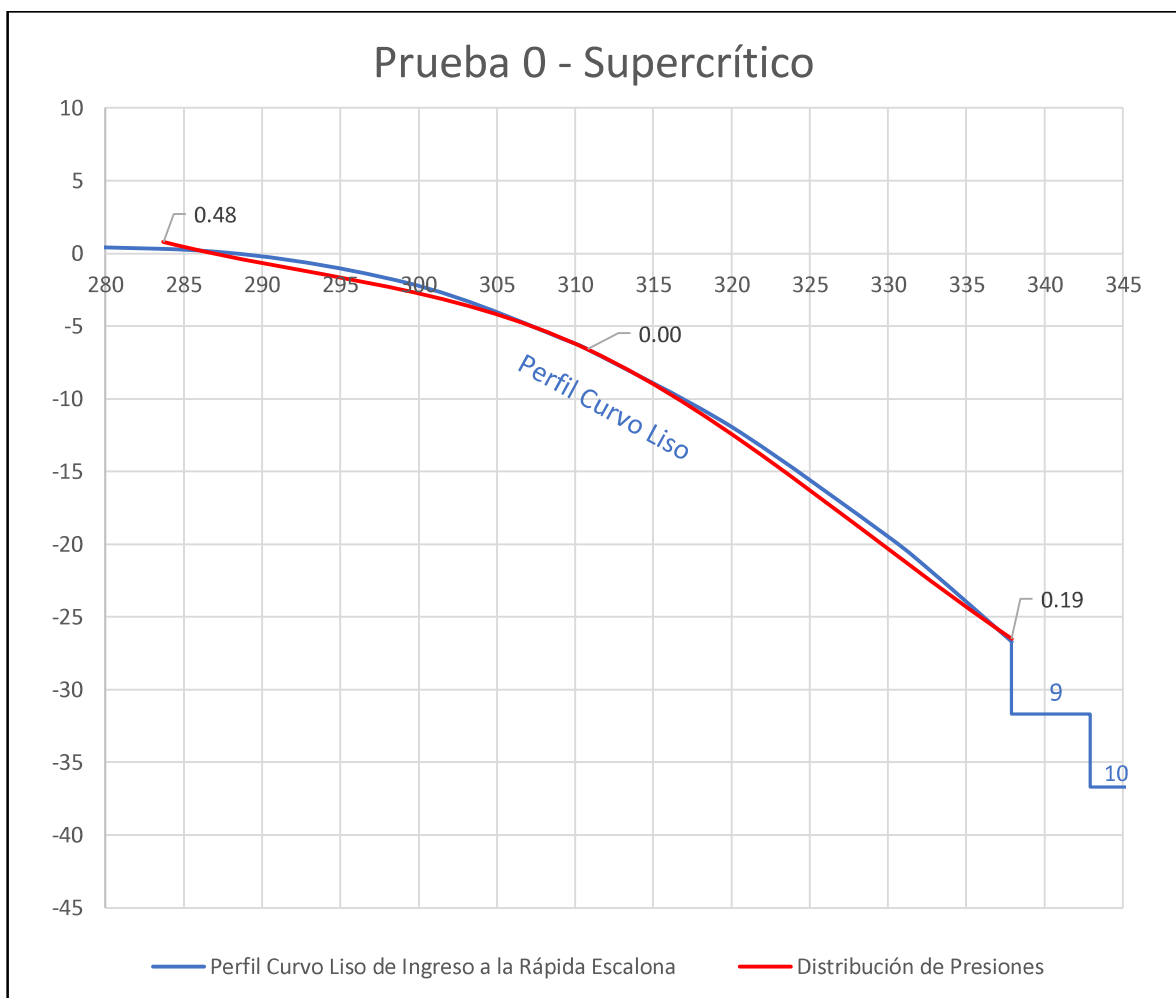


Gráfico No. 4.4: Distribución de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P1.

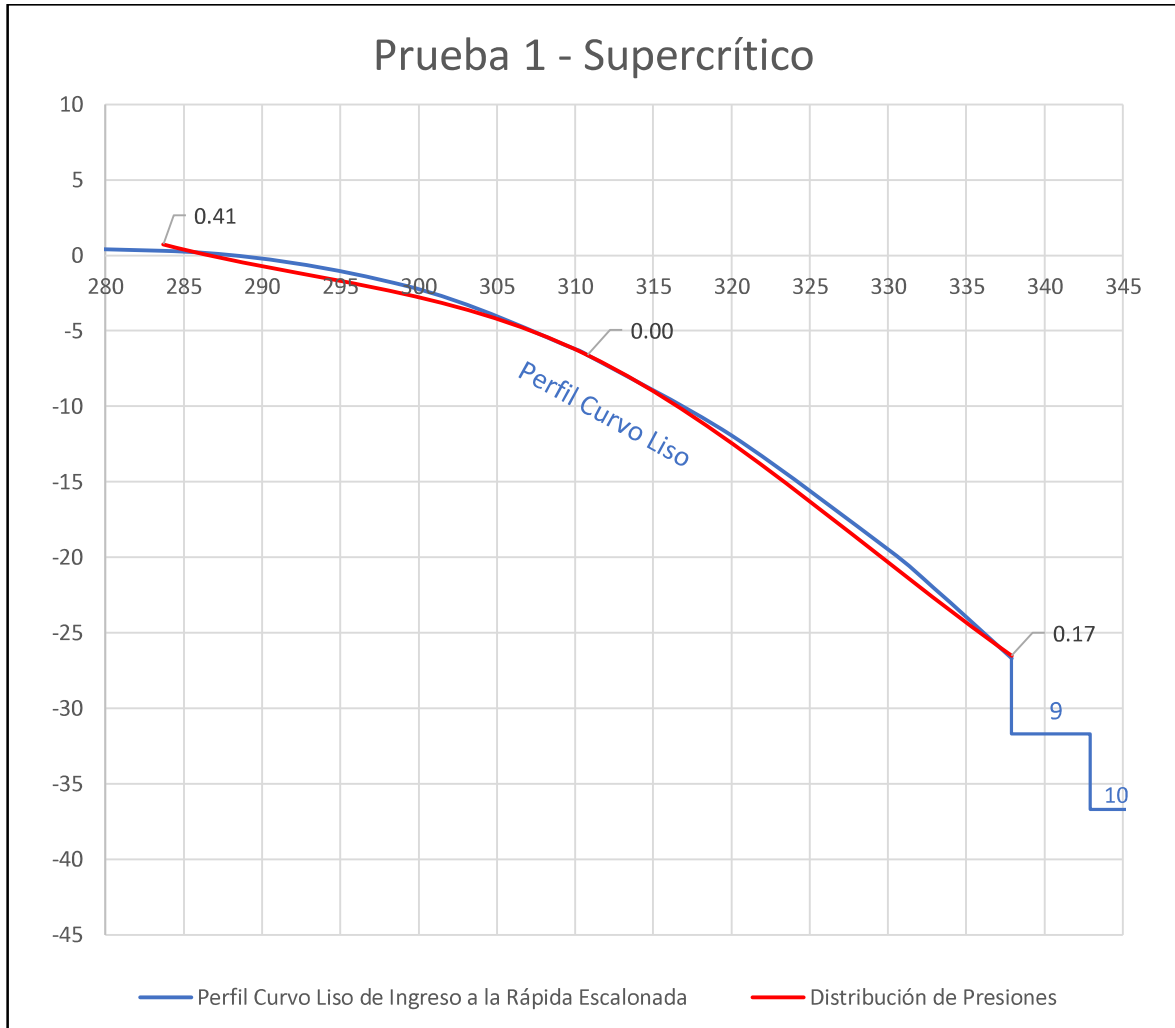


Gráfico No. 4.5: Distribución de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P2.

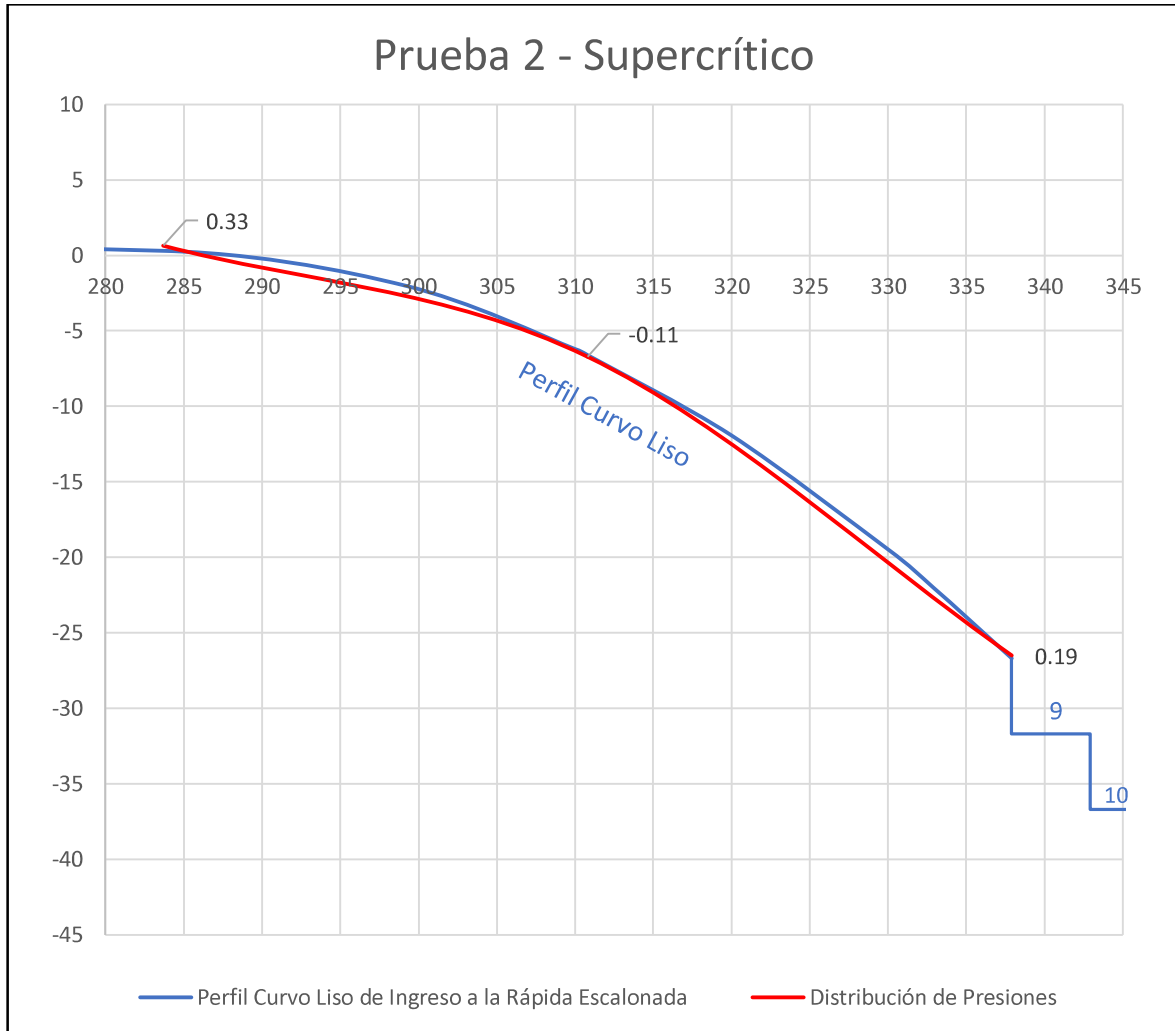


Gráfico No. 4.6: Distribución de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P3.

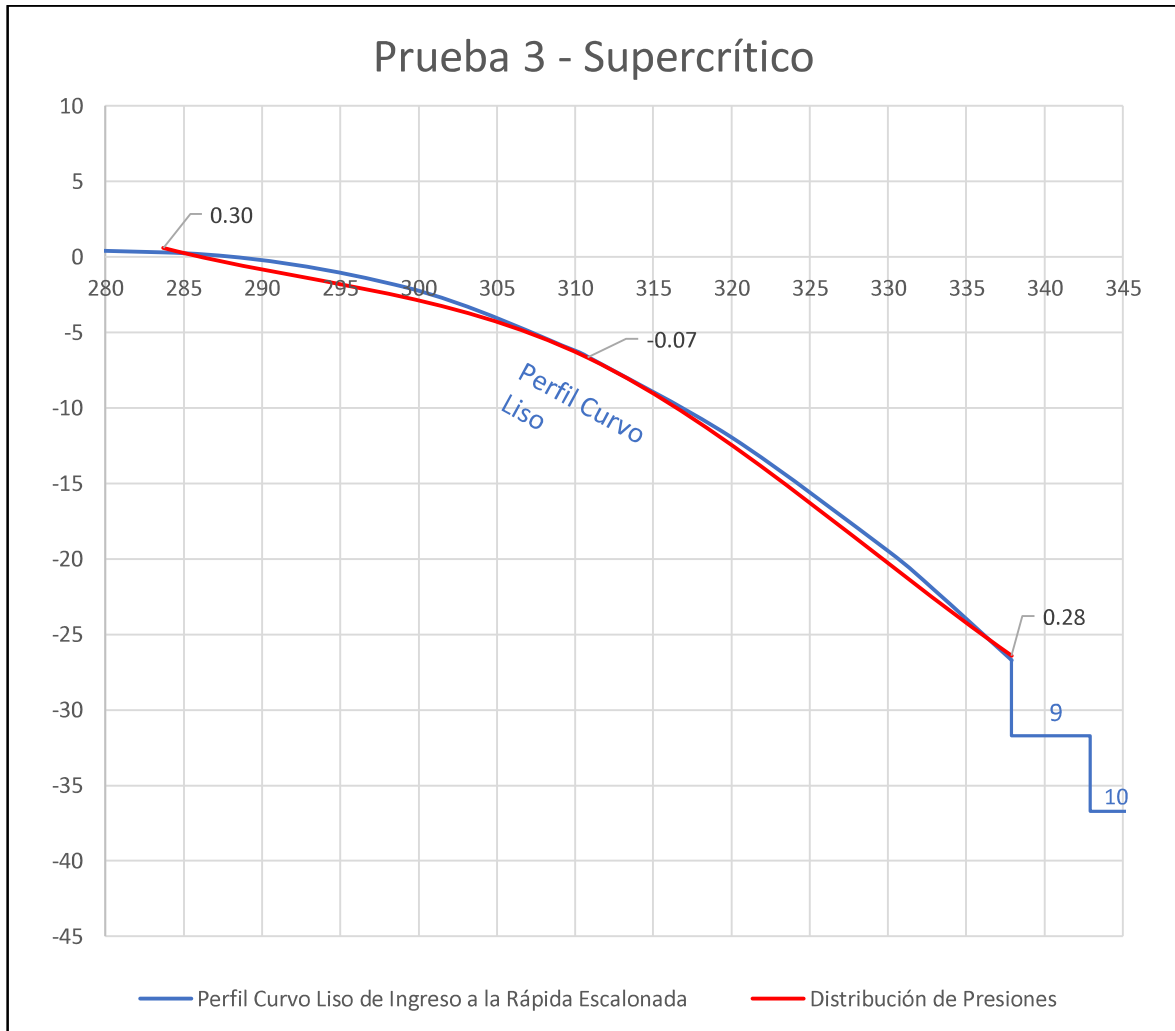


Gráfico No. 4.7: Distribución de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P4.

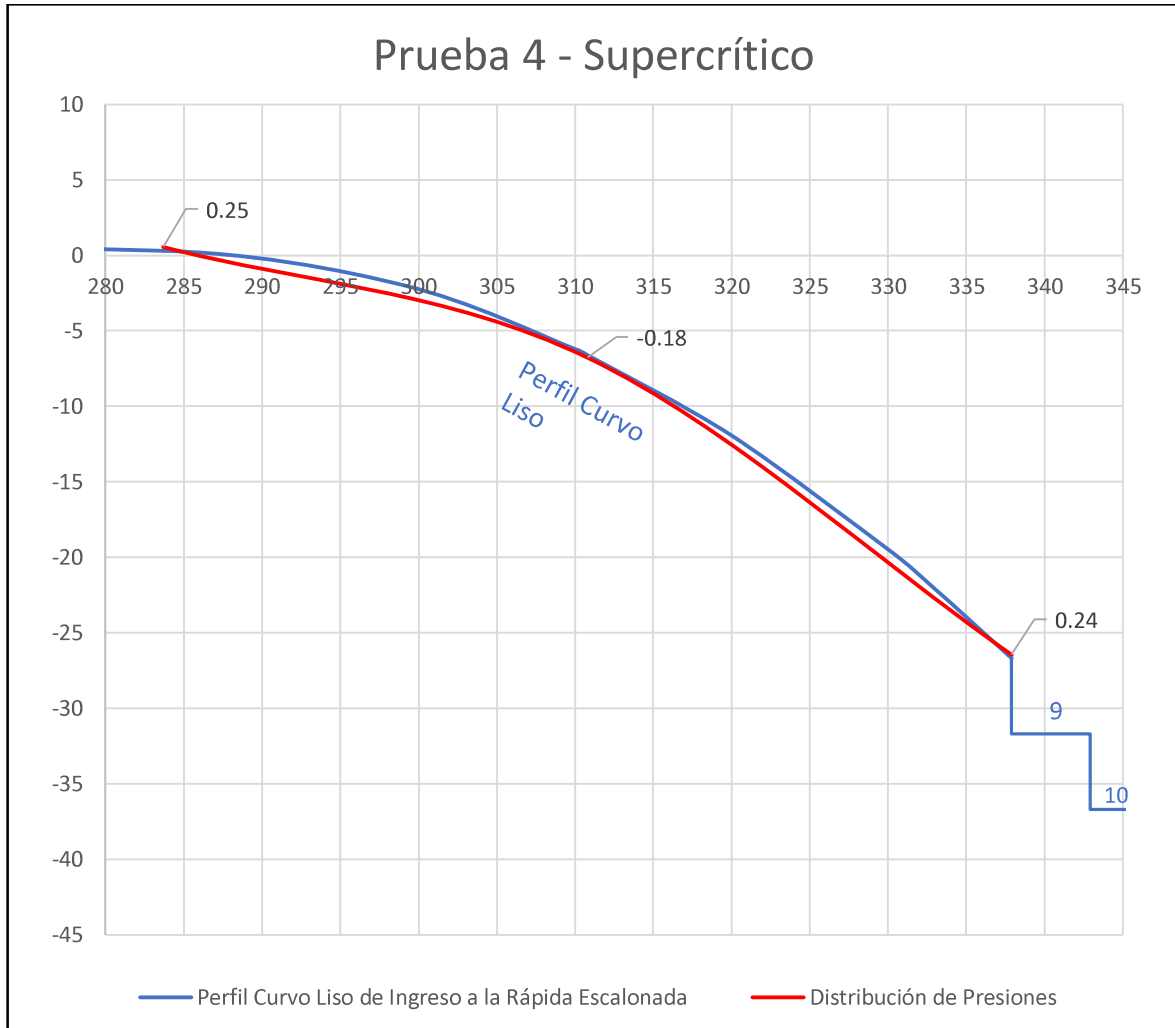
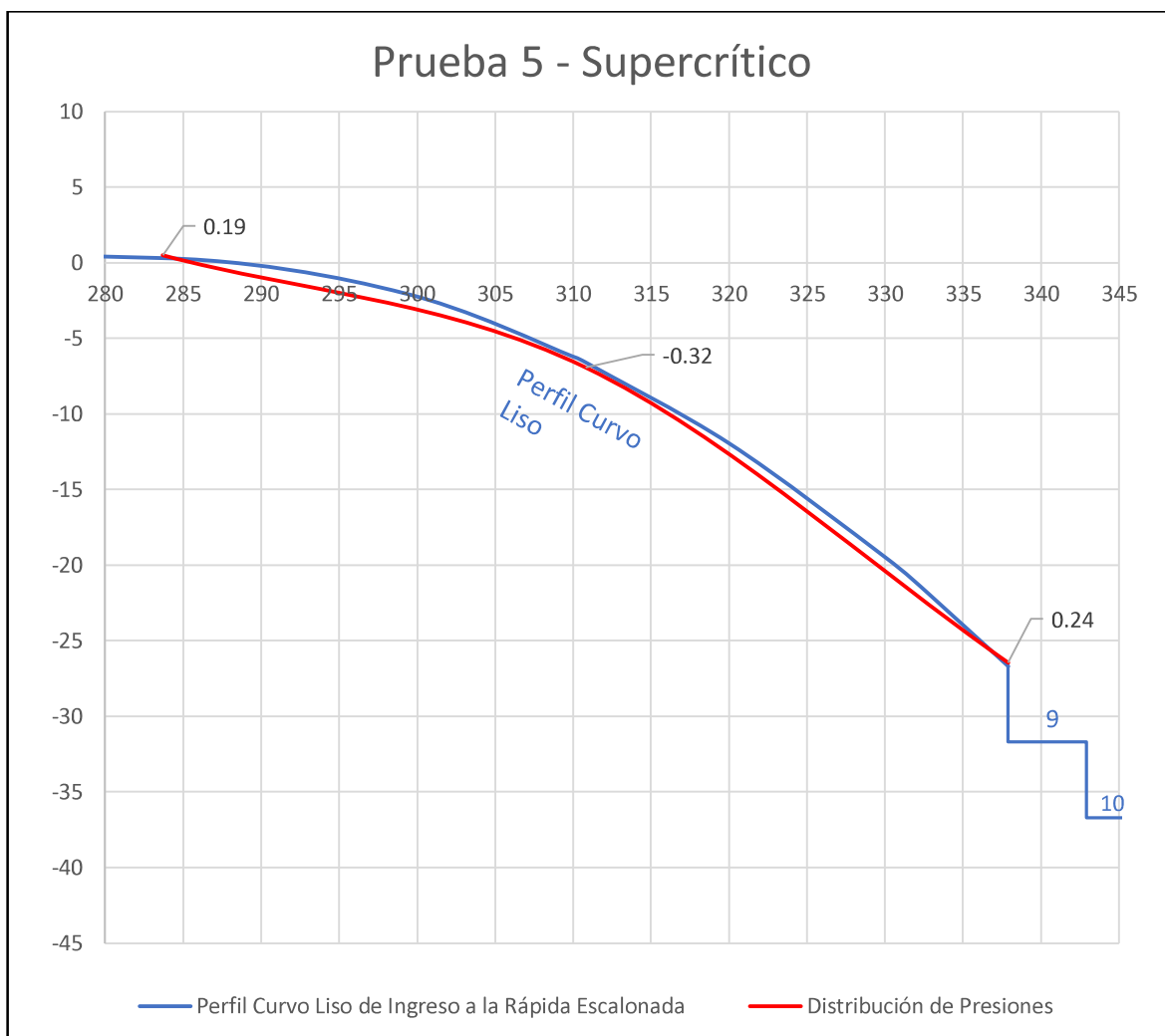


Gráfico No. 4.8: Distribución de presiones en el perfil curvo liso al ingreso de la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba P5.



En las gráficas presentadas el valor positivo más alto es de 0.48 y se produce en el inicio del perfil curvo liso en la prueba P0, mientras que el valor negativo es -0.32 y se ubica en el punto medio del perfil curvo liso en la prueba P5.

4.3.4. FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH

El cálculo del factor de fricción se lo realiza en la zona uniforme del flujo rasante, para obtener este factor el primer paso es obtener la concentración media de aire. Para la geometría modificada M1, la concentración media de aire fue obtenida a través de la **Ec. 4.21** partiendo de la velocidad representativa en el escalón No. 92

obtenida de la modelación numérica de la instalación experimental debidamente calibrada.

Tabla No. 4.1: Resultados obtenidos a partir de la modelación numérica en ANSYS y comparación con los resultados obtenidos mediante el análisis experimental para el diseño modificado M2.

RESULTADOS EN LA REGIÓN UNIFORME, DISEÑO MODIFICADO		
PRUEBA	Caudal	Velocidad Representativa en el Escalón No. 92
	Q	Vr
	l/s	m/s
P0 – DM2	14.35	2.20
P1 – DM2	23.35	2.80
P2 – DM2	33.67	4.00
P3 – DM2	44.15	4.50
P4 – DM2	55.71	5.00
P5 – DM2	78.05	5.20

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Una vez obtenida la velocidad representativa en el escalón número 92 mediante el modelo numérico, mismo que fue calibrado con las mediciones realizadas en el modelo físico, se obtiene la profundidad de agua clara aplicando la siguiente ecuación:

$$y_w = \frac{q}{v_w} \quad (4-1)$$

Donde:

y_w: Profundidad de agua clara (m)

q: Caudal (m³/s.m)

v_w: Velocidad de agua clara, obtenida con la modelación numérica (m/s)

La profundidad de agua clara se determina mediante la siguiente expresión:

$$y_w = (1 - C_m) \cdot y_{90} \quad (4-2)$$

Donde:

y_w : Profundidad de agua clara (m)

C_m : Concentración media de aire (fracción)

y_{90} : Profundidad aireada al 90% (m)

Una vez que se obtiene la profundidad de agua clara y con la profundidad aireada al 90% medida en la instalación experimental, se puede despejar de la fórmula anterior la concentración media de aire.

$$C_m = \left(1 - \frac{y_w}{y_{90}} \right) \quad (4-3)$$

Los valores obtenidos para el valor de concentración media de aire con diseño modificado M1 se presentan en la **Tabla No. 4.2**.

Tabla No. 4.2: Determinación de la concentración media de aire para la rápida escalonada con diseño modificado.

PRUEBA	Caudal Q	Caudal Unitario q	Velocidad Representativa en el Escalón No. 92	Profundidad de agua clara (y_w) Numérico	y_{90} (Instalación Experimental)	Concentración Media de Aire
	(l/s)	(m ³ /s.m)	m/s	(cm)	(cm)	-
P0 – DM2	14.42	0.028	2.20	0.98	1.8	0.456
P1 – DM2	23.68	0.046	2.80	1.29	2.9	0.556
P2 – DM2	33.48	0.067	4.00	1.61	3.9	0.587
P3 – DM2	44.58	0.086	4.50	1.87	4.9	0.619
P4 – DM2	55.97	0.108	5.00	2.15	6.0	0.641
P5 – DM2	77.89	0.150	5.20	2.60	7.2	0.639
					$C_m =$	0.583

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Con la concentración media de aire obtenida se procede a recalcular la profundidad de agua clara mediante la siguiente fórmula:

$$y_w = (1 - C_m) * y_{90} \quad (4-4)$$

Donde:

Y_w : Profundidad de agua clara (SI)

y_{90} : Profundidad de agua con una concentración de aire de 90% (SI)

C_m : Concentración media de aire

Para el cálculo del factor de fricción se utiliza la siguiente formula:

$$f_e = \frac{8 \times g \times \text{sen } \alpha \times y_w^3}{q^2} \quad (4-5)$$

Donde:

Y_w : Profundidad de agua clara (SI)

f_e : factor de fricción

g : Aceleración de la gravedad (9.81m/s²)

q : Caudal unitario (m³/s.m)

α : Ángulo de inclinación de la rápida

A continuación, se presentan los valores de los factores de fricción para los calados máximos y mínimos de cada prueba:

Tabla No. 4.3: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Geometría Modificada M1 (calados máximos).

FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY CORRESPONDIENTE AL FLUJO AIRE - AGUA (f_e)							
PRUEBA	Caudal (Q)	Caudal Unitario (q)	Profundidad ($y_{90\text{máx}}$)	C_m	Profundidad (y_w)	f_e	f_e promedio
	(l/s)	(m ³ /s/m)	(cm)	-	(cm)	-	
P0 – DM1	14.35	0.028	3.00	0.583	1.25	0.141	0.140
P1 – DM1	23.35	0.045	4.00		1.67	0.126	
P2 – DM1	33.67	0.066	5.20		2.17	0.134	
P3 - DM1	44.15	0.086	6.70		2.79	0.166	
P4 - DM1	55.71	0.108	7.40		3.08	0.141	
P5 - DM1	78.05	0.151	9.00		3.75	0.129	

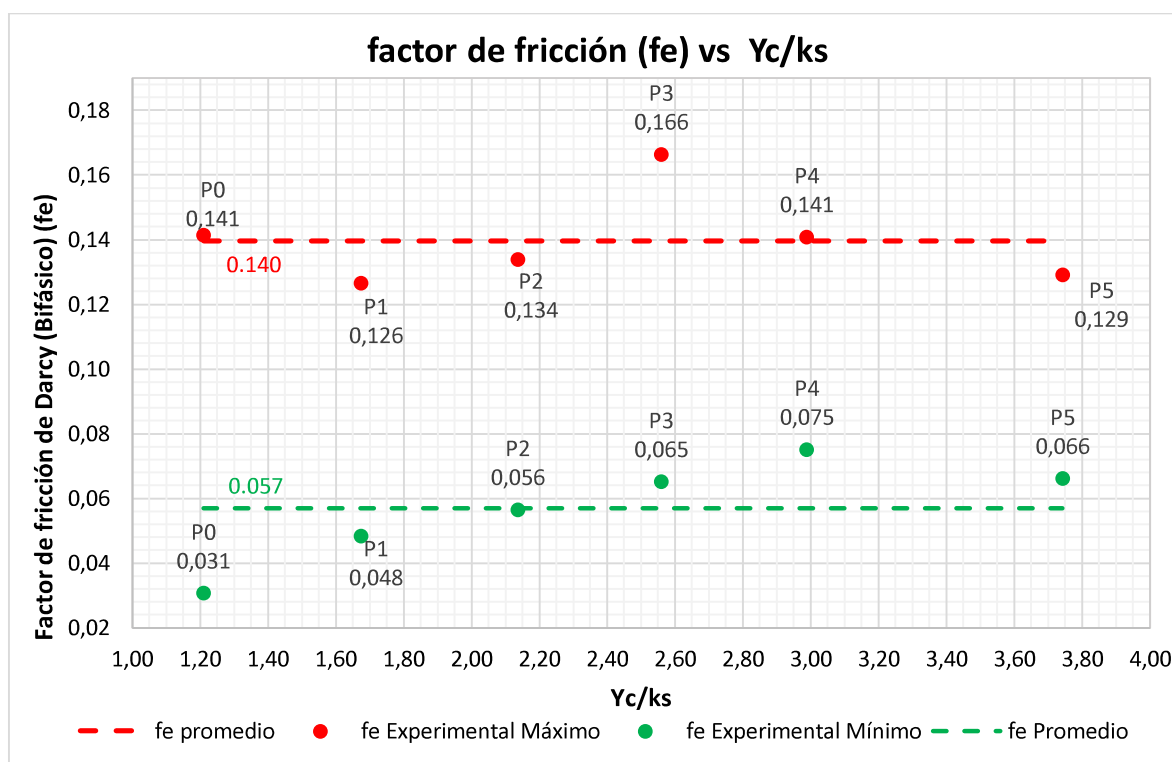
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 4.4: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Modificada M1 (calados mínimos).

FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY CORRESPONDIENTE AL FLUJO AIRE - AGUA (f_e) (Rápida Escalonada, Geometría Original, Calados Mínimos)							
PRUEBA	Caudal (Q)	Caudal Unitario (q)	Profundidad (y_{90min})	C_m	Profundidad (y_w)	f_e	f_e promedio
	(l/s)	($m^3/s/m$)	(cm)	-	(cm)	-	
P0 – DM1	14.35	0.028	1.80	0.583	0.75	0.031	0.057
P1 – DM1	23.35	0.045	2.90		1.21	0.048	
P2 – DM1	33.67	0.066	3.90		1.63	0.056	
P3 - DM1	44.15	0.086	4.90		2.04	0.065	
P4 - DM1	55.71	0.108	6.00		2.50	0.075	
P5 - DM1	78.05	0.151	7.20		3.00	0.066	

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.9: Valores de factores de fricción para calados máximos y mínimos.



La **Tabla No. 4.3** muestra los resultados del factor de fricción para los calados máximos el rango va desde 0.126 hasta 0.166 con un valor promedio de 0.140, en la

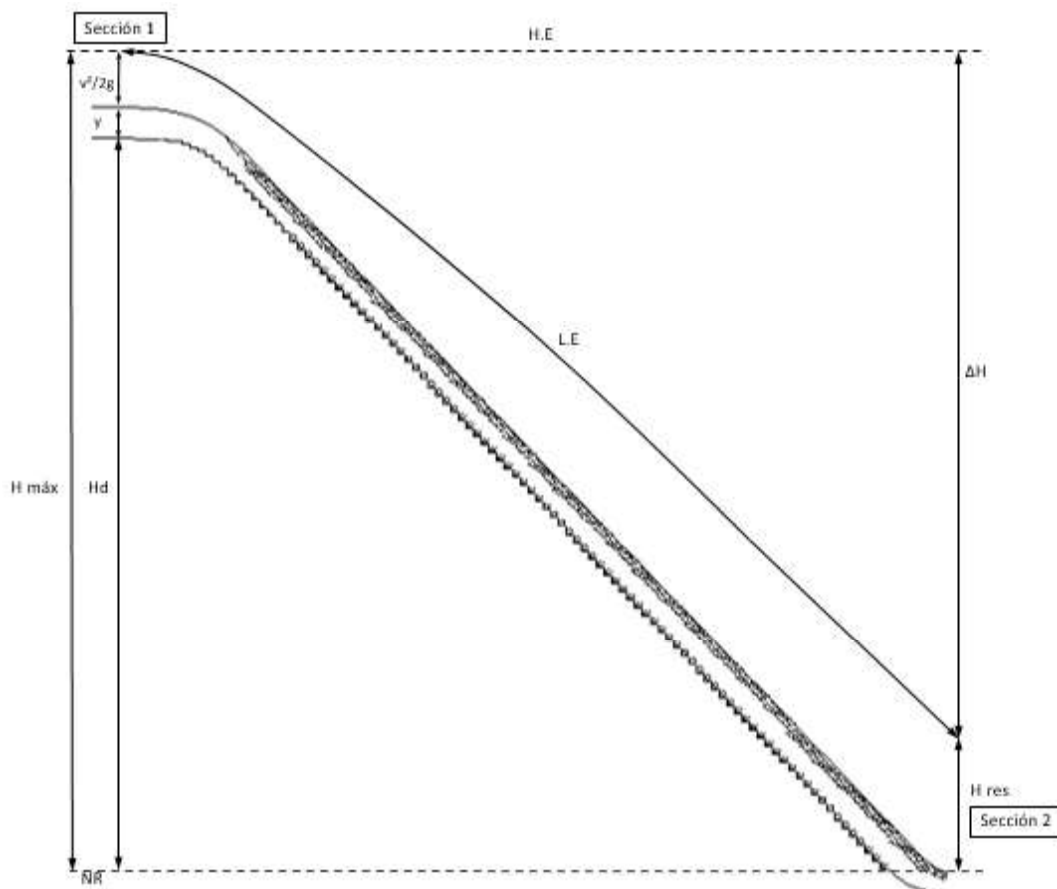
Tabla No. 4.4 la cual muestra los valores del factor de fricción para los calados mínimos tomados en la instalación en el escalón No. 92, los valores van desde 0.031 hasta 0.075 con un valor promedio de 0.057. Todos estos valores se los muestra en el **Gráfico No. 4.9**

4.3.5. DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Uno de los objetivos de esta investigación es la evaluación de la disipación de energía en la rápida escalonada en condiciones de flujo rasante.

Se ha realizado el cálculo relacionando la energía total aguas arriba en la estructura de aproximación (E_1) y la energía al final de la rápida (E_2), mediante el Principio de Conservación de Energía.

Figura No. 4.2: Esquema de las secciones del volumen de control para la determinación de la disipación de energía a lo largo de la Rápida Escalonada.



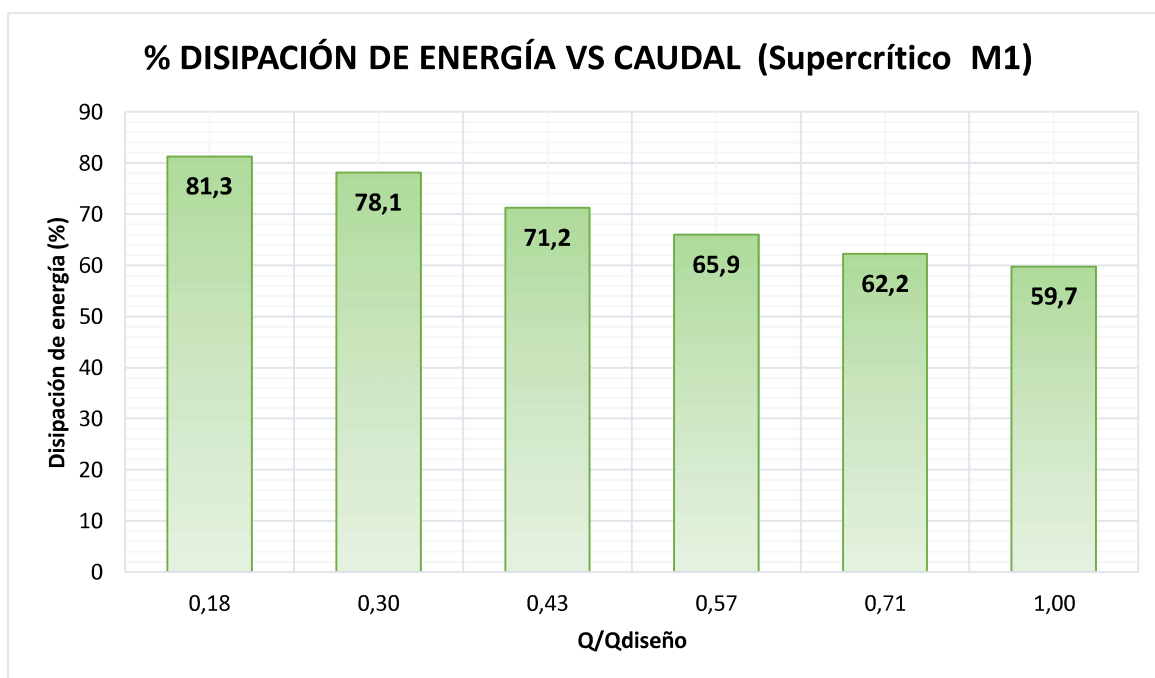
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 4.5: Porcentaje de disipación de energía en la rápida escalonada con geometría modificada M1.

PRUEBA	Caudal	Caudal Unitario	Energía Canal de Aproximación	Energía Canal de Salida	ΔE (m)	Porcentaje Disipación de Energía
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	$E_1 = E_t$ (m)	$E_2 = E_r$ (m)	ΔE (m) = $E_t - E_r$	$\Delta E/E_t$ (%)
P0 – DM1	14.35	0.028	4.74	0.89	3.85	81.3
P1 – DM1	23.35	0.045	4.78	1.05	3.73	78.1
P2 – DM1	33.67	0.065	4.83	1.39	3.44	71.2
P3 – DM1	44.15	0.085	4.87	1.66	3.21	65.9
P4 – DM1	55.71	0.108	4.90	1.85	3.05	62.2
P5 – DM1	78.05	0.151	4.98	2.00	2.98	59.7

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.10: Porcentajes de disipación de energía en la rápida escalonada con geometría modificada M1.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

En la **Tabla No. 4.5** y el **Gráfico No. 4.10**, se muestra que la instalación experimental genera una disipación de energía entre el 59.7% y 81.3%. El porcentaje de disipación de energía es menor para caudales altos, y su valor aumenta a medida que el caudal disminuye.

4.3.6. CURVAS ADIMENSIONALES

4.3.6.1. ZONA NO AIREADA

Los parámetros adimensionales π , obtenidos en base al teorema de Buckingham pueden ser objeto de operaciones aritméticas que permiten combinar un parámetro con otro, en el numeral 3.1.1 se obtuvieron las ecuaciones (3-1) y (3-2) las cuales serán graficadas con los datos medidos en la instalación experimental.

A continuación, se presentan las ecuaciones adimensionales obtenidas mediante el análisis dimensional:

$$\frac{L_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

$$\frac{y_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

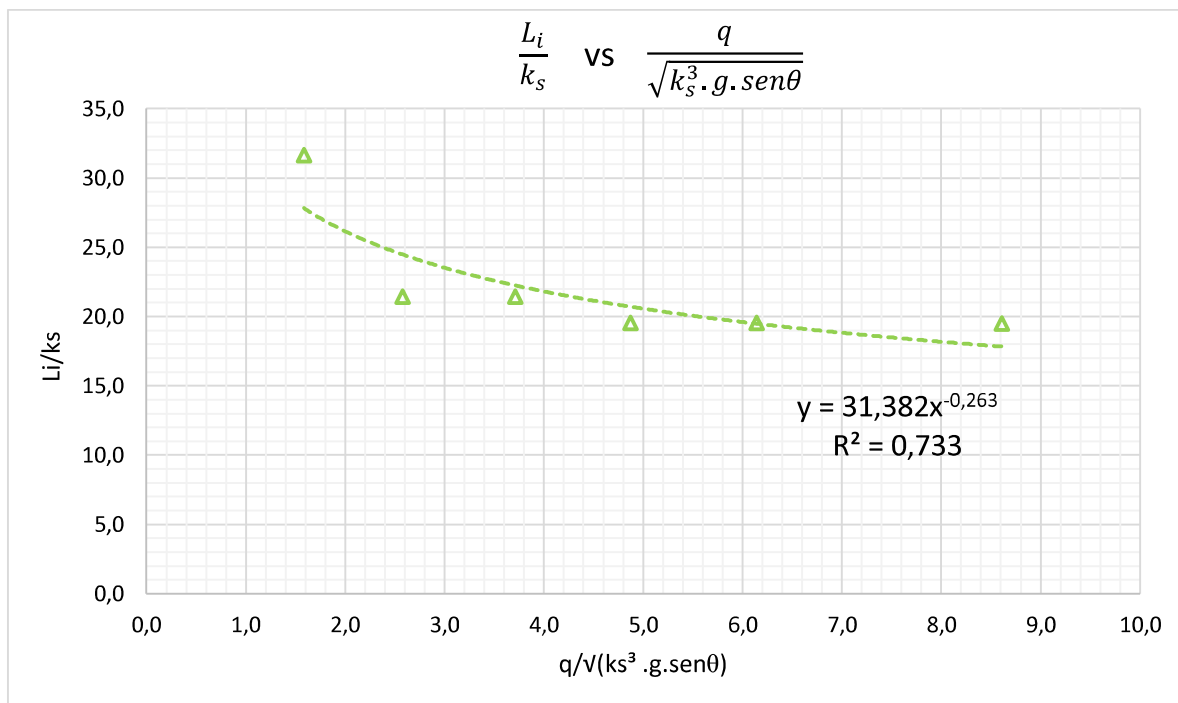
En la **Tabla No. 4.6** se presentan los valores calculados para los parámetros adimensionales correspondientes al plan de pruebas ejecutado en la instalación experimental.

Tabla No. 4.6: Cálculos de los parámetros adimensionales a ser analizados.

PRUEBA	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	K _s (m)	g (m/s ²)	L _i (m)	y _i (cm)	$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 \cdot g \cdot \text{sen}\theta}}$	$\frac{L_i}{k_s}$	$\frac{y_i}{k_s}$
P0 – DM2	14.35	0.028	0.035	9.81	1.12	2.2	1.6	31.7	0.6
P1 – DM2	23.35	0.045			0.76	2.6	2.6	21.5	0.7
P2 – DM2	33.67	0.065			0.76	2.7	3.8	21.5	0.8
P3 – DM2	44.15	0.085			0.69	4.4	4.9	19.6	1.2
P4 – DM2	55.71	0.108			0.69	6.2	6.2	19.6	1.7
P5 – DM2	78.05	0.151			0.69	7.2	8.6	19.5	2.0
<p>K_s: Rugosidad de forma</p> <p>L_i: Distancia al punto de inicio de aireación desde el umbral de la rápida</p> <p>y_i: Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación</p>									

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.11: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la Ec. (3-1).



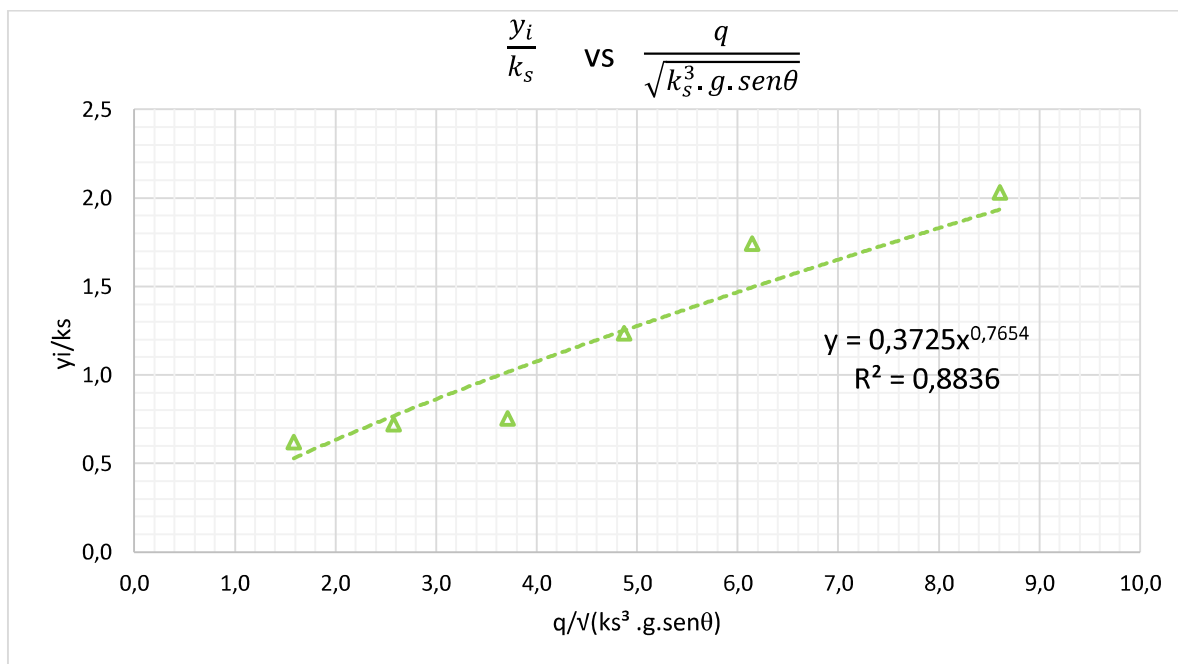
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{L_i}{k_s} = 31,382 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{-0,263} \quad (4-6)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental en el **Gráfico No. 4.25** se observa la tendencia que genera la ecuación (4-6) con coeficiente de correlación $R^2=0.733$, esta servirá para establecer la longitud del inicio de auto aireación medida desde la cresta de la rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que la longitud del inicio de auto aireación disminuye con el incremento del caudal unitario.

Gráfico No. 4.12: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la Ec. (3-2).



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{y_i}{k_s} = 0,3725 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{0,7654} \quad (4-7)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental, en el **Gráfico No. 4.26** se observa la tendencia que genera la ecuación (4-7) con coeficiente de correlación $R^2=0.8836$, esta servirá para establecer la profundidad del flujo en el punto de inicio de la auto aireación en una rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que la profundidad del punto de inicio de la auto aireación aumenta con el incremento del caudal unitario.

4.3.6.2. ZONA AIREADA

Los parámetros adimensionales π , obtenidos en base al teorema de Buckingham pueden ser objeto de operaciones aritméticas que permiten combinar un parámetro

con otro, en el numeral 3.1.2 se obtuvieron las ecuaciones (3-3) y (3-4) que van a ser graficadas con los datos medidos en la instalación experimental.

A continuación, se presentan las ecuaciones adimensionales obtenidas mediante el análisis dimensional:

$$\frac{y_u}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

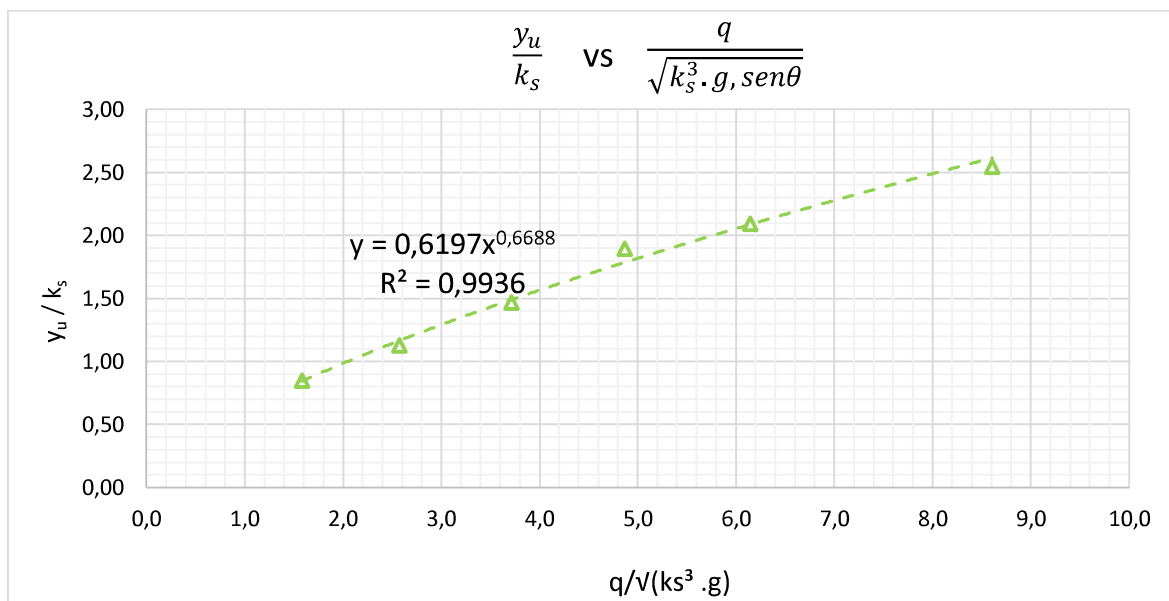
$$\frac{E_t - E_r}{E_t} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

Tabla No. 4.7: Cálculos para determinar los valores de los parámetros adimensionales a analizarse en la rápida escalonada con geometría modificada M1.

PRUEBA	Caudal	Caudal Unitario	E. Canal de Aproximación	E. Canal de Salida	ΔE (m)	$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}}$	Disipación de Energía	$\frac{y_u}{k_s}$
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	E ₁ =E _t (m)	E ₂ =E _r (m)	ΔE (m) = E _t -E _r		$\Delta E/E_1$ (%)	
P0 - DM1	14.35	0.028	4.74	0.89	3.85	1.6	81.3	0.8
P1 - DM1	23.35	0.045	4.78	1.05	3.73	2.6	78.1	1.1
P2 - DM1	33.67	0.066	4.83	1.39	3.44	3.8	71.2	1.5
P3 - DM1	44.15	0.086	4.87	1.66	3.21	4.9	65.9	1.9
P4 - DM1	55.71	0.108	4.90	1.85	3.05	6.2	62.2	2.1
P5 - DM1	78.05	0.151	4.98	2.0	2.98	8.6	59.7	2.5

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.13: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ecuación (3-3).



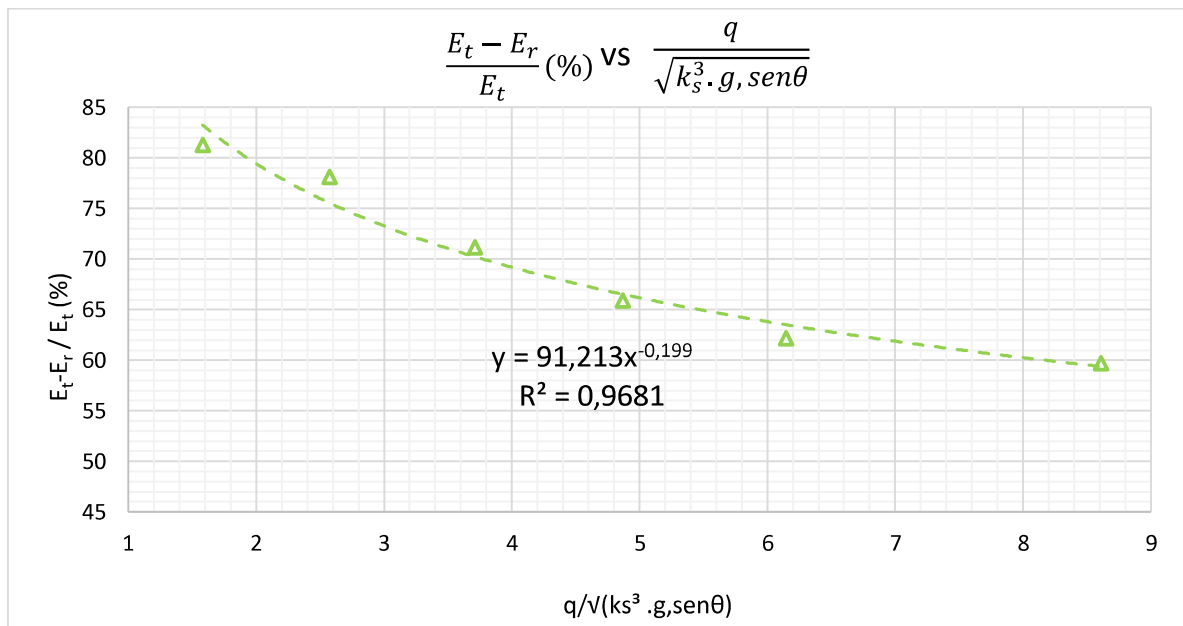
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{y_u}{k_s} = 0,6197 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{0,6688} \quad (4-8)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental, en el **Gráfico No. 4.27** se observa una tendencia que genera la ecuación (4-8) con coeficiente de correlación $R^2=0,9936$, esta servirá para establecer la profundidad de flujo en la zona uniforme de una rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que la profundidad de flujo en la zona uniforme aumenta con el incremento del caudal unitario.

Gráfico No. 4.14: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ecuación (3-4).



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{\Delta E}{E_t} = 91.213 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{-0.199} \quad (4-9)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental en el **Gráfico No. 4.28** se obtiene una tendencia que genera la ecuación (4-9) con un coeficiente de correlación $R^2=0.9681$, esta servirá para establecer el porcentaje de disipación de energía en la zona uniforme de la rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que el porcentaje de disipación de energía disminuye con el incremento del caudal unitario.

COMPARACION ENTRE LOS RESULTADOS DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA MODIFICADA M1 Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS EXPRESIONES DE LA LITERATURA TECNICA.

Según la literatura técnica disponible existen fórmulas para el cálculo de la concentración media de aire, factor de fricción y la energía residual sin la necesidad

de tener datos prácticos obtenidos en una instalación experimental, para estos cálculos se empleó las siguientes ecuaciones propuestas en los diferentes estudios disponibles.

Tabla No. 4.8: Comparación de las concentraciones medias de aire calculadas teórica y experimentalmente con geometría modificada M1.

Autor	Ecuación	C _m (Teórico)	C _m (Experimental)
Hager (1991)	$C_m = 0.75 (\sin \alpha)^{0.75}$	0.578	0.583
Chanson (1994)	$C_m = 0.8 \sin \alpha$	0.566	
Matos (1999)	$C_m = 0.76 (\sin \alpha)^{0.82}$	0.572	

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Según la **Tabla No. 4.8** el valor de la concentración media obtenida experimentalmente es muy cercana a los valores obtenidos teóricamente para las diferentes ecuaciones propuestas por diferentes autores, las ecuaciones utilizadas tienen la característica de calcular la concentración media de aire en la zona de flujo uniforme que es la zona en donde se obtuvo en la instalación la concentración media de aire.

Tabla No. 4.9: Comparación de los factores de fricción calculados teóricamente y los factores de fricción calculados con el modelo físico.

Prueba	f _e (Teórico)		f _e (Experimental)
	Boes y Minor (2002)	Chinnarasri (2002)	-
P0	0.077	0.536	0.141
P1	0.072	0.424	0.126
P2	0.069	0.360	0.134
P3	0.066	0.325	0.166
P4	0.064	0.298	0.141
P5	0.061	0.264	0.129

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Según la **Tabla No. 4.9** los factores de fricción obtenidos experimentalmente se encuentran dentro del rango de los valores calculados con las ecuaciones teóricas, para la aplicación de estas se deben cumplir ciertas condiciones, mismas que la instalación experimental sí cumple.

Tabla No. 4.10: Comparación de la disipación de energía entre los cálculos obtenidos del modelo físico y los cálculos teóricos.

Prueba	% Disipación de Energía (Teórico)		% Disipación de Energía (Experimental)
	Chanson (1994a)	Boes (2000)	
P0	94.2	94.1	81.3
P1	91.5	91.3	78.1
P2	89.6	89.2	71.2
P3	89.3	88.9	65.9
P4	86.2	85.7	62.2
P5	82.0	81.4	59.7

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Las ecuaciones aplicadas para la comparación entre resultados teóricos y los resultados obtenidos experimentalmente son para calcular la energía residual en la zona de flujo uniforme.

Según la **Tabla No. 4.10** la disipación de energía obtenida experimentalmente para cada prueba es menor que la que se esperaba obtener mediante los cálculos teóricos.

4.3.7. CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA GEOMETRÍA MODIFICADA M1

- La primera modificación geométrica (Geometría Modificada M1) es un perfil curvo liso que funciona como enlace entre el canal de aproximación y la rápida escalonada. Su diseño se ajusta al perfil de separación de flujo observado al ejecutar el caudal máximo del plan de pruebas en la geometría original, el objetivo de esta modificación geométrica es evitar la separación del flujo. La calibración geométrica para determinar la desviación entre los planos de diseño y la estructura implementada fue realizada mediante levantamiento planimétrico y altimétrico con la ayuda de estación total y nivel topográfico. Como resultados se obtuvieron desviaciones menores al 1%, lo cual está dentro de los límites aceptados para validar geoméricamente la instalación.

- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría modificada M1, se observa un comportamiento hidráulico inverso al observado con la geometría original, es decir, un comportamiento hidráulico inadecuado para caudales menores y adecuado para caudales mayores. Para el rango de caudales entre 14 – 44 l/s (P0 – P3) se produce un rebote que provoca la ausencia de flujo en las cavidades de los primeros escalones de la unión entre el perfil curvo liso y el fondo escalonado. Para el rango de caudales entre 56 – 78 l/s (P4 – P5) el comportamiento hidráulico mejora debido a que el caudal circulante es mayor y eso minimiza el efecto de los rebotes. Con respecto al perfil curvo liso se observa que cumple con su objetivo de diseño que es evitar la separación de la lámina inferior del flujo con la estructura para todo el rango de caudales establecido en el plan de pruebas.
- Las gráficas adimensionales muestran un valor positivo más alto de 0.48 y se produce en el inicio del perfil curvo liso en la prueba P0, mientras que el valor negativo es -0.32 y se ubica en el punto medio del perfil curvo liso en la prueba P5. Estos valores están dentro de rangos que respaldan el correcto funcionamiento del perfil curvo liso.
- Los factores de fricción resultantes para esta geometría fueron calculados con los datos obtenidos de la medición de profundidades mínimas y máximas en la zona uniforme (escalón # 92), debido a la naturaleza oscilatoria del flujo se procedió a medir un rango de profundidades para todos los caudales del plan de pruebas. Para cada prueba se registró su profundidad mínima y máxima, con estas se obtuvo una concentración media de aire de 0.583 y un valor promedio del factor de fricción con calados mínimos de 0.057 y un valor promedio del factor de fricción con calados máximos de 0.140.
- La disipación de energía producida en la instalación experimental presenta una tendencia inversa al caudal, es decir, la disipación de energía es mayor mientras menor es el caudal. Los valores de disipación de energía para esta geometría varían desde 59.7% para P5 (78 l/s) hasta 81.3% para P0 (14 l/s).

- Las curvas adimensionales obtenidas para esta geometría representan la tendencia de resultados obtenidos experimentalmente, su objetivo es ser una herramienta de apoyo para el diseñador hidráulico que permita lograr diseños adecuados.
- Con la finalidad de corregir los rebotes que se generan en los primeros escalones de la unión entre el perfil curvo liso y el fondo escalonado, se plantea una nueva modificación geométrica que sustituye el perfil liso por un perfil escalonado manteniendo su misma curvatura.

4.4. DISEÑO MODIFICADO M2

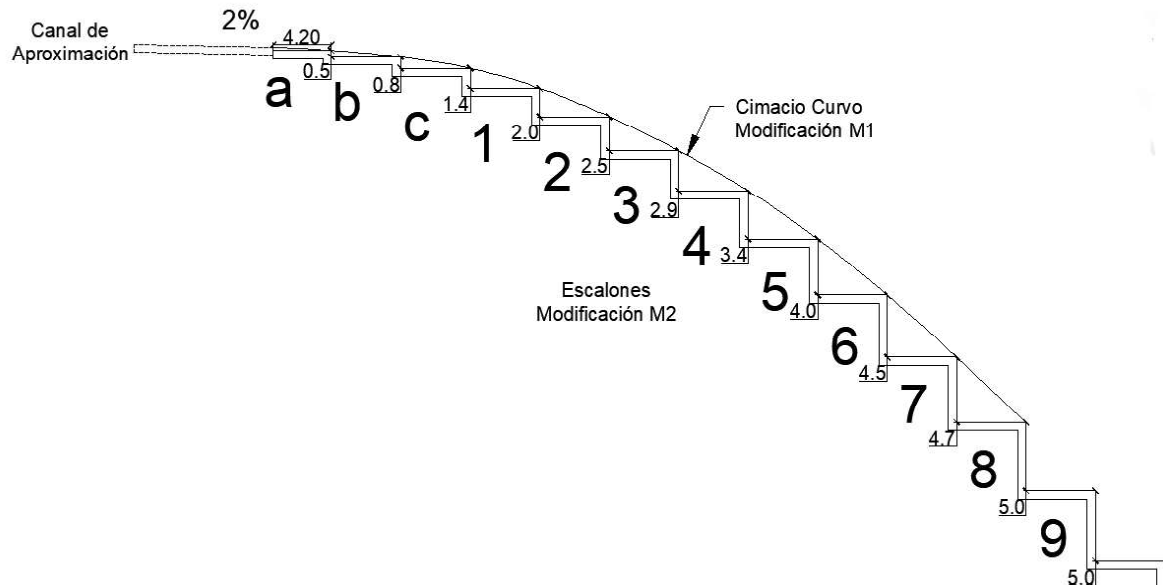
A partir de los resultados observados al ejecutar el plan de pruebas en la instalación experimental con la geometría de M1, se propone una segunda modificación (M2) que tiene como objetivo subsanar comportamientos hidráulicos inadecuados presentados en M1, específicamente los rebotes observados en los primeros escalones debido al choque del flujo en la transición entre el perfil curvo liso y la rápida escalonada. Estos rebotes producen salpicadura y el caudal del rebote se salta cierto número de escalones, lo cual probablemente influye en la eficiencia en disipación de energía.

4.4.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M2

El perfil curvo liso implementado en la geometría modificada M1 corrigió adecuadamente el problema de separación del flujo del fondo del canal observado en la geometría original, sin embargo, su implementación generó la presencia de rebotes debido a choques del flujo con los primeros escalones del fondo escalonado. Debido a esto, se propone como segunda modificación reemplazar el cimacio curvo liso por un cimacio curvo escalonado manteniendo el mismo perfil superior con los vértices formados en la unión entre huella y contrahuella de los escalones. Para conservar el perfil curvo superior se ha mantenido la longitud de huella en 5 (cm) y la altura de la contrahuella es variable en cada escalón ya que se extiende hasta la intersección con el perfil curvo. Este perfil escalonado fue

construido en acrílico utilizando la ecuación ajustada del perfil curvo aplicado en M1.

Figura No. 4.3: Dimensiones de los escalones de la modificación M2.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

*Las huellas miden 5 cm a excepción de la primera que tiene 4.20 cm de dimensión.

Fotografía No. 4.17: Vista lateral de la Instalación experimental con el perfil curvo escalonado instalado.



4.4.2. RESULTADOS DEL DISEÑO MODIFICADO M2

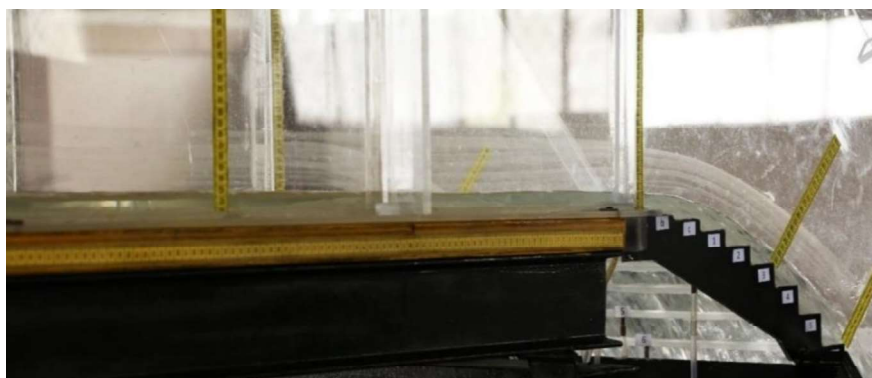
Después del diseño, construcción e instalación de la Geometría Modificada M2, se procede a evaluar en la instalación experimental, el comportamiento hidráulico del flujo y la disipación de energía para el rango de caudales establecido en el plan de pruebas.

4.4.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

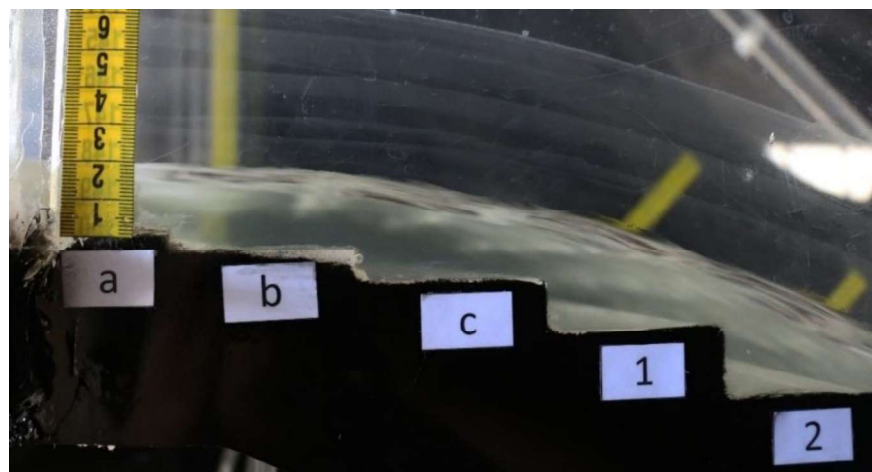
El registro fotográfico de ejecutar el plan de pruebas en la geometría modificada M2 se presenta a continuación para Q_{\min} y Q_{\max} . Los escenarios para los caudales restantes del plan de pruebas se muestran en el Anexo 6.

4.4.3.1. PRUEBA P0: $Q = 14,42$ l/s

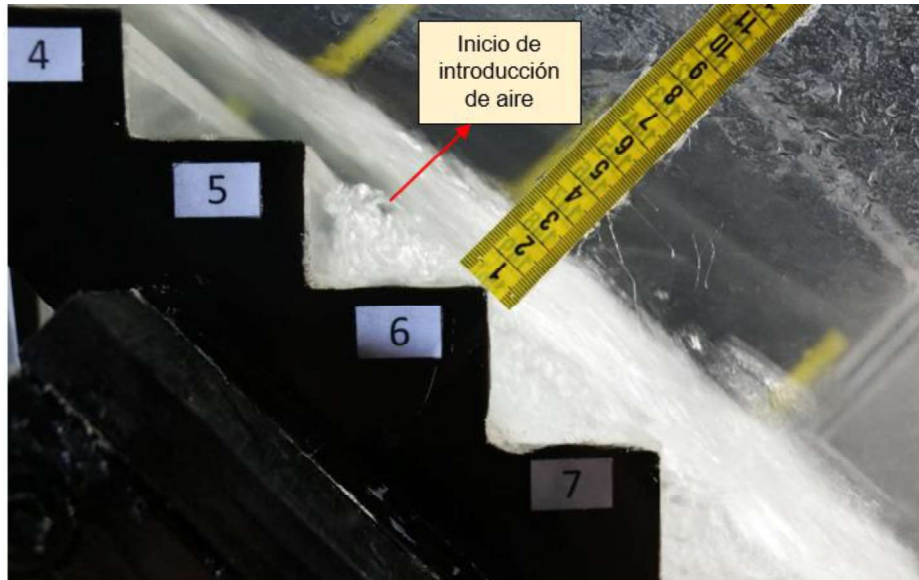
Fotografía No. 4.18: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.19: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.20: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



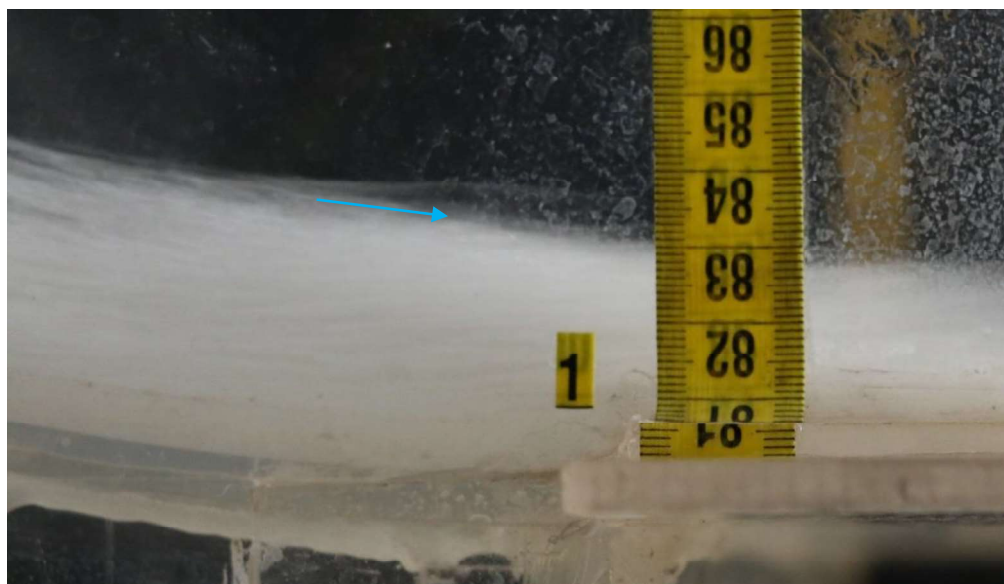
Fotografía No. 4.21: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.22: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.23: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.

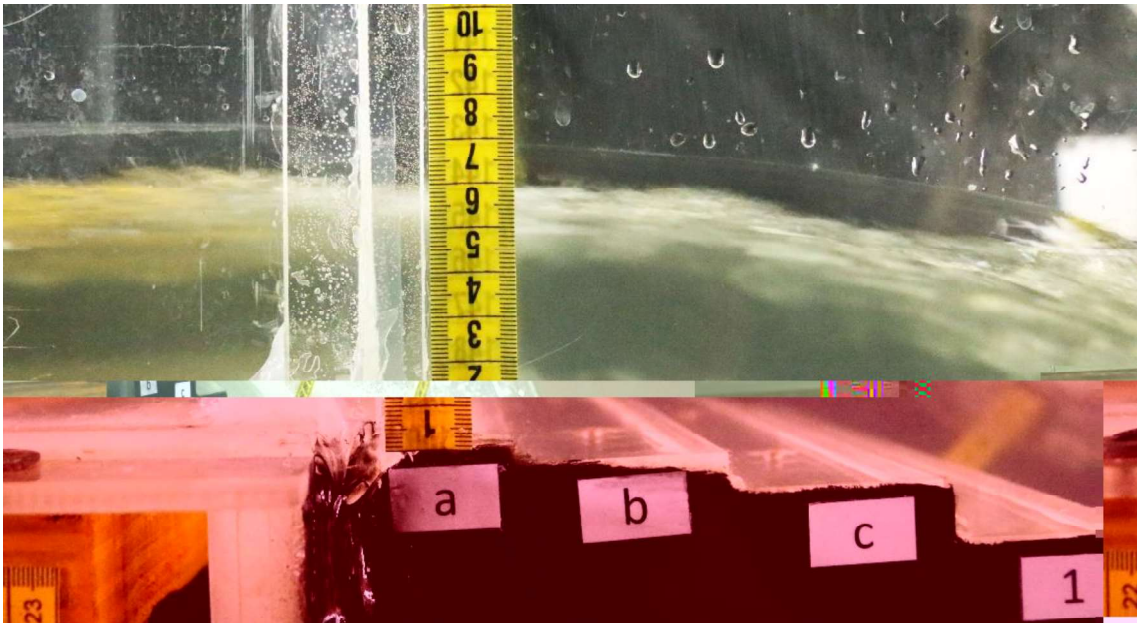


4.4.3.2. PRUEBA P5: $Q = 77.89 \text{ l/s}$

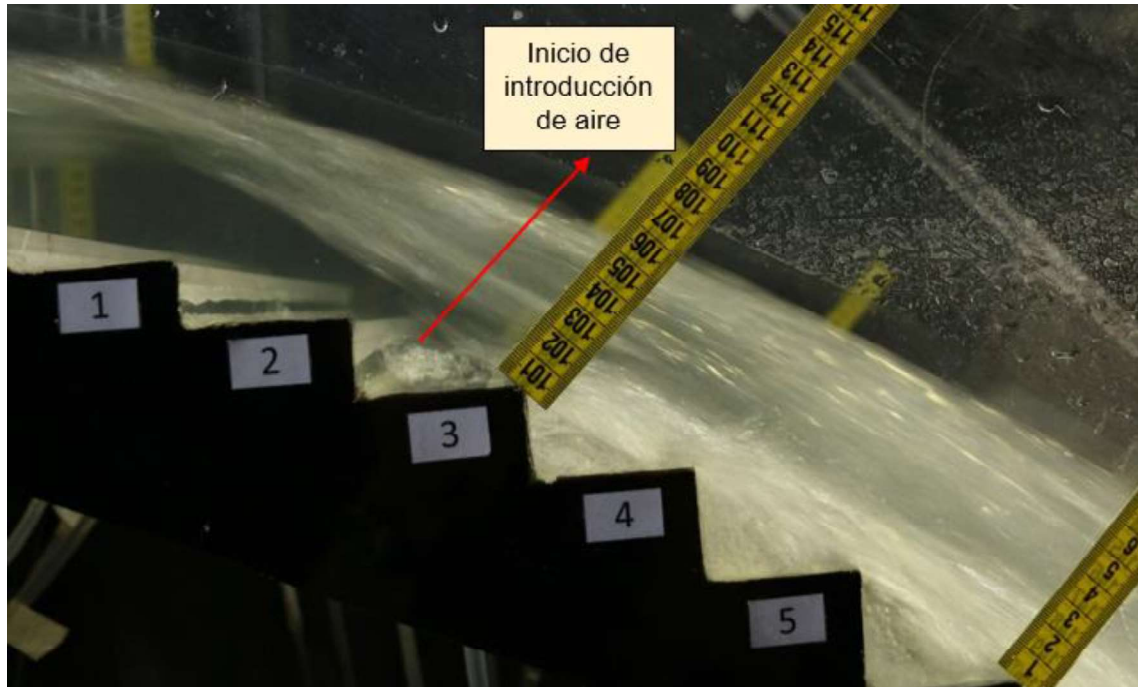
Fotografía No. 4.24: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.25: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



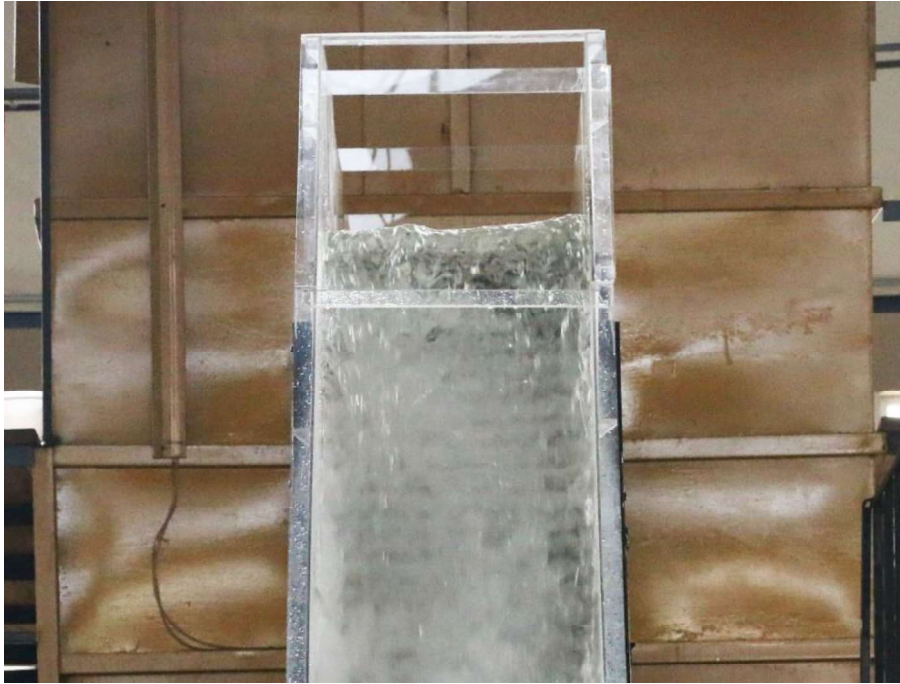
Fotografía No. 4.26: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.27: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.28: Prueba 5, Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.29: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 4.30: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.



Observaciones:

GEOMETRÍA MODIFICADA M2						
PRUEBA	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Q (L/s)	14,42	23,68	34,48	44,58	55,97	77,89
OBSERVACIÓN	UBICACIÓN					
Aparición de los primeros vórtices intermitentes e inicio de la aireación	Escalón #5	Escalón #6	Escalón #6	Escalón #5	Escalón #46	Escalón #3
Inicio de la vorticidad constante y completa a lo largo del escalón	Escalón #10	Escalón #9	Escalón #9	Escalón #9	Escalón #9	Escalón #7

GEOMETRÍA MODIFICADA M2						
PRUEBA	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Q (L/s)	14,42	23,68	34,48	44,58	55,97	77,89
OBSERVACIÓN	UBICACIÓN					
¿Existe separación entre el flujo y el fondo del perfil curvo escalonado de ingreso a la rápida escalonada?	NO	NO	NO	NO	NO	NO
¿Existe rebote debido a la transición del flujo desde la zona de ingreso hacia el perfil escalonado?	NO	NO	NO	NO	NO	NO
¿Existe salpicadura en el flujo?	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Punto inicial de la salpicadura	Escalón #10	Escalón #9	Escalón #9	Escalón #8	Escalón #7	Escalón #5
Punto final de la salpicadura	Escalón #16	Escalón #18	Escalón #19	Escalón #22	Escalón #25	Escalón #28
REGISTRO FOTOGRÁFICO	ANEXO 6					

4.4.4. FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH

El cálculo del factor de fricción se lo realiza en la zona uniforme del flujo rasante, para obtener este factor el primer paso es obtener la concentración media de aire. Para la geometría modificada M2, la concentración media de aire fue obtenida a través de la **Ec. 4.21** partiendo de la velocidad representativa en el escalón No. 92 obtenida de la modelación numérica de la instalación experimental debidamente calibrada.

Tabla No. 4.11: Resultados obtenidos a partir de la modelación numérica en ANSYS y comparación con los resultados obtenidos mediante el análisis experimental para el diseño modificado M2.

RESULTADOS EN LA REGIÓN UNIFORME, DISEÑO MODIFICADO M2		
PRUEBA	Caudal	Velocidad Representativa en el Escalón No. 92
	Q	Vr
	l/s	m/s
P0 – DM2	14.42	2.64
P1 – DM2	23.68	3.22
P2 – DM2	33.48	3.78
P3 – DM2	44.58	4.19
P4 – DM2	55.97	4.72
P5 – DM2	77.89	5.50

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Una vez obtenida la velocidad representativa en el escalón número 92 mediante el modelo numérico, mismo que fue calibrado con las mediciones realizadas en el modelo físico, se obtiene la profundidad de agua clara aplicando la siguiente ecuación:

$$y_w = \frac{q}{v_w} \quad (4-10)$$

Donde:

y_w : Profundidad de agua clara (m)

q : Caudal ($m^3/s.m$)

v_w : Velocidad de agua clara, obtenida con la modelación numérica (m/s)

La profundidad de agua clara se determina mediante la siguiente expresión:

$$y_w = (1 - C_m) \cdot y_{90} \quad (4-11)$$

Donde:

y_w : Profundidad de agua clara (m)

C_m : Concentración media de aire (fracción)

y_{90} : Profundidad aireada al 90% (m)

Una vez que se obtiene la profundidad de agua clara y con la profundidad aireada al 90% medida en la instalación experimental, se puede despejar de la fórmula anterior la concentración media de aire.

$$C_m = \left(1 - \frac{y_w}{y_{90}} \right) \quad (4-12)$$

Los valores obtenidos para el valor de concentración media de aire con diseño modificado M2 se presentan en la **Tabla No. 4.12**.

Tabla No. 4.12: Determinación de la concentración media de aire para la rápida escalonada con diseño modificado.

PRUEBA	Caudal Q	Caudal Unitario q	Velocidad Representativa en el Escalón No. 92	Profundidad de agua clara (y_w) Numérico	y_{90} (Instalación Experimental)	Concentración Media de Aire
	(l/s)	(m ³ /s.m)	m/s	(cm)	(cm)	-
P0 – DM2	14.42	0.028	2.64	1.05	2.2	0.521
P1 – DM2	23.68	0.046	3.22	1.42	3.4	0.582
P2 – DM2	33.48	0.067	3.78	1.76	4.4	0.600
P3 – DM2	44.58	0.086	4.19	2.05	4.8	0.572
P4 – DM2	55.97	0.108	4.72	2.29	5.7	0.598
P5 – DM2	77.89	0.150	5.50	2.73	6.5	0.579

$C_m =$	0.575
---------	-------

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

La metodología utilizada para el cálculo del factor de fricción en la zona de flujo uniforme es la misma que se aplica en el numeral 4.3.4 obteniendo los siguientes resultados para la modificación M2

Tabla No. 4.13: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Geometría Modificada M2 (calados máximos).

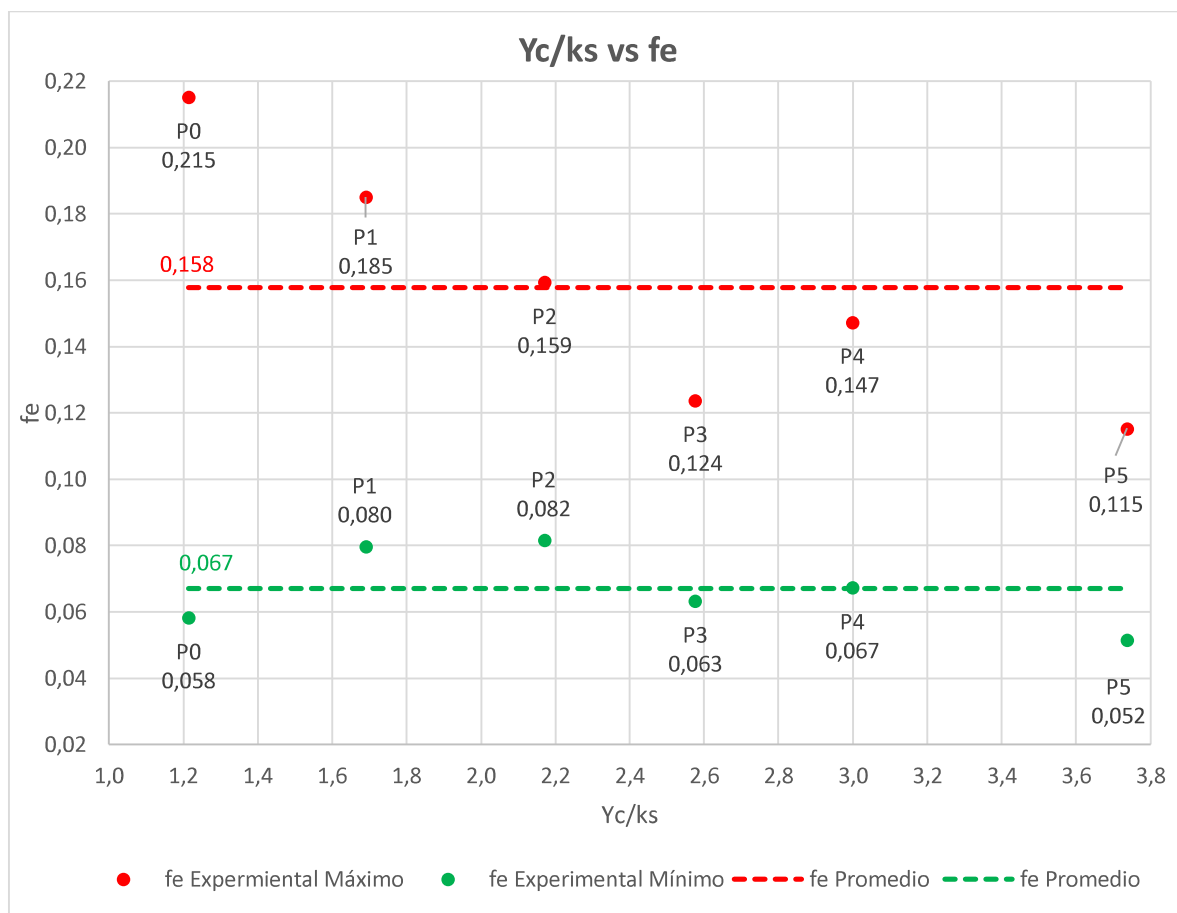
FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY CORRESPONDIENTE AL FLUJO AIRE - AGUA (fe)							
PRUEBA	Caudal (Q)	Caudal Unitario (q)	Profundidad (y_{90máx})	Cm	Profundidad (y_w)	f_e	f_e promedio
	(l/s)	(m³/s/m)	(cm)	-	(cm)	-	
P0 – DM2	14.42	0.028	3.40	0.575	1.44	0.215	0.158
P1 – DM2	23.68	0.046	4.50		1.91	0.185	
P2 – DM2	34.48	0.067	5.50		2.34	0.159	
P3 – DM2	44.58	0.086	6.00		2.55	0.124	
P4 – DM2	55.97	0.108	7.40		3.14	0.147	
P5 – DM2	77.89	0.150	8.50		3.61	0.115	

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 4.14: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico, Geometría Modificada M2 (calados mínimos).

FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY CORRESPONDIENTE AL FLUJO AIRE - AGUA (fe) (Rápida Escalonada, Geometría Original, Calados Mínimos)							
PRUEBA	Caudal (Q)	Caudal Unitario (q)	Profundidad (y_{90min})	Cm	Profundidad (y_w)	f_e	f_e promedio
	(l/s)	(m³/s/m)	(cm)	-	(cm)	-	
P0 – DM2	14.42	0.028	2.20	0.575	0.93	0.058	0.067
P1 – DM2	23.68	0.046	3.40		1.44	0.080	
P2 – DM2	34.48	0.067	4.40		1.87	0.082	
P3 – DM2	44.58	0.086	4.80		2.04	0.063	
P4 – DM2	55.97	0.108	5.70		2.42	0.067	
P5 – DM2	77.89	0.150	6.50		2.76	0.052	

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.15: Valores de factores de fricción para calados máximos y mínimos

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

De la **Tabla No. 4.13** que muestra los resultados del factor de fricción para los calados máximos, el rango va desde 0.115 hasta 0.215 con un valor promedio de 0.158. En la **Tabla No. 4.14** se muestran los valores del factor de fricción para los calados mínimos tomados en el escalón No. 92, los valores van desde 0.052 hasta 0.082 con un valor promedio de 0.067. Todos estos valores son mostrados en el **Gráfico No. 4.15**.

4.4.5. DISIPACIÓN DE ENERGÍA

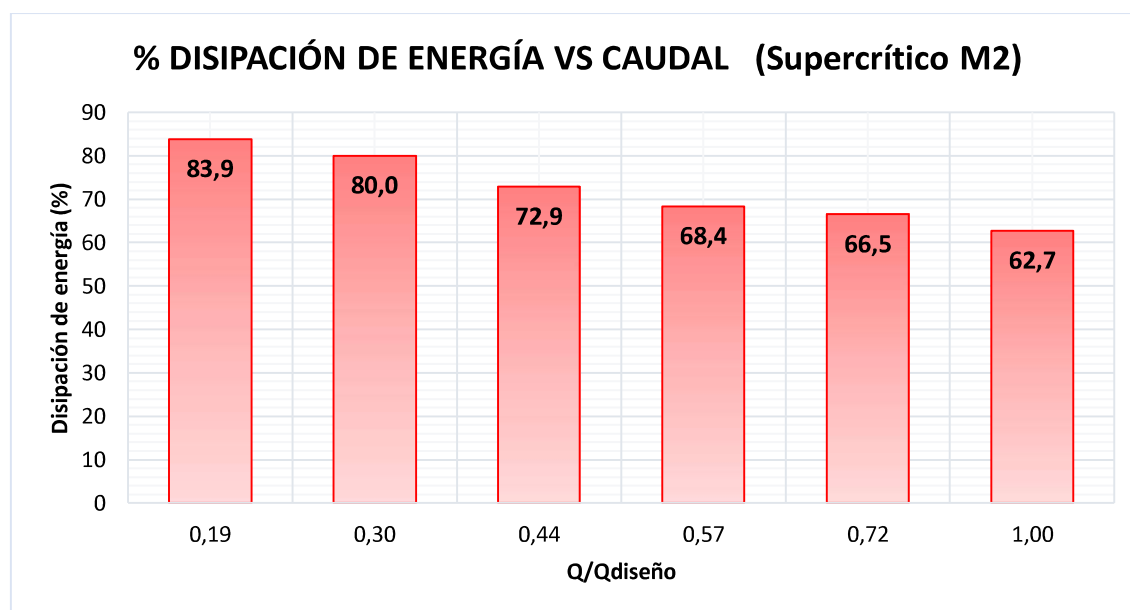
El cálculo de la disipación de energía para la geometría modificada M2 es realizada bajo la misma metodología aplicada en la geometría modificada M1, esta se encuentra descrita en el numeral 4.3.5.

Tabla No. 4.15: Porcentaje de disipación de energía en la instalación experimental con geometría modificada M2.

Número de Prueba	Caudal	Caudal Unitario	Energía Canal de Aproximación	Energía Canal de Salida	ΔE (m)	Porcentaje Disipación de Energía
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	$E_1 = E_t$ (m)	$E_2 = E_r$ (m)	ΔE (m) = $E_t - E_r$	$\Delta E/E_t$ (%)
P0 – DM2	14.42	0.028	4.73	0.76	3.88	83.9
P1 – DM2	23.68	0.046	4.78	0.95	3.78	80.0
P2 – DM2	33.48	0.067	4.83	1.31	3.49	72.9
P3 – DM2	44.58	0.086	4.87	1.54	3.28	68.4
P4 – DM2	55.97	0.108	4.90	1.64	3.12	66.5
P5 – DM2	77.89	0.150	4.98	1.86	3.05	62.7

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.16: Porcentajes de disipación de energía en la rápida escalonada con geometría modificada M2.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Según la **Tabla No. 4.15** y el **Gráfico No. 4.16**, la instalación experimental genera una disipación de energía entre el 59.7% y 81.3%. El porcentaje de disipación de energía es menor para caudales altos, y su valor aumenta a medida que el caudal disminuye.

4.4.6. CURVAS ADIMENSIONALES

4.4.6.1. ZONA NO AIREADA

Los parámetros adimensionales π , obtenidos en base al teorema de Buckingham pueden ser objeto de operaciones aritméticas que permiten combinar un parámetro con otro, en el numeral **3.1.1** se obtuvieron las ecuaciones (**3-1**) y (**3-2**) las cuales van a ser graficadas con los datos medidos en la instalación experimental.

A continuación, se presentan las ecuaciones adimensionales obtenidas mediante el análisis dimensional:

$$\frac{L_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

$$\frac{y_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

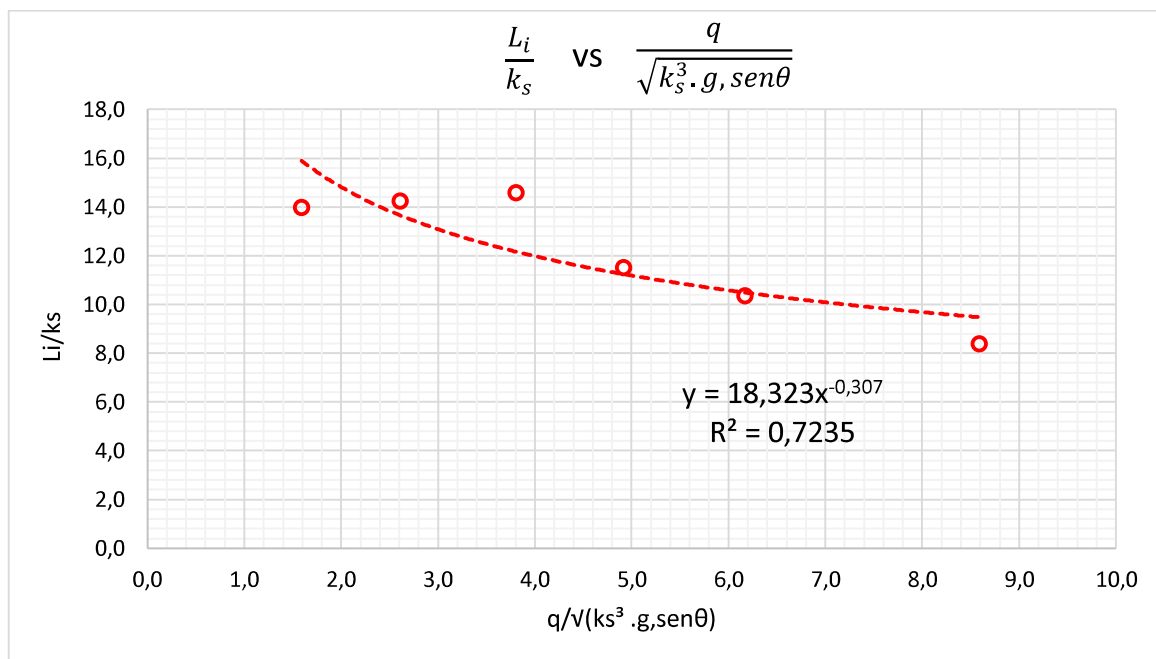
Tabla No. 4.16: Cálculos de los parámetros adimensionales a ser analizados en la instalación experimental.

PRUEBA	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	K _s (m)	g (m/s ²)	L _i (m)	y _i (cm)	$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 \cdot g \cdot \text{sen}\theta}}$	$\frac{L_i}{k_s}$	$\frac{y_i}{k_s}$
P0 – DM2	14.42	0.028	0.035	9.81	0.50	2.00	1.6	14.0	0.6
P1 – DM2	23.68	0.046			0.50	2.50	2.6	14.3	0.7
P2 – DM2	34.48	0.067			0.52	4.10	3.8	14.6	1.2
P3 – DM2	44.58	0.086			0.41	4.80	4.9	11.5	1.4
P4 – DM2	55.97	0.108			0.37	5.21	6.2	10.4	1.5
P5 – DM2	77.89	0.150			0.30	7.60	8.6	8.4	2.1

K_s: Rugosidad de forma
L_i: Distancia al punto de inicio de aireación desde el umbral de la rápida
y_i: Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.17: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ec. (3-1).



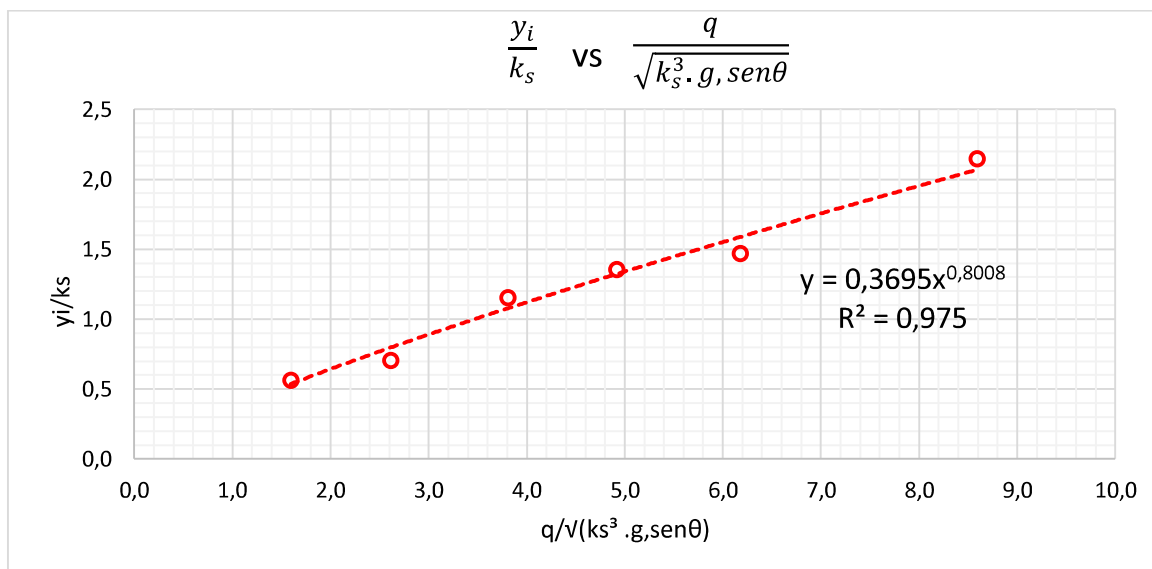
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{L_i}{k_s} = 18,323 * \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{-0,307} \quad (4-13)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental en el **Gráfico No. 4.17** se observa una tendencia que genera la ecuación (4-13) con coeficiente de correlación $R^2=0.7235$, esta servirá para establecer la longitud del inicio de auto aireación medida desde la cresta de la rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que la longitud del inicio de auto aireación disminuye con el incremento del caudal unitario.

Gráfico No. 4.18: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ec. (3-1)



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.3695 \left(\frac{q}{k_s^3 * g * \text{sen}\theta} \right)^{0.8008} \quad (4-14)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental en el **Gráfico No. 4.40** se observa una tendencia que genera la ecuación (4-14) con coeficiente de correlación $R^2=0.975$, esta servirá para establecer la profundidad del flujo en el punto de inicio de la auto aireación para una rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que la profundidad del punto de inicio de la auto aireación aumenta con el incremento del caudal unitario.

4.4.6.2. ZONA AIREADA

Los parámetros adimensionales π , obtenidos en base al teorema de Buckingham pueden ser objeto de operaciones aritméticas que permiten combinar un parámetro con otro, en el numeral 3.1.2 se obtuvieron las ecuaciones (3-3) y (3-4) las cuales van a ser graficadas con los datos medidos en la instalación experimental.

A continuación, se presentan las ecuaciones adimensionales obtenidas mediante el análisis dimensional:

$$\frac{y_u}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

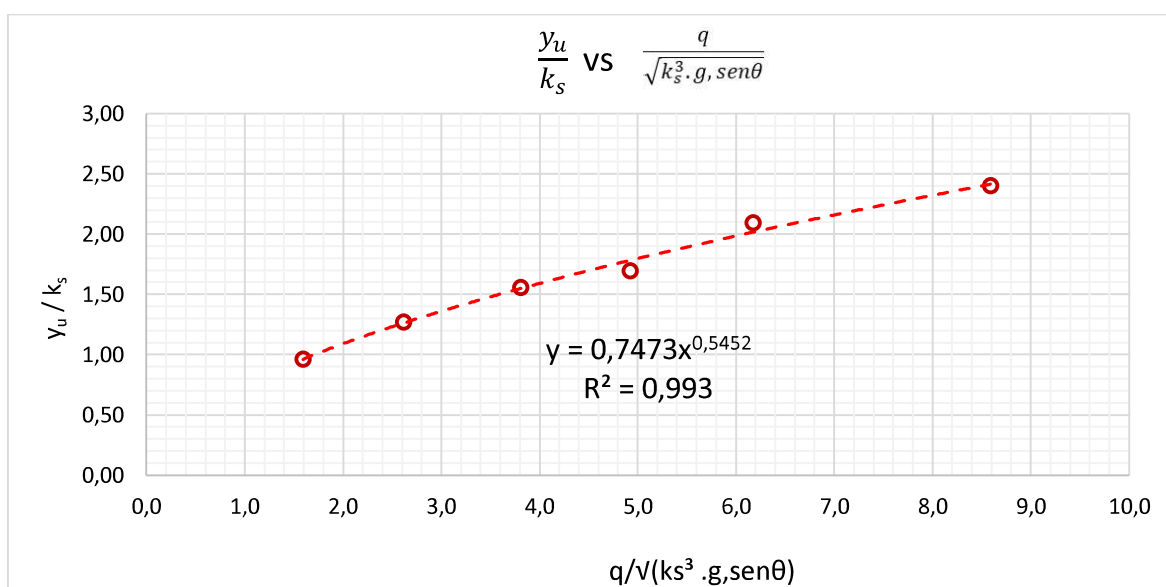
$$\frac{E_t - E_r}{E_t} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

Tabla No. 4.17: Cálculos de los parámetros adimensionales a ser analizados en la instalación experimental con geometría modificada M2.

PRUEBA	Caudal	Caudal Unitario	E. Canal de Aproximación	E. Canal de Salida	ΔE (m)	$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}}$	Disipación de Energía	$\frac{y_u}{k_s}$
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	E ₁ =E _t (m)	E ₂ =E _r (m)	ΔE (m) = E _t -E _r		$\Delta E/E_1$ (%)	
P0 - DM2	14.42	0.028	4.73	0.76	3.88	1.6	83.9	1.0
P1 - DM2	23.68	0.046	4.78	0.95	3.78	2.6	80.0	1.3
P2 - DM2	33.48	0.067	4.83	1.31	3.49	3.8	72.9	1.6
P3 - DM2	44.58	0.086	4.87	1.54	3.28	4.9	68.4	1.7
P4 - DM2	55.97	0.108	4.90	1.64	3.12	6.2	66.5	2.1
P5 - DM2	77.89	0.150	4.98	1.86	3.05	8.6	62.7	2.4

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.19: Curva adimensional de los parámetros descritos en la ec. (3-3).



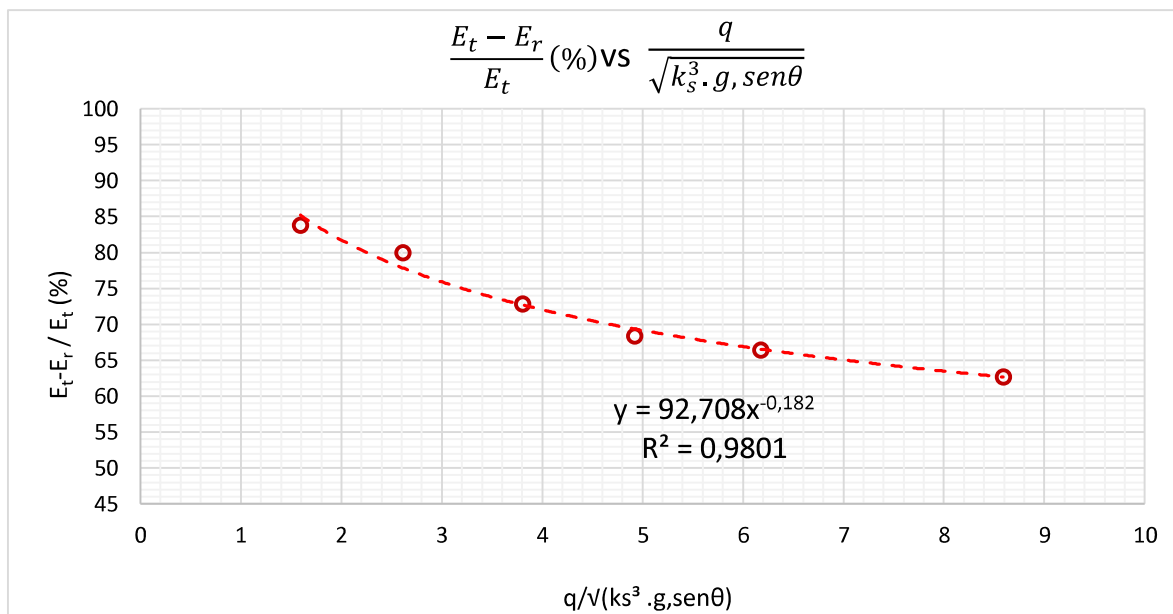
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{y_u}{k_s} = 0.7473 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{0.5452} \quad (4-15)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental en el **Gráfico No. 4.19** se observa una tendencia que genera la ecuación (4-15) con coeficiente de correlación $R^2=0.993$, esta servirá para establecer la profundidad de flujo en la zona uniforme de la rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que la profundidad de flujo en la zona uniforme aumenta con el incremento del caudal unitario.

Gráfico No. 4.20: Curva adimensional de los parámetros descritos en la ec. (3-4).



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{\Delta E}{E_t} = 92.708 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{-0.182} \quad (4-16)$$

A partir de la relación de los parámetros adimensionales y los datos medidos en la instalación experimental en el **Gráfico No. 4.42** se observa una tendencia que genera la ecuación (**4-16**) con coeficiente de correlación $R^2=0.9801$, esta servirá para establecer el porcentaje de disipación de energía en la zona uniforme de la rápida escalonada con un ángulo de inclinación de 45° y flujo de aproximación supercrítico, la tendencia de esta curva muestra que el porcentaje de disipación de energía disminuye con el incremento del caudal unitario.

4.4.7. COMPARACION ENTRE LOS RESULTADOS DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA MODIFICADA M2 Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS EXPRESIONES DE LA LITERATURA TECNICA.

Según la literatura disponible existen fórmulas para el cálculo de la concentración media de aire, factor de fricción y la energía residual sin la necesidad de tener datos prácticos obtenidos en una instalación experimental, para estos cálculos se empleó las siguientes ecuaciones propuestas en los diferentes estudios disponibles.

Tabla No. 4.18: Comparación de las concentraciones medias de aire calculadas teórica y experimentalmente con geometría modificada M2.

Autor	Ecuación	C _m (Teórico)	C _m (Experimental)
Hager (1991)	$C_m = 0.75 (\sin \alpha)^{0.75}$	0.578	0.575
Chanson (1994)	$C_m = 0.8 \sin \alpha$	0.566	
Matos (1999)	$C_m = 0.76 (\sin \alpha)^{0.82}$	0.572	

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Según la **Tabla No. 4.18** el valor de la concentración media obtenida experimentalmente es muy cercana a los valores obtenidos teóricamente con las ecuaciones propuestas por diferentes autores.

Tabla No. 4.19: Comparación de los factores de fricción calculados teóricamente y los factores de fricción obtenidos experimentalmente.

Prueba	f _e (Teórico)		f _e (Experimental)
	Boes y Minor (2002)	Chinnarasri (2002)	-
P0	0.077	0.536	0.141
P1	0.072	0.424	0.126
P2	0.069	0.360	0.134
P3	0.066	0.325	0.166

P4	0.064	0.298	0.141
P5	0.061	0.264	0.129

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Según la **Tabla No. 4.19** los factores de fricción obtenidos experimentalmente se encuentran dentro del rango de los calculados con las ecuaciones teóricas.

Tabla No. 4.20: Comparación de la disipación de energía entre los resultados teóricos y los resultados experimentales.

Prueba	% Disipación de Energía (Teórico)		% Disipación de Energía (Experimental)
	Chanson (1994a)	Boes (2000)	
P0	94.2	94.1	81.3
P1	91.5	91.3	78.1
P2	89.6	89.2	71.2
P3	89.3	88.9	65.9
P4	86.2	85.7	62.2
P5	82.0	81.4	59.7

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Las ecuaciones utilizadas para la comparación entre cálculos teóricos y los cálculos obtenidos experimentalmente son para obtener la energía residual en la zona de flujo uniforme.

Según la **Tabla No. 4.20** la disipación de energía obtenida experimentalmente para cada prueba es menor a la que se esperaría obtener mediante cálculos teóricos.

4.4.1. CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA GEOMETRÍA MODIFICADA M2

- La segunda modificación geométrica (Geometría Modificada M2) es un perfil curvo escalonado en el que los vértices superiores de los escalones mantienen la curvatura del perfil curvo liso implementado en la geometría modificada M1. En su diseño se mantiene la curvatura debido a que corrigió efectivamente la separación del flujo observada en la geometría original y se añadieron escalones para suavizar la transición del flujo entre el canal de aproximación y la rápida escalonada con el fin de evitar los rebotes del flujo para caudales bajos.

- La calibración geométrica para determinar la desviación entre los planos de diseño y la estructura implementada fue realizada mediante levantamiento planimétrico y altimétrico con la ayuda de estación total y nivel topográfico. Como resultados se obtuvieron desviaciones menores al 1%, lo cual está dentro de los límites aceptados para validar geoméricamente la instalación.
- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría modificada M2, se observa un correcto comportamiento hidráulico para todo su rango de caudales. Esta geometría cumple con su objetivo de diseño que es evitar la separación de la lámina inferior del flujo con la estructura e impedir la formación de rebotes en los primeros escalones.
- Los factores de fricción resultantes para esta geometría se los calculó con los datos obtenidos de la medición de profundidades mínimas y máximas en la zona uniforme (escalón # 92), debido a la naturaleza oscilatoria del flujo se procedió a medir un rango de profundidades para todos los caudales del plan de pruebas. Para cada prueba se registró su profundidad mínima y máxima, con estas se obtuvo una concentración media de aire de 0.575 y un valor promedio del factor de fricción con calados mínimos de 0.067 y un valor promedio del factor de fricción con calados máximos de 0.158.
- La disipación de energía producida en la instalación experimental presenta una tendencia inversa al caudal, es decir, la disipación de energía es mayor mientras menor es el caudal. Los valores de disipación de energía para esta geometría varían desde 62.7% para P5 (78 l/s) hasta 83.9% para P0 (14 l/s).
- El promedio de valores máximos y mínimos del factor de fricción es mayor en la geometría modificada M2 con respecto a las otras geometrías. Esto concuerda con la cantidad de energía disipada a lo largo de la rápida escalonada, ya que el porcentaje de disipación de energía es mayor en la geometría modificada M2.

- Las curvas adimensionales obtenidas para esta geometría representan la tendencia de resultados obtenidos experimentalmente, su objetivo es ser una herramienta de apoyo para el diseñador hidráulico que permita lograr diseños más eficientes.

4.5. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La presente sección compara y evalúa los resultados obtenidos en las dos geometrías modificadas aplicadas a la instalación experimental. Los resultados fueron obtenidos mediante datos medidos en la instalación experimental y la aplicación de fórmulas teóricas disponibles en la literatura técnica.

4.5.1. CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE

A continuación, en la **Tabla No. 4.21** se presentan los valores de concentración media de aire para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada y para cada una de las pruebas ejecutadas. También se muestra el valor promedio en cada una de las pruebas para su posterior comparación.

Tabla No. 4.21: Concentración media de aire para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.

PRUEBA	DISEÑO MODIFICADO M1		DISEÑO MODIFICADO M2	
	Cm'	Cm Promedio	Cm'	Cm Promedio
P0	0.456	0.583	0.521	0.575
P1	0.556		0.582	
P2	0.587		0.600	
P3	0.619		0.572	
P4	0.641		0.598	
P5	0.639		0.579	

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Según los resultados mostrados en la **Tabla No. 4.21**, el valor promedio de concentración media de aire es mayor para la Geometría Modificada M1, esto significa que en esta geometría el flujo bifásico a lo largo de la instalación experimental sufre una mayor inserción de aire que en la Geometría Modificada M2.

4.5.2. FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH

A continuación, en la **Tabla No. 4.22**, **Tabla No. 4.23** y en el **Gráfico No. 4.21** se encuentran los valores de factores de fricción y la gráfica de los promedios de mismos para cada una de las geometrías modificadas.

Tabla No. 4.22: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico en la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2 (calados máximos).

PRUEBA	DISEÑO MODIFICADO M1			DISEÑO MODIFICADO M2		
	Yc/ks	fe	fe Promedio	Yc/ks	fe	fe Promedio
P0	1.210	0.141	0.140	1.214	0.215	0.158
P1	1.674	0.126		1.689	0.185	
P2	2.136	0.134		2.170	0.159	
P3	2.559	0.166		2.575	0.124	
P4	2.988	0.141		2.997	0.147	
P5	3.741	0.129		3.736	0.115	

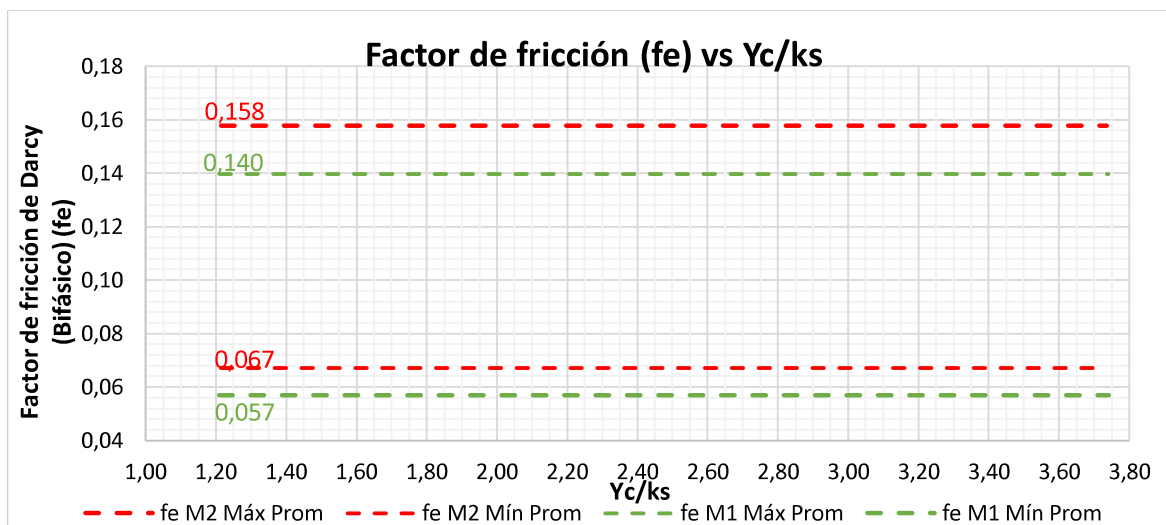
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 4.23: Factor de fricción de Darcy para flujo bifásico en la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2 (calados mínimos).

PRUEBA	DISEÑO MODIFICADO M1			DISEÑO MODIFICADO M2		
	Yc/ks	fe	fe Promedio	Yc/ks	fe	fe Promedio
P0	1.210	0.031	0.057	1.214	0.058	0.067
P1	1.674	0.048		1.689	0.080	
P2	2.136	0.056		2.170	0.082	
P3	2.559	0.065		2.575	0.063	
P4	2.988	0.075		2.997	0.067	
P5	3.741	0.066		3.736	0.052	

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.21: Valores promedios de factores de fricción para calados máximos y mínimos en la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Los valores presentados en la **Tabla No. 4.22**, **Tabla No. 4.23**, y el **Gráfico No. 4.21** son los resultados obtenidos en la zona uniforme de la rápida escalonada. Al compararlos, se puede concluir que los valores promedios tanto mínimo como máximo del factor de fricción en la Geometría Modificada M2 son mayores que en la Geometría Modificada M1.

4.5.3. DISIPACIÓN DE ENERGÍA

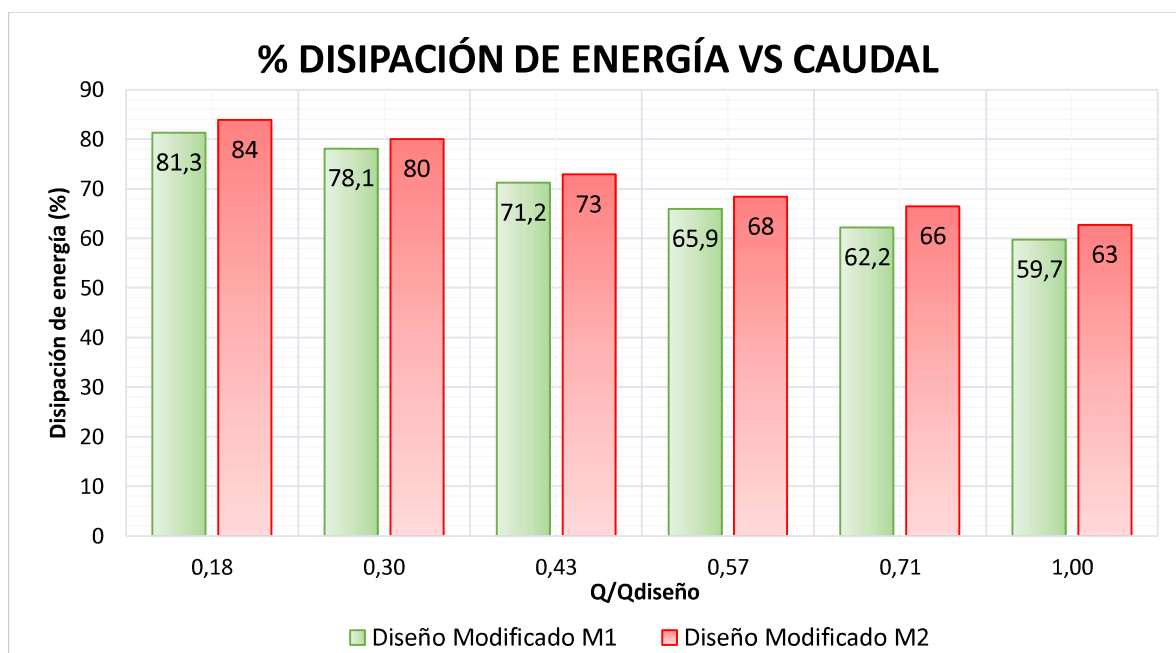
A continuación, en la **Tabla No. 4.24** y en el **Gráfico No. 4.22** se encuentran los valores del porcentaje de disipación de energía en cada una de las geometrías modificadas.

Tabla No. 4.24: Comparación de disipación de energía entre Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.

PRUEBA	Geometría Modificada M1			Geometría Modificada M2		
	E. Canal Aprox.	E. Canal Salida	ΔE	E. Canal Aprox.	E. Canal Salida	ΔE
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
P0	4.74	0.89	3.85	4.73	0.76	3.96
P1	4.78	1.05	3.73	4.78	0.95	3.82
P2	4.83	1.39	3.44	4.84	1.31	3.52
P3	4.87	1.66	3.21	4.87	1.54	3.33
P4	4.90	1.85	3.05	4.90	1.64	3.26
P5	4.98	2.00	2.98	4.98	1.86	3.12

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 4.22: Porcentajes de disipación de energía en la rápida escalonada para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.



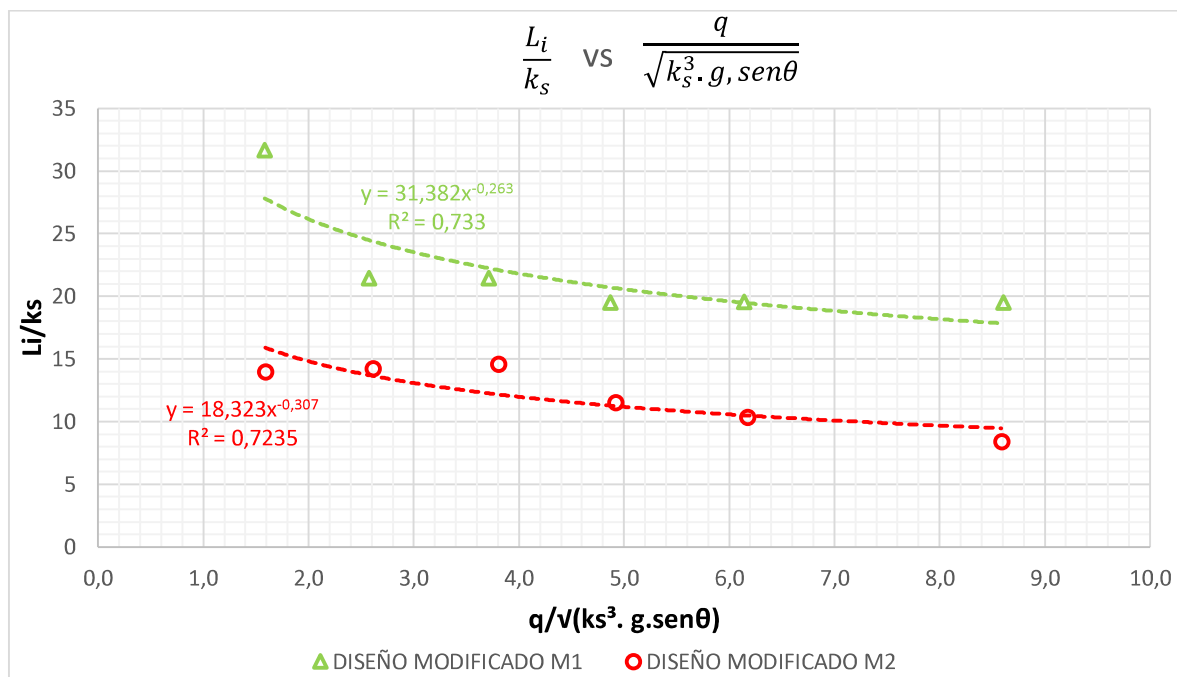
Según los resultados mostrados en el **Gráfico No. 4.22** la Geometría Modificada M2 es la que presenta un mayor porcentaje de disipación de energía para todo el rango de caudales ejecutado. Esto coincide con los valores de los factores de fricción descritos en el numeral 4.5.2 donde los valores también son mayores en la Geometría Modificada M2, esta relación se produce debido a que el factor de fricción está asociado directamente a la disipación de energía.

4.5.4. CURVAS ADIMENSIONALES

4.5.4.1. ZONA NO AIREADA

A continuación, se presenta la comparación entre las curvas adimensionales obtenidas para la zona no aireada de la instalación experimental en las dos geometrías modificadas.

Gráfico No. 4.23: Curvas adimensionales para la zona no aireada en la Geometría Modificada M1 y Geometría Modificada M2.

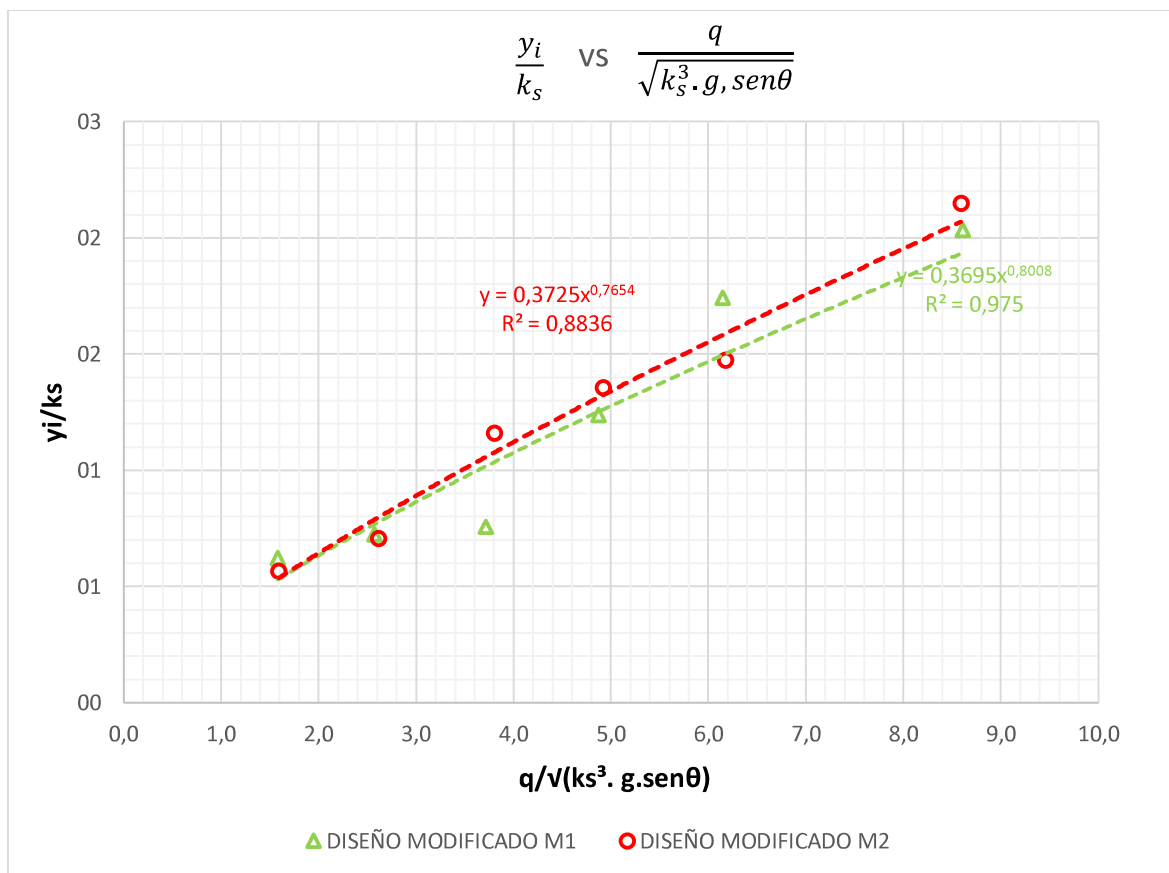


Las curvas adimensionales presentadas en el

Gráfico No. 4.23 representan la variación de la longitud desde la cresta del vertedero hasta el punto de inicio de auto aireación del flujo en función del caudal unitario circulante por la instalación experimental.

Esto lleva a la conclusión que la geometría modificada M1 y la geometría modificada M2 tienen una misma tendencia mostrando que a menor caudal unitario mayor es la longitud del punto inicial de auto aireación.

Gráfico No. 4.24: Curvas adimensionales en la zona no aireada para Geometría Modificada M1 y Geometría Modificada M2.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

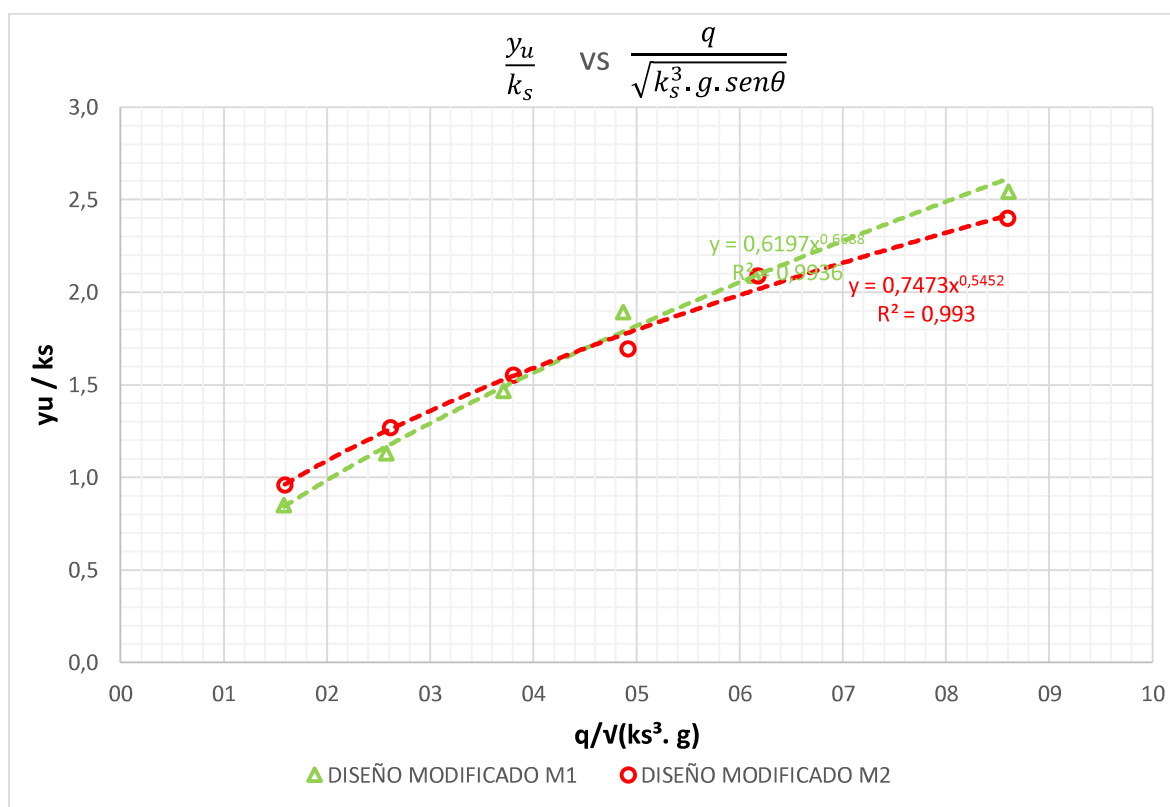
Las curvas adimensionales presentadas en el

Gráfico No. 4.24 representan la profundidad del flujo en el punto inicial de auto aireación en función del caudal unitario circulante por la instalación experimental.

Esto lleva a la conclusión que el calado en el punto de inicio de auto aireación para cada uno de los caudales unitarios y de las geometrías propuestas tienen un comportamiento semejante entre sí, esto debido a que presentan valores muy cercanos y conservan una misma tendencia.

4.5.4.2. ZONA AIREADA

Gráfico No. 4.25: Curvas adimensionales en la zona aireada para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.



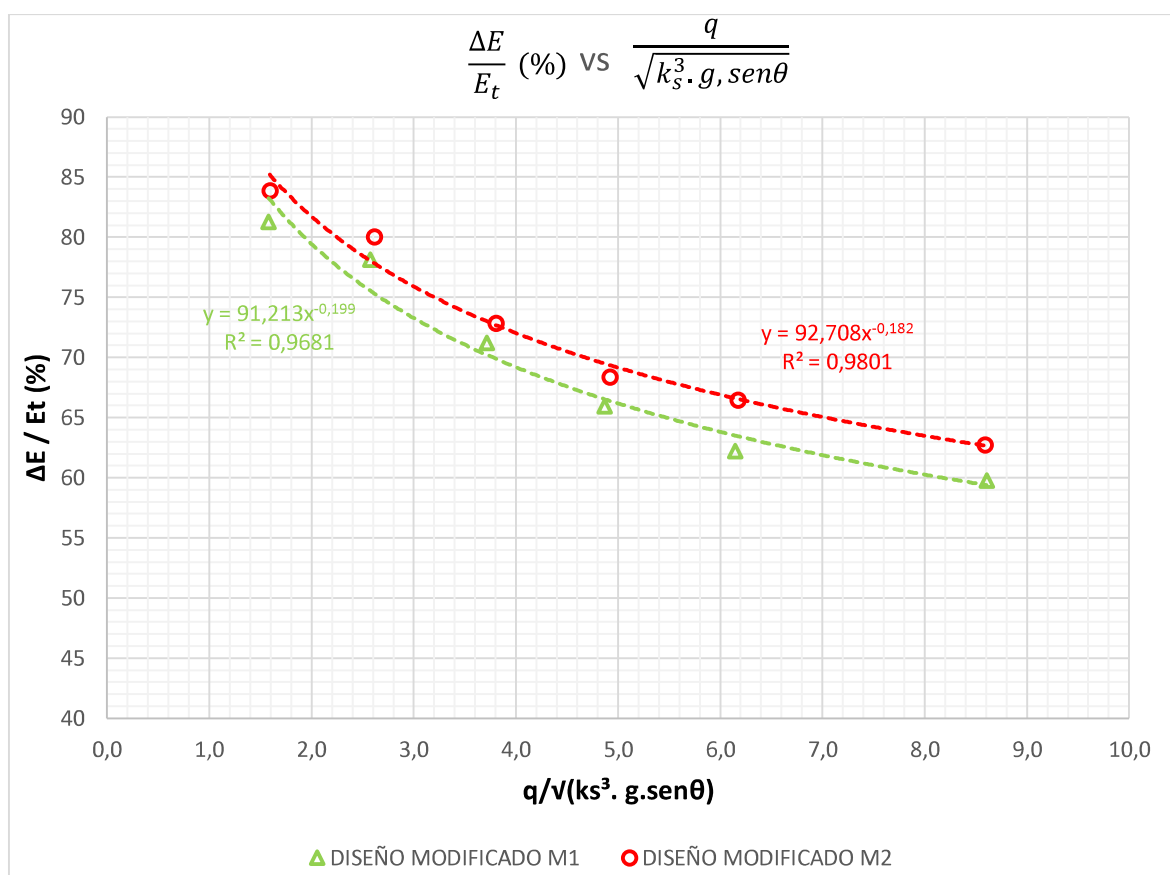
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Las curvas adimensionales presentadas en el **Gráfico No. 4.25** representan la profundidad del flujo bifásico en la zona uniforme en función al caudal unitario circulante en la instalación experimental.

El comportamiento de las dos geometrías en la zona uniforme del flujo es muy semejante, pues los valores de la relación $\frac{y_u}{k_s}$ para los diferentes caudales

ejecutados tienen valores que son muy cercanos entre sí, también se observa que mientras el caudal unitario aumenta la profundidad en el flujo uniforme también aumenta.

Gráfico No. 4.26: Curvas adimensionales en la zona aireada para la Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Las curvas adimensionales presentadas en el **Gráfico No. 4.48** representan el porcentaje de disipación de energía en función del caudal unitario circulante en la instalación experimental. Se puede observar que la tendencia de la disipación de energía para las dos geometrías es igual, es decir, la cantidad de energía disipada disminuye con el aumento del caudal unitario. Los valores más altos en disipación de energía se muestran en la Modificación Geométrica M2, a más de esto, con esta

geometría se logró el mejor comportamiento hidráulico a la entrada y a lo largo de la rápida escalonada.

4.6. CONCLUSIONES

4.6.1. GEOMETRÍA ORIGINAL

- La calibración geométrica para determinar la desviación entre los planos de diseño y la estructura implementada fue realizada mediante levantamiento planimétrico y altimétrico con la ayuda de estación total y nivel topográfico. Como resultados se obtuvieron desviaciones menores al 1%, lo cual está dentro de los límites aceptados para validar geoméricamente la instalación.
- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría original, se observa un comportamiento hidráulico adecuado para el rango de caudales entre 14 - 23 l/s (P0 – P1). El comportamiento de la instalación para caudales entre 34 - 78 l/s (P2 – P5) es hidráulicamente inadecuado, en dicho intervalo de caudales se produce una separación entre el flujo y el fondo del canal en la zona de ingreso a la rápida escalonada. La separación del flujo aumenta directamente con el caudal, por lo que en la prueba con el caudal máximo P5 (78 l/s) se una mayor separación y la cantidad de escalones que debido al salto no tienen contacto con el flujo van desde el escalón #2 al escalón #8.
- Debido al comportamiento hidráulico inadecuado producido al ejecutar los caudales intermedios y altos del plan de pruebas en la instalación experimental con geometría original, característica que operacionalmente es inaceptable para la estructura, se sostiene como innecesario realizar los cálculos del factor de fricción y la disipación de energía. En cambio, se propone una geometría modificada M1 que corrija dicho comportamiento hidráulico inadecuado.

4.6.2. GEOMETRÍA MODIFICADA M1

- La calibración geométrica para determinar la desviación entre los planos de diseño y la estructura implementada fue realizada mediante levantamiento planimétrico y altimétrico con la ayuda de estación total y nivel topográfico. Como resultados se obtuvieron desviaciones menores al 1%, lo cual está dentro de los límites aceptados para validar geoméricamente la instalación.
- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría modificada M1, se observa un comportamiento hidráulico inverso al observado con la geometría original, es decir, un comportamiento hidráulico inadecuado para caudales menores y adecuado para caudales mayores. Para el rango de caudales entre 14 – 44 l/s (P0 – P3) se produce un ligero rebote que provoca la ausencia de flujo en las cavidades de los primeros escalones de la unión entre el perfil curvo liso y el fondo escalonado. Para el rango de caudales entre 56 – 78 l/s (P4 – P5) el comportamiento hidráulico mejora debido a que el caudal circulante es mayor y esto minimiza el efecto de los rebotes. Con respecto al perfil curvo liso se observa que corrige la separación de la lámina inferior del flujo con la estructura.
- Los factores de fricción resultantes para esta geometría fueron calculados con los datos obtenidos de la medición de profundidades mínimas y máximas en la zona uniforme (escalón # 92), debido a la naturaleza oscilatoria del flujo se procedió a medir un rango de profundidades para todos los caudales del plan de pruebas. Para cada prueba se registró su profundidad mínima y máxima, con estas se obtuvo una concentración media de aire de 0.583 y un valor promedio del factor de fricción con calados mínimos de 0.057 y un valor promedio del factor de fricción con calados máximos de 0.140.
- La disipación de energía producida en la instalación experimental presenta una tendencia inversa al caudal, es decir, la disipación de energía es mayor

mientras menor es el caudal. Los valores de disipación de energía para esta geometría varían desde 59.7% para P5 (78 l/s) hasta 81.3% para P0 (14 l/s).

- Las curvas adimensionales obtenidas para esta geometría representan la tendencia de resultados obtenidos experimentalmente, su objetivo es ser una herramienta de apoyo para el diseñador hidráulico, misma que permita lograr diseños más eficientes en rápidas escalonadas que cumplan con la configuración de la instalación experimental analizada.
- Con la finalidad de corregir los rebotes que se generan en los primeros escalones de la unión entre el perfil curvo liso y el fondo escalonado, se plantea una nueva modificación geométrica que sustituye el perfil liso por un perfil escalonado manteniendo su misma curvatura.

4.6.3. GEOMETRÍA MODIFICADA M2

- La calibración geométrica para determinar la desviación entre los planos de diseño y la estructura implementada fue realizada mediante levantamiento planimétrico y altimétrico con la ayuda de estación total y nivel topográfico. Como resultados se obtuvieron desviaciones menores al 1%, lo cual está dentro de los límites aceptados para validar geoméricamente la instalación.
- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría modificada M2, se observa un correcto comportamiento hidráulico para todo su rango de caudales. Esta geometría cumple con su objetivo de diseño que es evitar la separación de la lámina inferior del flujo con la estructura e impedir la formación de rebotes en los primeros escalones de la unión entre el perfil curvo liso y el fondo escalonado, corrigiendo las deficiencias observadas en la geometría original y geometría modificada M1 respectivamente.
- Los factores de fricción resultantes para esta geometría se los calculó con los datos obtenidos de la medición de profundidades mínimas y máximas en

la zona uniforme (escalón # 92), debido a la naturaleza oscilatoria del flujo se procedió a medir un rango de profundidades para todos los caudales del plan de pruebas. Para cada prueba se registró su profundidad mínima y máxima, con estas se obtuvo una concentración media de aire de 0.575 y un valor promedio del factor de fricción con calados mínimos de 0.067 y un valor promedio del factor de fricción con calados máximos de 0.158.

- La disipación de energía producida en la instalación experimental presenta una tendencia inversa al caudal, es decir, la disipación de energía es mayor mientras menor es el caudal. Los valores de disipación de energía para esta geometría varían desde 62.7% para P5 (78 l/s) hasta 83.9% para P0 (14 l/s).

- El promedio de valores máximos y mínimos del factor de fricción es mayor en la geometría modificada M2 con respecto a las otras geometrías. Esto concuerda con la cantidad de energía disipada a lo largo de la rápida escalonada, ya que el porcentaje de disipación de energía es mayor en la geometría modificada M2.

- Las curvas adimensionales obtenidas para esta geometría representan la tendencia de resultados obtenidos experimentalmente, su objetivo es ser una herramienta de apoyo para el diseñador hidráulico, misma que permita lograr diseños más eficientes en rápidas escalonadas que cumplan con la configuración de la instalación experimental analizada.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

- La instalación experimental fue diseñada para ser evaluada bajo un plan de pruebas determinado en base a valores intermedios de caudal dentro de un límite establecido entre el caudal mínimo para que se produzca flujo rasante en la rápida escalonada (14 l/s), y un caudal máximo que obedece al caudal de diseño (78 l/s).
- Para garantizar flujo de aproximación supercrítico al ingreso de la rápida escalonada, se inició cambiando la pendiente del canal de aproximación a un valor del 2%, este valor se obtuvo en su diseño a través de un análisis para caudal mínimo y caudal máximo entre la pendiente del canal y el calado normal, el objetivo es garantizar el flujo supercrítico a la vez que se cumple con condiciones para evitar efectos de escala. Posteriormente se comprobó al calcular el número adimensional de Froude (Fr) para el rango de caudales establecidos en el plan de pruebas, en donde se obtuvieron valores mayores a 1.0. Según la literatura técnica esto garantiza que el flujo se encuentra en régimen supercrítico. Posteriormente a la estructura de la instalación experimental se le ha implementado una compuerta rectangular plana en el canal de ingreso para uniformizar el flujo en dicho canal.
- La calibración geométrica para determinar la desviación entre los planos de diseño y la estructura implementada fue realizada en las tres geometrías mediante levantamiento planimétrico y altimétrico con la ayuda de estación total y nivel topográfico. Como resultados se obtuvieron desviaciones menores al 1%, lo cual está dentro de los límites aceptados para validar geoméricamente la instalación.

- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría original, se observa un comportamiento hidráulico adecuado para el rango de caudales entre 14 - 23 l/s (P0 – P1). El comportamiento de la instalación para caudales entre 34 - 78 l/s (P2 – P5) es hidráulicamente inadecuado, en dicho intervalo de caudales se produce una separación entre el flujo y el fondo del canal en la zona de ingreso a la rápida escalonada. La separación del flujo aumenta directamente con el caudal, por lo que en la prueba con el caudal máximo de diseño P5 (78 l/s) se observa más separación y la mayor cantidad de escalones que debido al salto no tienen contacto con el flujo. Debido al comportamiento hidráulico inadecuado producido al ejecutar los caudales más altos del plan de pruebas en la instalación experimental con geometría original, característica que operacionalmente es inaceptable para la estructura, se sostiene como innecesario realizar los cálculos del factor de fricción y la disipación de energía. En cambio, se propone una geometría modificada M1 que corrija dicho comportamiento hidráulico inadecuado.

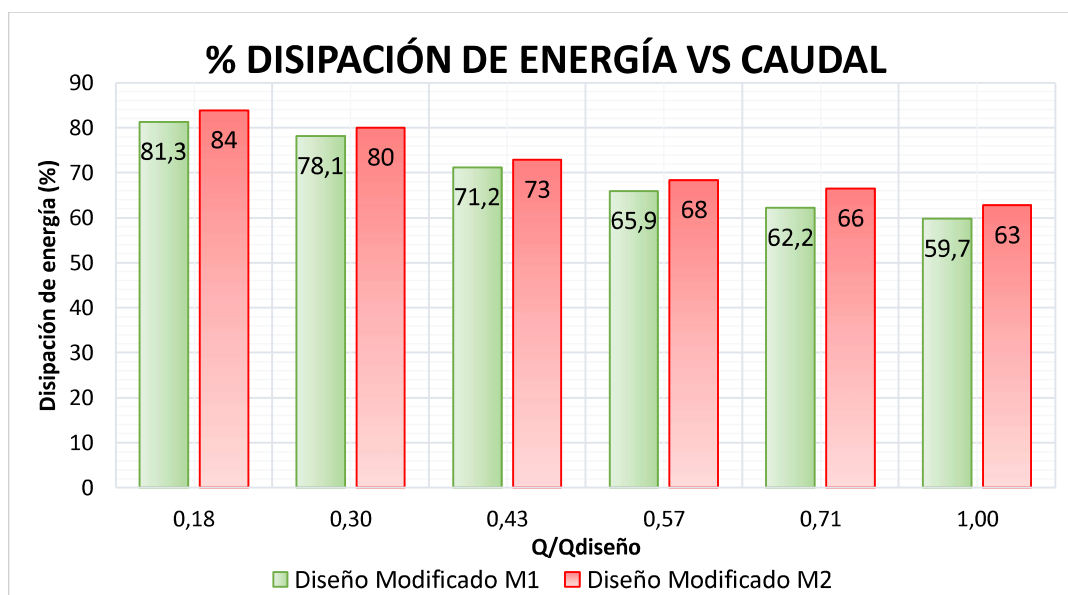
- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría modificada M1, se observa un comportamiento hidráulico inverso al observado con la geometría original, es decir, un comportamiento hidráulico inadecuado para caudales menores y adecuado para caudales mayores. Para el rango de caudales entre 14 – 44 l/s (P0 – P3) se produce un ligero rebote que provoca la ausencia de flujo en las cavidades de los primeros escalones de la unión entre el perfil curvo liso y el fondo escalonado. Para el rango de caudales entre 56 – 78 l/s (P4 – P5) el comportamiento hidráulico mejora debido a que el caudal circulante es suficiente para minimizar el efecto de los rebotes. Con respecto al perfil curvo liso se observa que cumple con su objetivo de diseño que es evitar la separación de la lámina inferior del flujo con la estructura para todo el rango de caudales establecido en el plan de pruebas, sin embargo, la producción de rebotes debe ser corregida, por tal razón se propone una modificación geométrica M2.

- Al ejecutar el plan de pruebas en la geometría modificada M2, se observa un correcto comportamiento hidráulico para todo su rango de caudales. Esta geometría cumple con su objetivo de diseño que es evitar la separación de la lámina inferior del flujo con la estructura e impedir la formación de rebotes en los primeros escalones de la unión entre el perfil curvo liso y el fondo escalonado, corrigiendo las deficiencias observadas en la geometría original y geometría modificada M1 respectivamente.
- Los factores de fricción resultantes para cada una de las geometrías modificadas implementadas fueron calculados con los datos obtenidos de la medición experimental de profundidades mínimas y máximas en la zona de flujo uniforme (escalón # 92), debido a la naturaleza oscilatoria del flujo se procedió a medir un rango de profundidades para todos los caudales del plan de pruebas. Para la Geometría Modificada M1 se obtuvo una concentración media de aire de 0.583 y un valor promedio del factor de fricción con calados mínimos de 0.057 y un valor promedio del factor de fricción con calados máximos de 0.140. Para la Geometría Modificada M2 se obtuvo una concentración media de aire de 0.575 y un valor promedio del factor de fricción con calados mínimos de 0.067 y un valor promedio del factor de fricción con calados máximos de 0.158.
- La disipación de energía para las dos geometrías modificadas implementadas en la instalación experimental presenta una tendencia inversa al caudal, es decir, la disipación de energía es mayor mientras menor es el caudal circulante. Para la Geometría Modificada M1 los porcentajes de disipación de energía varían desde 59.7% para P5 hasta 81.3% para P0 y, para la Geometría Modificada M2 varían desde 62.7% para P5 hasta 83.9% para P0.
- Comparando entre las geometrías evaluadas, el mayor porcentaje de disipación de energía para todas las pruebas se produce en la Geometría Modificada M2 (Ver el **Gráfico 5.1**). Esto sumado a que en la Geometría

Modificada M2 se corrige las deficiencias de las otras geometrías y se logra obtener el correcto comportamiento hidráulico del flujo circulante en la instalación experimental. Por ello la Geometría Modificada M2 ha sido elegida la geometría optimizada para flujo supercrítico de aproximación.

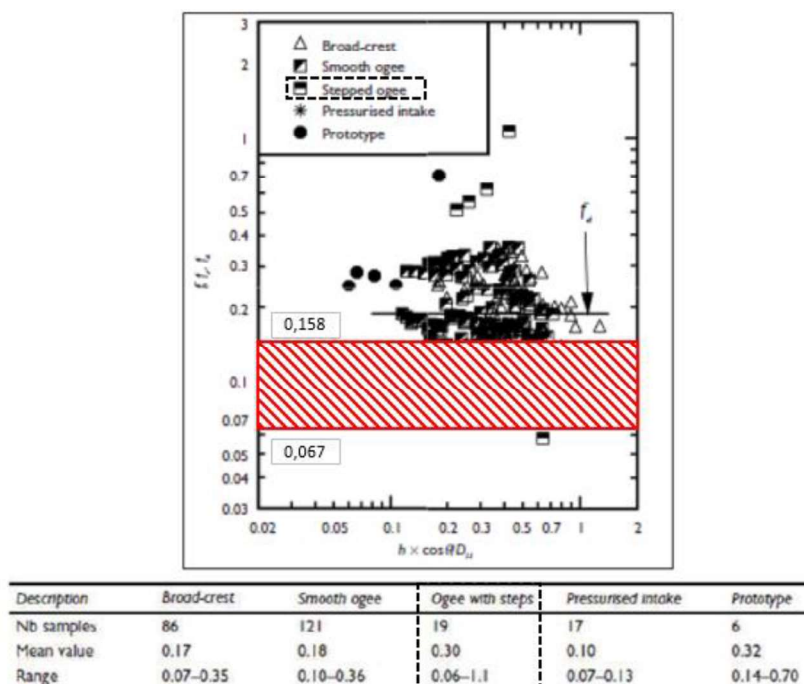
- El factor de fricción para la Geometría Modificada M2, elegida la configuración geométrica optimizada, presenta un valor promedio para profundidades mínimas de 0.067 y para profundidades máximas de 0.158. Para una mejor comprensión, en la **Figura No. 5.1** se detalla estos valores en una franja señalada en una figura que describe los límites recomendados en la literatura técnica.

Gráfico No. 5.1: Comparación porcentual de disipación de energía entre Geometría Modificada M1 y la Geometría Modificada M2.



ELABORADO POR: CIERHI – PIMI 16-06

Figura No. 5.1: Valores promedio del factor de fricción máximo y mínimo.



ELABORADO POR: CIERHI – PIMI 16-06

- Las curvas adimensionales obtenidas para la Geometría Modificada M2 representan la tendencia de resultados obtenidos experimentalmente, su objetivo es ser una herramienta de apoyo para el diseñador hidráulico. Su uso es válido para rápidas escalonadas con flujo de aproximación supercrítico y un ángulo de inclinación de 45° . Su aplicación permitirá al diseñador hidráulico disponer de un mejor criterio y lograr mejores diseños. En el Anexo 7 se presenta un ejemplo práctico del uso de las curvas adimensionales.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

En el Ecuador, un país atravesado por la zona Andina, existen ciudades importantes ubicadas en zonas con pendientes abruptas y que debido al rápido crecimiento poblacional exigen al diseñador hidráulico enfrentarse a retos de transportar grandes caudales por zonas con grandes desniveles. Ya que las rápidas

escalonadas figuran como una opción potencial para solventar estos nuevos retos, es conveniente continuar la investigación experimental de este tipo de estructuras.

Debido a la complejidad para comprender el desarrollo del flujo en una rápida escalonada, a continuación, se proponen temas y líneas de investigación que pueden ser ampliados con el objetivo de avanzar en el estudio de las rápidas escalonadas.

- Aprovechar la instalación experimental existente para ejecutar estudios variando la pendiente del canal de aproximación y determinar su influencia en el comportamiento hidráulico del flujo circulante y la disipación de energía en la estructura.
- Complementar los datos obtenidos experimentalmente, mediante la implementación de instrumentación y metodologías aceptadas por la comunidad científica como el procesamiento de imágenes con cámaras de alta velocidad, sondas o alguna otra técnica intrusiva o no intrusiva y verificar los valores de profundidades, velocidades y concentración de aire, especialmente en la zona de flujo bifásico para mejorar la precisión de cálculos y respaldar los resultados obtenidos.
- Realizar un análisis de la variación de presiones en las diferentes zonas de la instalación experimental, especialmente en los escalones (huella y contrahuella) y en la zona de enlace entre el canal de aproximación y el perfil escalonado.
- Profundizar el estudio de los vórtices formados en las cavidades de los escalones, enfocarlos a un análisis tanto cuantitativo como cualitativo y descifrar su influencia en el campo de la disipación de energía en la rápida escalonada.

- Investigar sobre configuraciones geométricas de los escalones o estructuras adicionales que puedan ser implementadas para mejorar la disipación de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador, A. (2005a). *COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DE LOS ALIVIADEROS ESCALONADOS EN PRESAS DE HORMIGON COMPACTADO*. Proyecto Previo a la Obtención del Doctoradol, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.244 p.
- Amador, A. (2005b). *COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS ALIVIADEROS ESCALONADOS EN PRESAS DE HORMIGON COMPACTADO*, 244.
- Amador, A., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2009). Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1092–1100. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000118)
- Bung, D. B., & Valero, D. (2016). Optical flow estimation in aerated flows. *Journal of Hydraulic Research*, 54(5), 575–580. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1173600>
- 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, Argentina.397 p.
- Cantillo, A. (2017). *Metodología para el diseño de canales escalonados , disipadores de energía , empleados en drenaje urbano , basada en modelación física*. Proyecto de Tesis previo a la obtención del Título de Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos , Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia.176p.
- Casa, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Programa Flow-3D*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

- Castro, M., Hidalgo, X., & Poveda, R. (2007). *Sobre la modelación hidráulica en obras de saneamiento básico*. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ciencias del Agua, Quito, Ecuador. 22p.
- Chafi, C., Hazzab, A., & Seddini, A. (2010). Study of flow and energy dissipation in stepped spillways. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 4(1), 1–11. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4002.0001>
- Chanson, H. (1995). History of Stepped Channels and Spillways: A Rediscovery of the Wheel.
- Chanson, H. (2002). *The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*. Lisse, The Netherlands: Balkema.
- Chanson, H. (2015). *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. □□ □□ □□□□ (Vol. 6). Dundee, Inglaterra: Taylor & Francis Group.
- Felder, S. (2013). *Air-Water Flow Properties on Stepped Spillways for Embankment Dams: Aeration , Energy Dissipation and Turbulence on Uniform , Non-Uniform and Pooled Stepped Chutes*. PhD thesis. Brisbane, Australia. Retrieved from <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:301329>
- Felder, S., & Chanson, H. (2014). Air-water flows and free-surface profiles on a non-uniform stepped chute. *Journal of Hydraulic Research*, 52(2), 253–263. <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.841780>
- Flores, W. (2015). *Comportamiento del Flujo en Vertederos Escalonados con Descarga Convergente*. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, Jiutepec, México. 111 p. Retrieved from <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7471/Tesis.pdf?sequence=1>
- Frizell, K. (2006). *Research State of the Art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways*. Denver, Colorado.
- Guachamín, K., & Simbaña, A. (2018). *Estudio experimental del flujo rasante, con*

- la implementación de estructuras adicionales sobre el perfil escalonado para incrementar la disipación continua de energía. (tesis de pregrado).* Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.330 p.
- Haro, P., & Jara, M. (2010). *Análisis de flujo inestable y autoaireado en canales de fuerte pendiente.* Proyecto de Tesis previo a la obtención del Título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos y Ciencias del Agua, Mención Diseño Hidráulico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.198 p.
- Herrera, A. (2004). *INVESTIGACIÓN EN MODELO HIDRÁULICO DE LA REPRESA DE LA HIDROELÉCTRICA CHIMAY.* Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura, Piura,Perú.101 p.
- Hidalgo, M. (2007). *Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas.*
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators (Vol. 1).* Boca Raton: CRC Press.
- Kramer, M., & Chanson, H. (2018). Free-surface instabilities in high-velocity air-water flows down stepped chutes. *7th International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 15-18 May, 13.* <https://doi.org/10.15142/T3XS8P>
- 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, Quito, Ecuador.196 p.
- 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,

- Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.196 p.
- Mateos, C. (2000). *La Modelación Física en las Obras Hidráulicas. Ingeniería del Agua* (Vol. 7). <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/ia.2000.2837>
- Pfister, M., & Hager, W. H. (2011). Self-entrainment of air on stepped spillways. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(2), 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.10.007>
- Rebollo, J. J., López, D., Garrote, L., Ramos, T., Díaz, R., & Herrero, R. (2019). Experimental analysis of the influence of aeration in the energy dissipation of supercritical channel flows. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030576>
- Sanchez-Juny, M. (2001). *Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado. Análisis del Campo de Presiones*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.253p.
- Toombes, L., & Chanson, H. (2007). Surface waves and roughness in self-aerated supercritical flow. *Environmental Fluid Mechanics*, 7(3), 259–270. <https://doi.org/10.1007/s10652-007-9022-y>
- Tozzi, M. (1992). *Caracterizacao do Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus*. Tese de Doutorado, Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo.
- Vergara, M. (1993). *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. México, D.F.
- Wei, W., Deng, J., & Zhang, F. (2016). Development of self-aeration process for supercritical chute flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 79(13), 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.11.003>

ANEXOS

ANEXO 1

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE
LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA ORIGINAL,
GEOMETRÍA MODIFICADA M1 Y GEOMETRÍA MODIFICADA M2**

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA ORIGINAL

Fotografía No. 1: Tramo de canal de ingreso con pendiente adversa dentro del tanque de abastecimiento, utilizado en el estudio de la instalación experimental con flujo subcrítico.



Fotografía No. 2: Desmontaje del tramo de canal de ingreso con pendiente adversa.



Fotografía No. 3: Colocación del canal de ingreso con pendiente fija del 2% dentro del tanque de abastecimiento, para tener flujo de aproximación supercrítico.



Fotografía No. 4: Comprobación de niveles y pendiente del canal de ingreso dentro del tanque de abastecimiento.



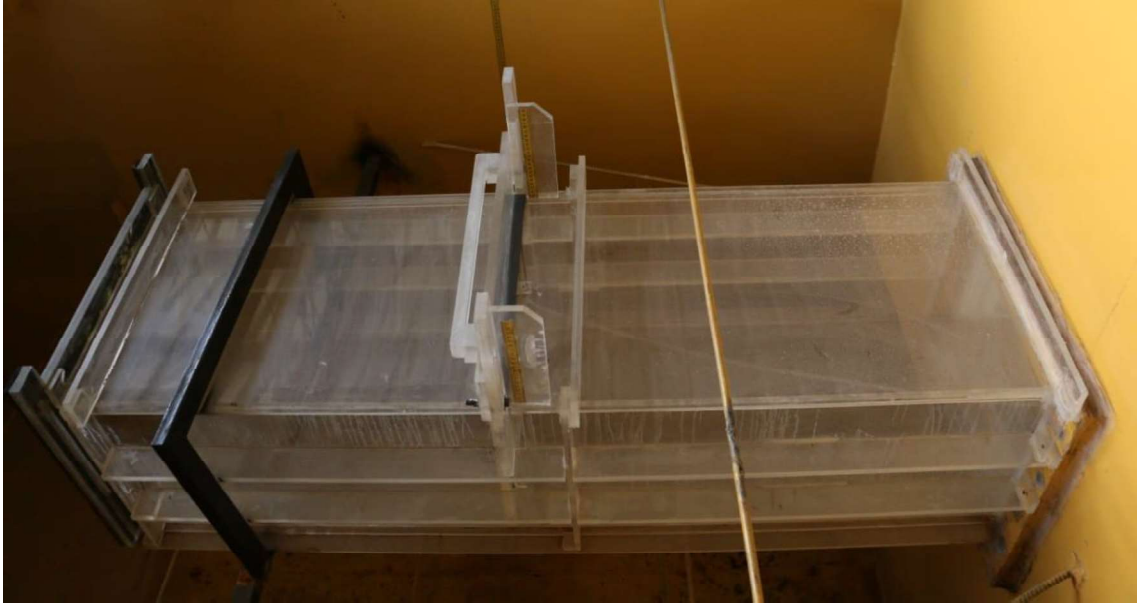
Fotografía No. 5: Sellado del canal de ingreso dentro del tanque de abastecimiento.



Fotografía No. 6: Elaboración de las piezas en acrílico de la compuerta a ser ubicada en el canal de ingreso dentro del tanque de abastecimiento.



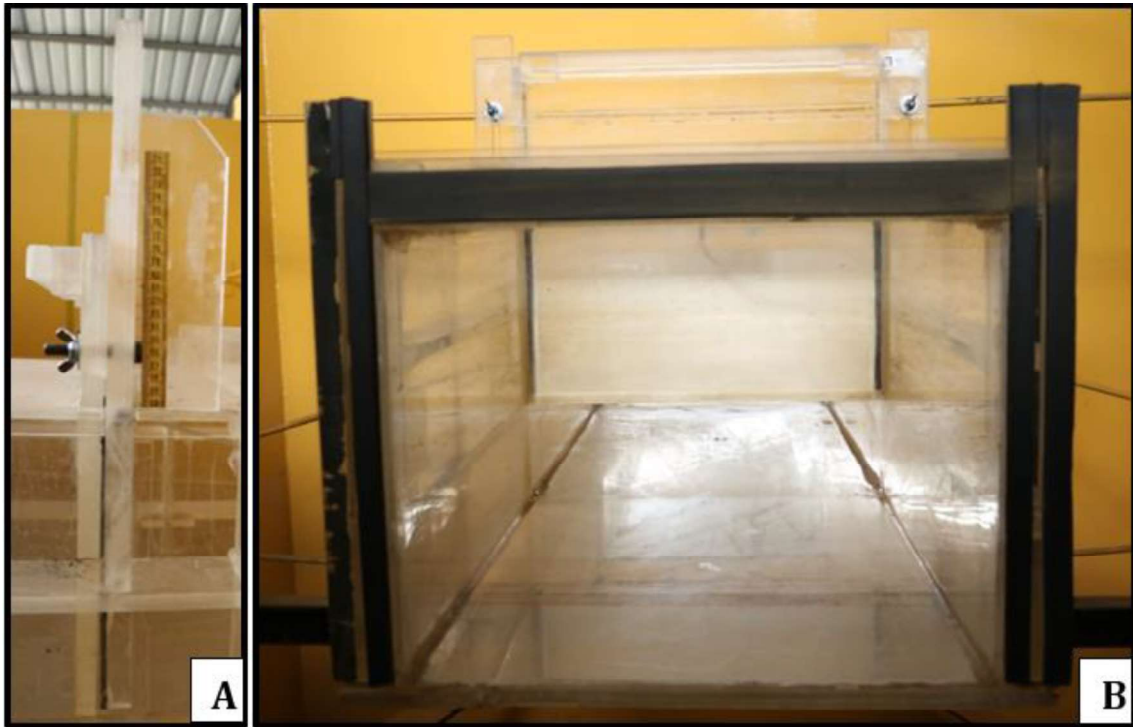
Fotografía No. 7: Vista superior derecha de la compuerta de acrílico ubicada en el canal de ingreso dentro del tanque de abastecimiento.



Fotografía No. 8: Vista superior de la compuerta de acrílico ubicada en el canal de ingreso dentro del tanque de abastecimiento.



Fotografía No. 9: (A) Vista lateral derecha y (B) Vista frontal de la compuerta de acrílico ubicada en el canal de ingreso dentro del tanque de abastecimiento.



Fotografía No. 10: Fijación de la estructura metálica de soporte del canal externo de aproximación hacia la rápida escalonada.



Fotografía No. 11: Colocación del canal externo de aproximación.



Fotografía No. 12: Instalación experimental con geometría original completamente construida.



INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA MODIFICADA M1

Fotografía No. 13: Desmontaje del tramo externo del canal de aproximación para la implantación de la geometría modificada M1.



Fotografía No. 14: Canal de aproximación desmontado.

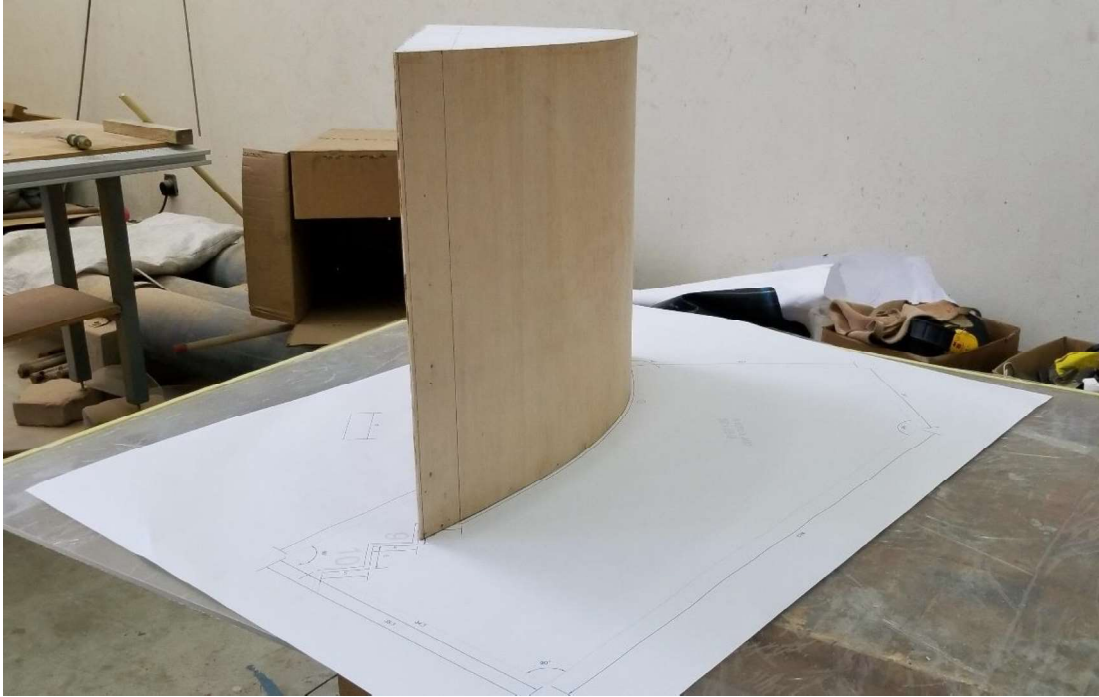


Fotografía No. 15: Desmontaje de un tramo de la rápida escalonada para la implantación de la pieza con la geometría modificada M1.



Fotografía No. 16: Tramo de la rápida escalonada desmontado y estructura lista para la implantación de la pieza con la geometría modificada M1.

Fotografía No. 17: Construcción del molde para la fabricación de la pieza con perfil liso curvo (Geometría Modificada M1).



Fotografía No. 18: Fabricación en acrílico de la pieza con perfil liso curvo.



Fotografía No. 19: Ensamblaje de la pieza completa M1, con perfil liso curvo.



Fotografía No. 20: Implantación de la pieza completa M1 en la rápida escalonada.



Fotografía No. 21: Pieza completa M1 implementada en la rápida escalonada.



Fotografía No. 22: Instalación experimental con geometría modificada M1 completamente implementada.

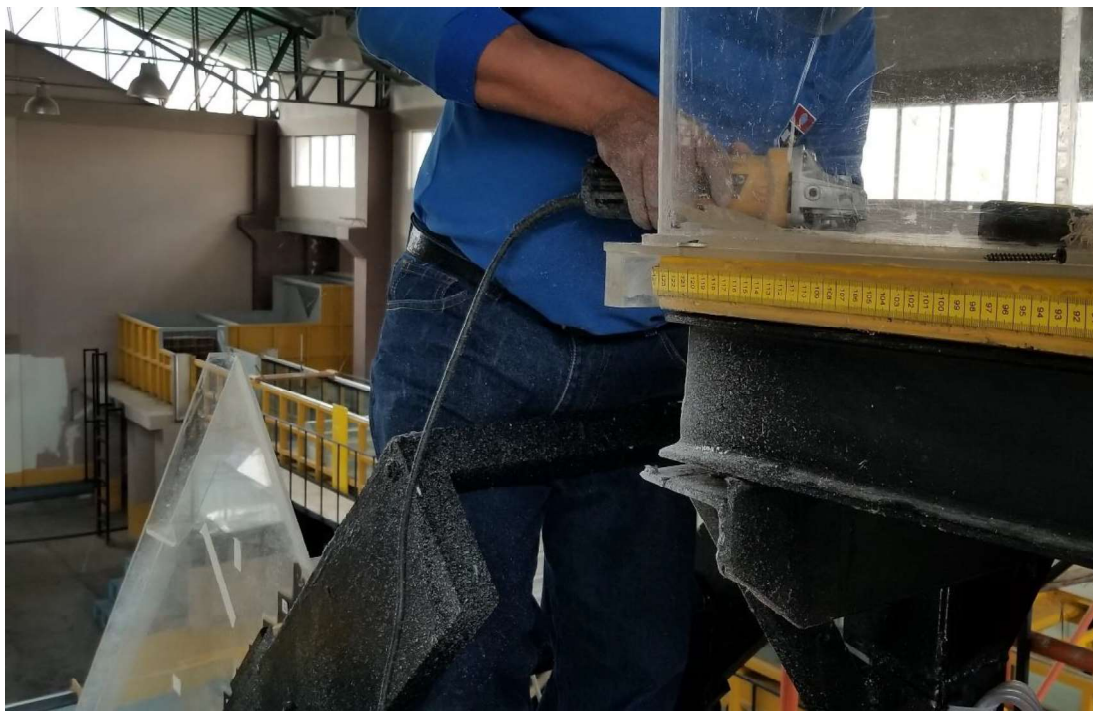


Fotografía No. 23: Vista lateral izquierda de la instalación experimental con geometría modificada M1 completamente implementada.

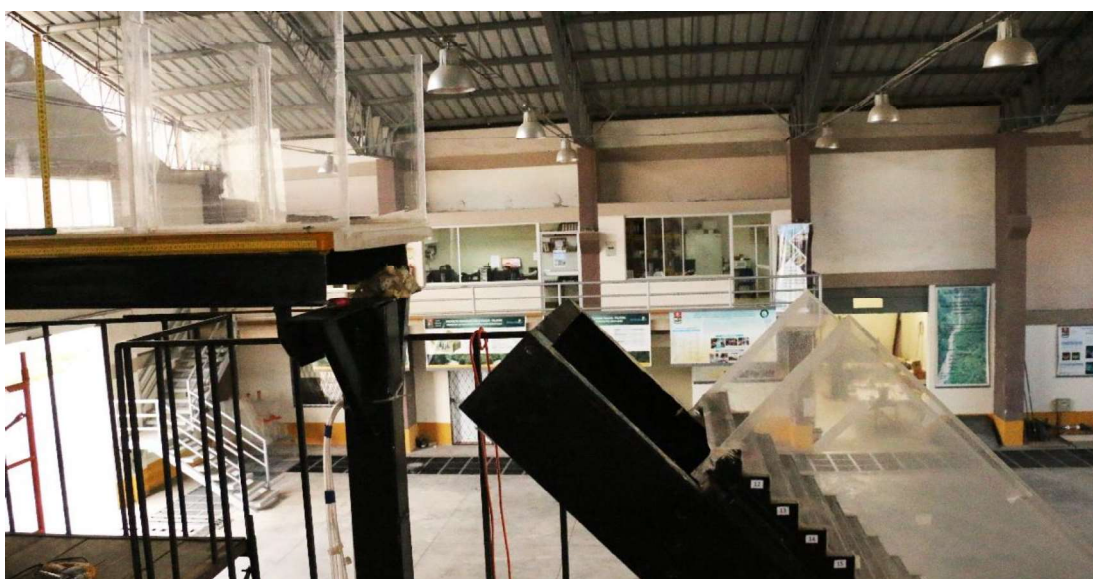


INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA MODIFICADA M2

Fotografía No. 24: Desmontaje de la pieza del perfil curvo liso utilizado en M1 para la implantación de la geometría modificada M2.



Fotografía No. 25: Pieza del perfil curvo liso utilizado en M1 completamente desmontada.



Fotografía No. 26: Fabricación de los componentes de la pieza del perfil curvo escalonado para la geometría modificada M2.



Fotografía No. 27: Fabricación de los escalones de la pieza del perfil curvo escalonado para la geometría modificada M2.



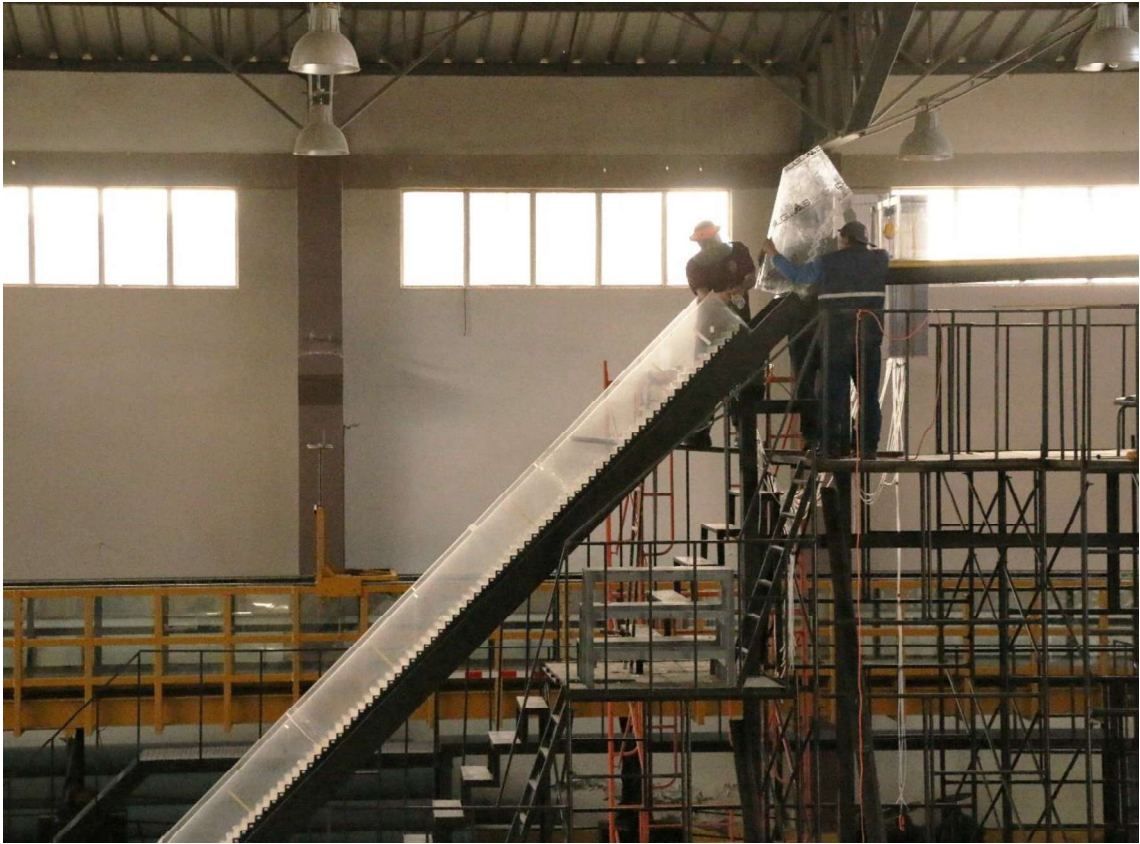
Fotografía No. 28: Ensamblaje de la pieza del perfil curvo escalonado para la geometría modificada M2.



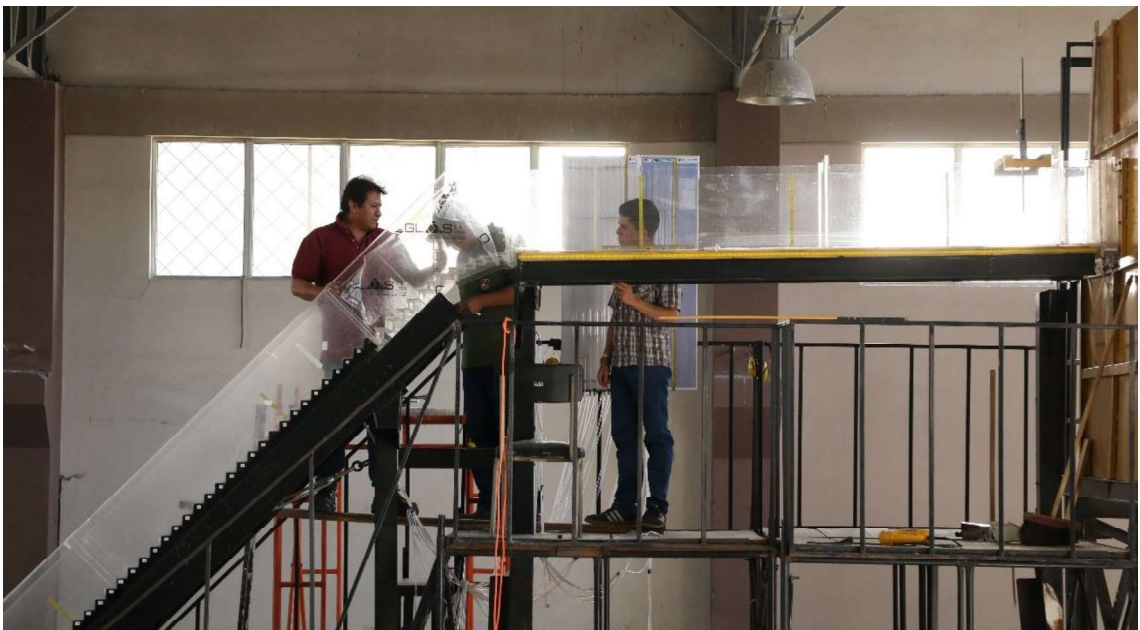
Fotografía No. 29: Pieza del perfil curvo escalonado para la geometría modificada M2 ensamblada.



Fotografía No. 30: Montaje de la pieza del perfil curvo escalonado M2.



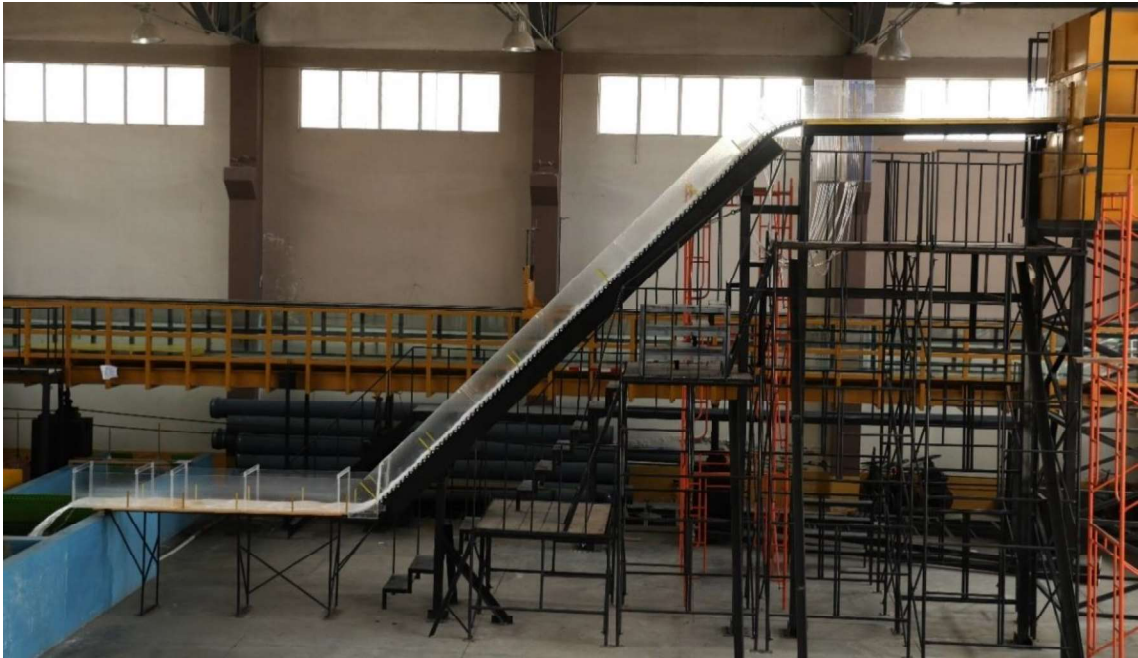
Fotografía No. 31: Sellado de la pieza del perfil curvo escalonado M2.



Fotografía No. 32: Pieza del perfil curvo escalonado M2 completamente implementado.



Fotografía No. 33: Vista lateral izquierda de la instalación experimental con geometría modificada M2 completamente implementada.



ANEXO 2
REGISTRO DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA DEL FONDO
ESCALONADO

GEOMETRÍA ORIGINAL

Tabla No. 1: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado para geometría original (longitud del escalón) con ayuda de un medidor láser.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - GEOMETRIA ORIGINAL

(FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

MEDICIONES CON DISTANCIÓMETRO			
No.	Ancho (cm)	Ubicación	Observaciones
1	51.83	Escalón No. 1	Rápida Escalonada
2	51.78	Escalón No. 3	Rápida Escalonada
3	51.80	Escalón No. 5	Rápida Escalonada
4	51.75	Escalón No. 7	Rápida Escalonada
5	51.83	Escalón No. 9	Rápida Escalonada
6	51.83	Escalón No. 11	Rápida Escalonada
7	51.78	Escalón No. 15	Rápida Escalonada
8	51.83	Escalón No. 20	Rápida Escalonada
9	51.76	Escalón No. 25	Rápida Escalonada
10	51.76	Escalón No. 30	Rápida Escalonada
11	51.83	Escalón No. 35	Rápida Escalonada
12	51.73	Escalón No. 42	Rápida Escalonada
13	51.87	Escalón No. 52	Rápida Escalonada
14	51.77	Escalón No. 62	Rápida Escalonada
15	51.75	Escalón No. 72	Rápida Escalonada
16	51.80	Escalón No. 81	Rápida Escalonada
17	51.80	Escalón No. 92	Rápida Escalonada

Tabla No. 2: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado para geometría original (huella y contrahuella) con ayuda de un nonio.



REGISTRO DE DATOS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - GEOMETRIA ORIGINAL
(FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

MEDICIONES CALIBRADOR								
No.	HUELLA (cm)			CONTRAHUELLA (cm)			Ubicación	Observaciones
	Derecha	Centro	Izquierda	Derecha	Centro	Izquierda		
1	4.97	4.94	5.02	5.00	5.06	5.03	Escalón No. 1	Rápida Escalonada
2	5.03	4.95	4.99	5.08	4.99	4.99	Escalón No. 3	Rápida Escalonada
3	5.01	5.03	5.00	5.03	5.00	5.04	Escalón No. 5	Rápida Escalonada
4	5.02	5.04	5.03	5.00	4.99	5.01	Escalón No. 7	Rápida Escalonada
5	5.04	5.01	5.06	4.96	4.99	4.99	Escalón No. 9	Rápida Escalonada
6	4.91	4.87	4.94	5.02	5.01	4.97	Escalón No. 11	Rápida Escalonada
7	5.13	4.95	5.03	4.93	4.88	4.93	Escalón No. 15	Rápida Escalonada
8	5.01	5.02	5.02	5.09	4.98	5.03	Escalón No. 20	Rápida Escalonada
9	5.02	4.99	5.00	5.08	5.05	5.06	Escalón No. 25	Rápida Escalonada
10	5.03	5.00	5.04	5.05	5.02	5.01	Escalón No. 30	Rápida Escalonada
11	5.04	5.08	5.06	5.07	5.05	5.04	Escalón No. 35	Rápida Escalonada
12	5.08	5.01	5.04	5.00	5.02	4.99	Escalón No. 42	Rápida Escalonada
13	5.04	4.97	5.01	5.03	5.00	5.11	Escalón No. 52	Rápida Escalonada
14	5.03	4.95	4.99	5.00	5.01	5.06	Escalón No. 62	Rápida Escalonada
15	5.04	4.97	5.00	4.98	4.99	5.01	Escalón No. 72	Rápida Escalonada
16	5.03	5.01	5.02	5.02	5.02	4.97	Escalón No. 81	Rápida Escalonada
17	5.05	5.02	5.03	5.03	4.99	4.93	Escalón No. 92	Rápida Escalonada

GEOMETRÍA MODIFICADA M1

Tabla No. 3: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado para geometría modificada M1 (longitud del escalón) con ayuda de un medidor láser.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - GEOMETRÍA MODIFICADA M1
(FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

MEDICIONES CON DISTANCIÓMETRO			
No.	Ancho (cm)	Ubicación	Observaciones
1	51.83	Inicio del Perfil Curvo	Perfil Curvo
2	51.78	Final del Perfil Curvo	Perfil Curvo
3	51.83	Escalón No. 9	Rápida Escalonada
4	51.83	Escalón No. 11	Rápida Escalonada
5	51.78	Escalón No. 15	Rápida Escalonada
6	51.83	Escalón No. 20	Rápida Escalonada
7	51.76	Escalón No. 25	Rápida Escalonada
8	51.76	Escalón No. 30	Rápida Escalonada
9	51.83	Escalón No. 35	Rápida Escalonada
10	51.73	Escalón No. 42	Rápida Escalonada
11	51.87	Escalón No. 52	Rápida Escalonada
12	51.77	Escalón No. 62	Rápida Escalonada
13	51.75	Escalón No. 72	Rápida Escalonada
14	51.80	Escalón No. 81	Rápida Escalonada
15	51.80	Escalón No. 92	Rápida Escalonada

Tabla No. 4: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado para geometría modificada M1 (huella y contrahuella) con ayuda de un nonio.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - GEOMETRIA MODIFICADA M1
(FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

MEDICIONES CALIBRADOR								
No.	HUELLA (cm)			CONTRAHUELLA (cm)			Ubicación	Observaciones
	Derecha	Centro	Izquierda	Derecha	Centro	Izquierda		
1	5.04	5.01	5.06	4.96	4.99	4.99	Escalón No. 9	Rápida Escalonada
2	4.91	4.87	4.94	5.02	5.01	4.97	Escalón No. 11	Rápida Escalonada
3	5.13	4.95	5.03	4.93	4.88	4.93	Escalón No. 15	Rápida Escalonada
4	5.01	5.02	5.02	5.09	4.98	5.03	Escalón No. 20	Rápida Escalonada
5	5.02	4.99	5.00	5.08	5.05	5.06	Escalón No. 25	Rápida Escalonada
6	5.03	5.00	5.04	5.05	5.02	5.01	Escalón No. 30	Rápida Escalonada
7	5.04	5.08	5.06	5.07	5.05	5.04	Escalón No. 35	Rápida Escalonada
8	5.08	5.01	5.04	5.00	5.02	4.99	Escalón No. 42	Rápida Escalonada
9	5.04	4.97	5.01	5.03	5.00	5.11	Escalón No. 52	Rápida Escalonada
10	5.03	4.95	4.99	5.00	5.01	5.06	Escalón No. 62	Rápida Escalonada
11	5.04	4.97	5.00	4.98	4.99	5.01	Escalón No. 72	Rápida Escalonada
12	5.03	5.01	5.02	5.02	5.02	4.97	Escalón No. 81	Rápida Escalonada
13	5.05	5.02	5.03	5.03	4.99	4.93	Escalón No. 92	Rápida Escalonada

GEOMETRÍA MODIFICADA M2

Tabla No. 5: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado para geometría modificada M2 (longitud del escalón) con ayuda de un medidor láser.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - GEOMETRIA MODIFICADA M2
(FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

MEDICIONES CON DISTANCIÓMETRO			
No.	Ancho (cm)	Ubicación	Observaciones
1	51.79	Escalón a	Rápida Escalonada
2	51.81	Escalón c	Rápida Escalonada
3	51.83	Escalón No. 1	Rápida Escalonada
4	51.78	Escalón No. 3	Rápida Escalonada
5	51.80	Escalón No. 5	Rápida Escalonada
6	51.75	Escalón No. 7	Rápida Escalonada
7	51.83	Escalón No. 9	Rápida Escalonada
8	51.83	Escalón No. 11	Rápida Escalonada
9	51.78	Escalón No. 15	Rápida Escalonada
10	51.83	Escalón No. 20	Rápida Escalonada
11	51.76	Escalón No. 25	Rápida Escalonada
12	51.76	Escalón No. 30	Rápida Escalonada
13	51.83	Escalón No. 35	Rápida Escalonada
14	51.73	Escalón No. 42	Rápida Escalonada
15	51.87	Escalón No. 52	Rápida Escalonada
16	51.77	Escalón No. 62	Rápida Escalonada
17	51.75	Escalón No. 72	Rápida Escalonada
18	51.80	Escalón No. 81	Rápida Escalonada
19	51.80	Escalón No. 92	Rápida Escalonada

Tabla No. 6: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado para geometría modificada M2 (huella y contrahuella) con ayuda de un nonio.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - GEOMETRÍA MODIFICADA M2
(FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

MEDICIONES CALIBRADOR								
No.	HUELLA (cm)			CONTRAHUELLA (cm)			Ubicación	Observaciones
	Derecha	Centro	Izquierda	Derecha	Centro	Izquierda		
1	4.99	4.99	5.00	5.00	4.98	5.02	Escalón a	Rápida Escalonada
2	5.01	5.00	4.99	4.97	4.99	5.01	Escalón c	Rápida Escalonada
3	4.97	4.94	5.02	5.00	5.06	5.03	Escalón No. 1	Rápida Escalonada
4	5.03	4.95	4.99	5.08	4.99	4.99	Escalón No. 3	Rápida Escalonada
5	5.01	5.03	5.00	5.03	5.00	5.04	Escalón No. 5	Rápida Escalonada
6	5.02	5.04	5.03	5.00	4.99	5.01	Escalón No. 7	Rápida Escalonada
7	5.04	5.01	5.06	4.96	4.99	4.99	Escalón No. 9	Rápida Escalonada
8	4.91	4.87	4.94	5.02	5.01	4.97	Escalón No. 11	Rápida Escalonada
9	5.13	4.95	5.03	4.93	4.88	4.93	Escalón No. 15	Rápida Escalonada
10	5.01	5.02	5.02	5.09	4.98	5.03	Escalón No. 20	Rápida Escalonada
11	5.02	4.99	5.00	5.08	5.05	5.06	Escalón No. 25	Rápida Escalonada
12	5.03	5.00	5.04	5.05	5.02	5.01	Escalón No. 30	Rápida Escalonada
13	5.04	5.08	5.06	5.07	5.05	5.04	Escalón No. 35	Rápida Escalonada
14	5.08	5.01	5.04	5.00	5.02	4.99	Escalón No. 42	Rápida Escalonada
15	5.04	4.97	5.01	5.03	5.00	5.11	Escalón No. 52	Rápida Escalonada
16	5.03	4.95	4.99	5.00	5.01	5.06	Escalón No. 62	Rápida Escalonada
17	5.04	4.97	5.00	4.98	4.99	5.01	Escalón No. 72	Rápida Escalonada
18	5.03	5.01	5.02	5.02	5.02	4.97	Escalón No. 81	Rápida Escalonada
19	5.05	5.02	5.03	5.03	4.99	4.93	Escalón No. 92	Rápida Escalonada

ANEXO 3
DATOS LEVANTADOS EN LA COMPROBACIÓN GEOMÉTRICA

Tabla No. 7: Comparación entre las coordenadas en planos y las obtenidas del levantamiento topográfico con estación total de la instalación experimental.

LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO										
Zona	Punto	Escalón	Coordenadas Planos		Coordenadas Instalación Experimental		Desviación		Error	
			X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (%)	Y (%)
Canal de Aproximación	1	---	123.856	196.423	123.853	196.425	0.003	-0.002	<1	<1
	2	---	120.868	196.423	120.871	196.424	-0.003	-0.001	<1	<1
Rápida Escalonada	3	3	120.728	196.423	120.730	196.423	-0.002	0.000	<1	<1
	4	8	120.478	196.423	120.480	196.424	-0.002	-0.001	<1	<1
	5	10	120.378	196.423	120.380	196.425	-0.002	-0.002	<1	<1
	6	15	120.128	196.423	120.130	196.425	-0.002	-0.002	<1	<1
	7	20	119.878	196.423	119.880	196.425	-0.002	-0.002	<1	<1
	8	25	119.628	196.423	119.626	196.426	0.002	-0.003	<1	<1
	9	30	119.378	196.423	119.380	196.424	-0.002	-0.001	<1	<1
	10	35	119.128	196.423	119.126	196.425	0.002	-0.002	<1	<1
	11	42	118.778	196.423	118.780	196.425	-0.002	-0.002	<1	<1
	12	52	118.278	196.423	118.281	196.426	-0.003	-0.003	<1	<1
	13	62	117.778	196.423	117.780	196.424	-0.002	-0.001	<1	<1
	14	72	117.278	196.423	117.280	196.425	-0.002	-0.002	<1	<1
	15	81	116.828	196.423	116.831	196.426	-0.003	-0.003	<1	<1
	16	92	116.278	196.423	116.281	196.424	-0.003	-0.001	<1	<1
Canal de Salida	17	---	115.925	196.423	115.927	196.420	-0.002	0.003	<1	<1
	18	---	112.725	196.423	112.727	196.421	-0.002	0.002	<1	<1

Tabla No. 8: Comparación de niveles de la instalación experimental en planos y las obtenidas del levantamiento con nivel topográfico.

NIVELES						
Zona	Punto	Escalón	Nivel Plano	Nivel Instalación Experimental	Desviación	Error
			Z (m)	Z (m)	ΔZ (m)	ΔZ (%)
Canal de Ingreso	1	...	5.9438	5.9508	-0.0070	-0.12%
	2	...	5.9298	5.9333	-0.0035	-0.06%
	3	...	5.9158	5.9213	-0.0055	-0.09%
	4	...	5.9018	5.9063	-0.0045	-0.08%
	5	...	5.8871	5.8943	-0.0072	-0.12%
Rápida Escalonada	6	1	5.8840	5.8921	-0.0081	-0.14%
	7	2	5.8710	5.8751	-0.0041	-0.07%
	8	3	5.8480	5.8511	-0.0031	-0.05%
	9	4	5.8140	5.8191	-0.0051	-0.09%
	10	5	5.7700	5.7749	-0.0049	-0.08%
	11	7	5.6700	5.6767	-0.0067	-0.12%
	12	9	5.5700	5.5733	-0.0033	-0.06%

NIVELES						
Zona	Punto	Escalón	Nivel Plano	Nivel Instalación Experimental	Desviación	Error
			Z (m)	Z (m)	ΔZ (m)	ΔZ (%)
	13	11	5.4700	5.4723	-0.0023	-0.04%
	14	15	5.2700	5.2703	-0.0003	-0.01%
	15	20	5.0200	5.0213	-0.0013	-0.03%
	16	25	4.7700	4.7693	0.0007	0.01%
	17	30	4.5200	4.5183	0.0017	0.04%
	18	35	4.2700	4.2693	0.0007	0.02%
	19	42	3.9200	3.9183	0.0017	0.04%
	20	52	3.4200	3.4173	0.0027	0.08%
	21	62	2.9200	2.9173	0.0027	0.09%
	22	72	2.4200	2.4193	0.0007	0.03%
	23	81	1.9700	1.9723	-0.0023	-0.12%
	24	92	1.4200	1.4233	-0.0033	-0.23%
Canal de Salida	25	...	1.2735	1.2713	0.0022	0.17%
	26	...	1.2695	1.2656	0.0039	0.31%
	27	...	1.2616	1.2596	0.0020	0.16%

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 9: Comparación del ángulo de inclinación en planos y las obtenidas del levantamiento topográfico de la instalación experimental.

ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA RÁPIDA ESCALONADA								
Escalón	Nivel (m)	Δh (m)	ΔL (m)	Ángulo °	Ángulo Planos	Ángulo Instalación	Desviación	Error (%)
9	5.5733	---	---	---	45	44.91	0.093	0.21
20	5.0213	0.552	0.5518	45.01				
35	4.2693	0.752	0.7539	44.93				
52	3.4173	0.852	0.8557	44.88				
72	2.4193	0.998	1.0000	44.94				
92	1.4233	0.996	1.0038	44.78				

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 10: Promedio de mediciones realizadas en la rápida escalonada con calibrador.

MEDICIONES CON NONIO				
	Derecha			
	Promedio Planos (cm)	Promedio Instalación (cm)	Desviación (cm)	Desviación (%)
Huella	5.00	5.04	-0.04	-0.85%
ContraHuella	5.00	5.02	-0.02	-0.40%
MEDICIONES CON NONIO				
	Eje			
	Promedio Planos (cm)	Promedio Instalación (cm)	Desviación (cm)	Desviación (%)
Huella	5.00	4.99	0.01	0.23%
ContraHuella	5.00	5.00	0.00	0.00%
MEDICIONES CON NONIO				
	Izquierda			
	Promedio Planos (cm)	Promedio Instalación (cm)	Desviación (cm)	Desviación (%)
Huella	5.00	5.03	-0.03	-0.54%
ContraHuella	5.00	5.01	-0.01	-0.15%
MEDICIONES CON NONIO				
	Promedio Planos (cm)	Promedio Instalación (cm)	Desviación (cm)	Desviación (%)
Huella	5.00	5.02	-0.02	-0.38%
ContraHuella	5.00	5.01	-0.01	-0.19%

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

ANEXO 4
DIAGRAMAS DE FLUJO APLICADOS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE
FRICCIÓN Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN LA INSTALACIÓN
EXPERIMENTAL

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE FRICCION (fe)

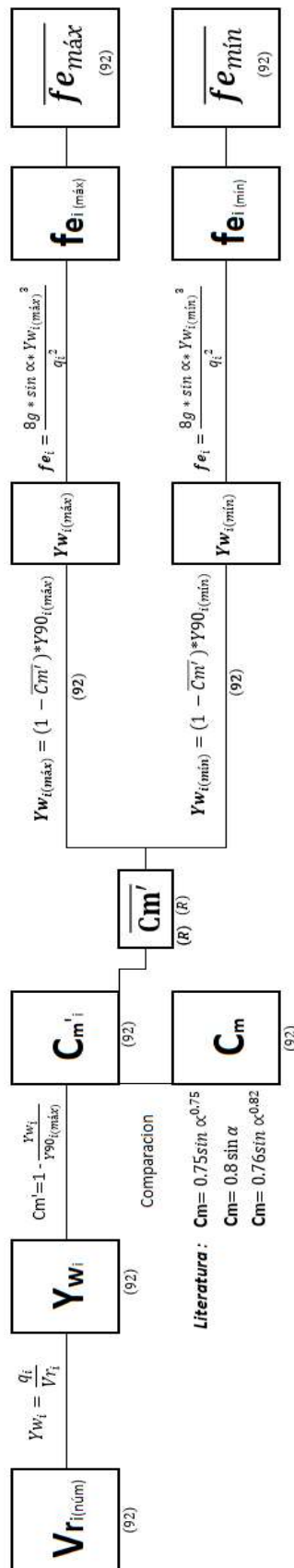
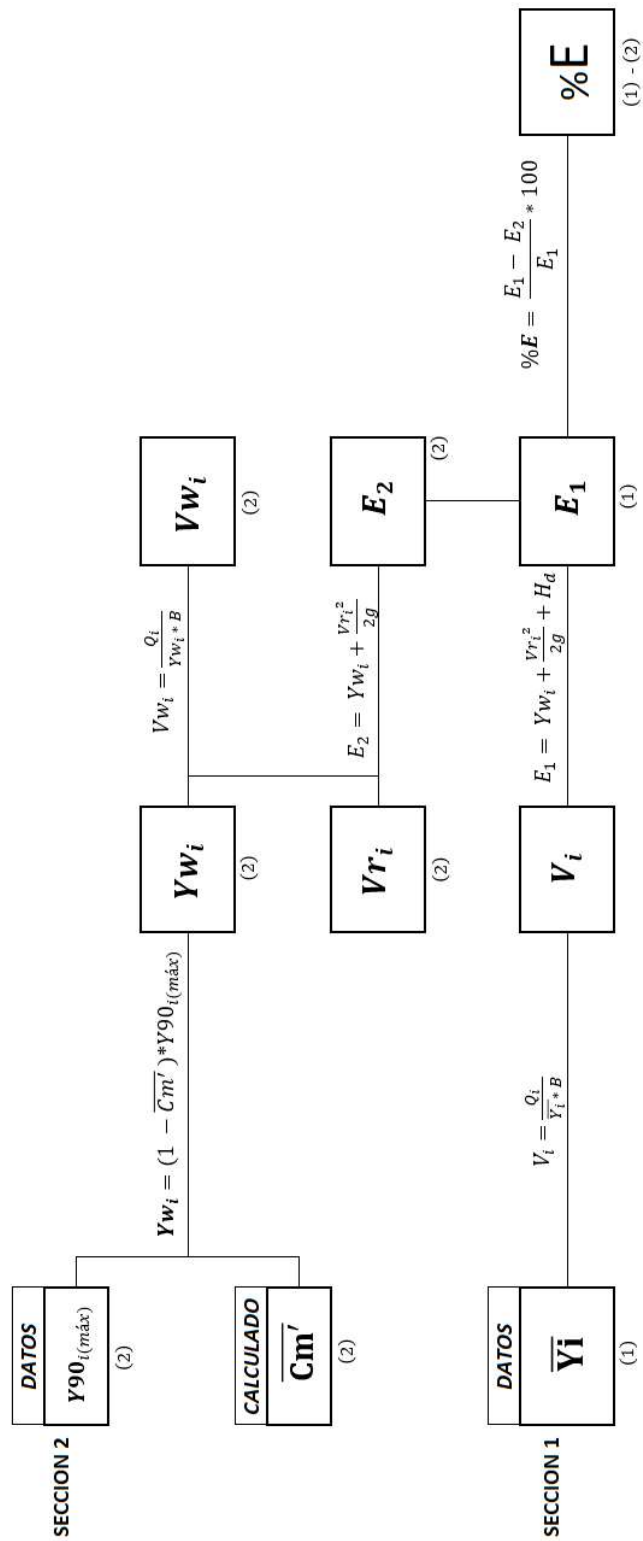


DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA




ANEXO 5


**REGISTRO DE DATOS: PRUEBAS EN DISEÑO ORIGINAL, DISEÑO
MODIFICADO M1 Y DISEÑO MODIFICADO M2**

PRUEBAS EN DISEÑO ORIGINAL

Tabla No. 11: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, geometría original, P0.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)



FECHA/ HORA: 18/07/2018 11:00 a. m.

Q = 14.48 l/s

No.	MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA												Zona	
	Flujo a la Izquierda						Flujo a la Derecha							Ubicación
	Altura de agua (cm)						Altura de agua (cm)							
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Promedio			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Promedio				
Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio			
Regla	1.8	2.0	1.9	1.6	1.8	1.7	1.6	1.8	1.7	1.7	1.7	Escalón N° 1 ($h_{inclinada}$)	Rápida escalonada	
Regla	1.6	1.8	1.7	1.4	1.7	1.5	1.4	1.7	1.5	1.5	1.5	Escalón N° 3 ($h_{inclinada}$)		
Regla	1.2	2.6	1.9	1.0	2.5	1.8	1.0	2.5	1.8	1.8	1.8	Escalón N° 5 ($h_{inclinada}$)		
Regla	1.5	2.7	2.1	1.5	2.7	2.1	1.5	2.7	2.1	2.1	2.1	Escalón N° 7 ($h_{inclinada}$)		
Regla	1.8	2.7	2.3	1.7	2.9	2.3	1.7	2.9	2.3	2.3	2.3	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.0	3.0	2.5	2.0	2.8	2.4	2.0	2.8	2.4	2.4	2.4	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.0	2.9	2.5	2.0	3.1	2.5	2.0	3.1	2.5	2.5	2.5	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)		
Regla	1.5	3.0	2.3	1.4	3.1	2.3	1.4	3.1	2.3	2.3	2.3	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.2	3.1	2.7	2.1	3.0	2.6	2.1	3.0	2.6	2.6	2.6	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.1	3.5	2.8	1.9	3.3	2.6	1.9	3.3	2.6	2.6	2.6	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.2	2.6	2.4	2.2	2.8	2.5	2.2	2.8	2.5	2.5	2.5	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)		
Cinta	1.0	1.5	1.3	1.0	1.4	1.2	1.0	1.4	1.2	1.2	1.2	0 cm		Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta	1.1	2.4	1.8	1.0	2.5	1.8	1.0	2.5	1.8	1.8	1.8	64 cm		
Cinta	1.0	2.6	1.8	1.0	2.5	1.8	1.0	2.5	1.8	1.8	1.8	128 cm		

Tabla No. 12: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, P0.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: PO

FECHA/ HORA: 18/07/2018 11:00 a. m.

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental				
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58	$Q_{\text{Promedio}} \text{ (l/s)}$ 14.48			
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		43.16	34.16				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		14.44	14.52				
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)		$h_{\text{medido}} - h_0$ (cm)		Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)		
23.45	25.53	25.59	2.08	2.14	70.0		
23.53	25.42	25.45	1.89	1.92	145.0		
23.60	25.68	25.70	2.08	2.10	220.0		
23.78	25.65	25.70	1.87	1.92	254.3		
23.75	25.67	25.64	1.92	1.89	270.0		
23.74	25.66	25.68	1.92	1.94	286.5		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	68.20	70.1		1.9			Can. Aprox. (70,0 cm)
A2-C	66.70	68.5		1.8			Can. Aprox. (145,0 cm)
A3-D	65.20	67.0		1.8			Can. Aprox. (220,0 cm)
A3-C	65.20	67.1		1.9			
A3-I	65.15	66.9		1.8			
A4-D	64.15	65.6		1.4			Can. Aprox. (297,0 cm)
A4-C	64.15	65.8		1.6			
A4-I	64.10	65.5		1.4			
E1-C	63.80	66.3	66.4	2.5	2.6		Escalón 1 (301,0 cm)
E2-D	62.45	63.1	63.2	0.6	0.8		Escalón 2 (305,4 cm)
E2-C	62.45	63.3	63.4	0.8	0.9		
E2-I	62.40	62.8	62.9	0.4	0.5		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	112.8	100.6		12.2		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	---	---		---		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 13: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, Prueba 1.



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 DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P1

Q = 23.13 l/s

FECHA/ HORA: 17/07/2018 2:30 p. m.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona	
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)					
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio			
Regla	2.8	2.8	2.8	2.6	2.7	2.7	Escalón N° 1 ($h_{inclinada}$)	Rápida escalonada	
Regla	2.1	2.7	2.4	2.0	2.6	2.4	Escalón N° 3 ($h_{inclinada}$)		
Regla	1.9	3.2	2.6	1.9	3.4	2.7	Escalón N° 5 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.0	3.4	2.7	2.1	3.5	2.8	Escalón N° 7 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.0	3.6	2.8	1.9	3.5	2.7	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.7	4.0	3.4	2.6	3.8	3.2	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.9	3.9	3.4	2.6	3.8	3.2	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)		
Regla	3.0	3.8	3.4	3.2	3.9	3.6	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)		
Regla	3.0	4.2	3.6	3.2	4.0	3.6	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.5	4.2	3.4	2.3	4.1	3.2	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.7	3.3	3.0	2.7	3.5	3.1	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)		
Cinta	1.4	2.1	1.8	1.4	2.2	1.8	0 cm		Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta	1.3	3.1	2.2	1.3	3.0	2.2	64 cm		
Cinta	1.3	2.9	2.1	1.3	2.9	2.1	128 cm		

Tabla No. 14: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros en la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, P1.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P1

FECHA/ HORA: 17/07/2018 2:30 p. m.

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 23.13	
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58		
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		45.27	36.28		
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		23.07	23.20		
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)
23.49	26.23	26.22	2.74	2.73	70.0
23.54	26.36	26.20	2.82	2.66	145.0
23.48	26.64	26.45	3.16	2.97	220.0
23.80	26.46	26.40	2.66	2.60	254.3
23.78	26.43	26.45	2.65	2.67	270.0
23.74	26.40	26.51	2.66	2.77	286.5
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA					
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)	Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación
A1-C	68.20	70.07	1.87		Can. Aprox. (70,0 cm)
A2-C	66.70	69.30	2.60		Can. Aprox. (145,0 cm)
A3-D	65.20	67.60	2.40		Can. Aprox. (220,0 cm)
A3-C	65.20	68.40	3.20		
A3-I	65.15	67.50	2.35		
A4-D	64.15	65.90	1.75		Can. Aprox. (297,0 cm)
A4-C	64.15	66.10	1.95		
A4-I	64.10	65.60	1.50		
E1-C	63.80	66.80	3.00		Escalón 1 (301,0 cm)
E2-D	62.45	62.30	-0.15		Escalón 2 (305,4 cm)
E2-C	62.45	62.60	0.15		
E2-I	62.40	61.80	-0.60		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)					
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)	Carga Piezométrica (cm)	Ubicación	
I1-C	113.0	97.7	15.3	Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	---	---	---	Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 15: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, Prueba 2.



**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 DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P2

$$Q = 34.09 \text{ l/s}$$

FECHA/ HORA: 17/07/2018 8:45 a. m.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona	
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)					
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio			
Regla	3.7	4.3	4.0	3.6	4.1	3.8	Escalón N° 1 ($h_{inclinada}$)	Rápida escalonada	
Regla	0.3	4.5	0.5	0.3	4.3	0.5	Escalón N° 3 ($h_{inclinada}$)		
Regla	1.1	5.6	1.3	1.0	5.4	1.3	Escalón N° 5 ($h_{inclinada}$)		
Regla	1.2	5.6	1.6	1.3	5.4	1.7	Escalón N° 7 ($h_{inclinada}$)		
Regla	5.9	6.8	6.4	5.6	6.5	6.1	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)		
Regla	4.9	6.5	5.7	4.8	6.3	5.6	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)		
Regla	3.2	4.6	3.9	3.1	4.7	3.9	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)		
Regla	3.3	4.5	3.9	3.5	4.7	4.1	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)		
Regla	3.7	4.7	4.2	3.9	4.5	4.2	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)		
Regla	3.6	4.3	4.0	3.4	4.1	3.8	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)		
Regla	3.7	4.8	4.3	3.9	4.5	4.2	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)		
Cinta	2.0	2.9	2.5	2.0	3.0	2.5	0 cm		Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta	1.9	3.5	2.7	2.0	3.6	2.8	64 cm		
Cinta	1.8	2.4	2.1	1.8	2.5	2.2	128 cm		

Tabla No. 16: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, P2.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P2

FECHA/ HORA: 17/07/2018 8:45 a. m.

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 34.09			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		47.62	38.62				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		34.04	34.14				
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	27.27	27.35	3.77	3.85	70.0		
23.55	26.50	26.44	2.95	2.89	145.0		
23.63	27.47	27.50	3.84	3.87	220.0		
23.80	27.14	27.17	3.34	3.37	254.3		
23.78	27.10	27.08	3.32	3.30	270.0		
23.75	27.04	27.02	3.29	3.27	286.5		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	68.20	71.30		3.10			Can. Aprox. (70,0 cm)
A2-C	66.70	69.00		2.30			Can. Aprox. (145,0 cm)
A3-D	65.20	67.90		2.70			Can. Aprox. (220,0 cm)
A3-C	65.20	69.50		4.30			
A3-I	65.15	67.80		2.65			
A4-D	64.15	65.80		1.65			Can. Aprox. (297,0 cm)
A4-C	64.15	66.00		1.85			
A4-I	64.10	65.00		0.90			
E1-C	63.80	66.90	67.00	3.10	3.20	3.15	Escalón 1 (301,0 cm)
E2-D	62.45	62.10	62.10	-0.35	-0.35	-0.35	Escalón 2 (305,4 cm)
E2-C	62.45	62.00	62.00	-0.45	-0.45	-0.45	
E2-I	62.40	62.10	62.10	-0.30	-0.30	-0.30	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C						Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	---	---		---		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 17: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, Prueba 3.



**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 DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P3

FECHA/ HORA: 16/07/2018 9:00 a. m.

Q = 44.50 l/s

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)						Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)						Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	4.2	5.0	4.6	3.9	4.1	4.0	4.2	5.0	4.6	3.9	4.1	4.0	Escalón N° 1 (h _{inclinada})	Rápida escalonada
Regla	0.4	0.8	0.6	0.4	0.8	0.6	0.4	0.8	0.6	0.4	0.8	0.6	Escalón N° 3 (h _{inclinada})	
Regla	2.0	2.2	2.1	2.1	2.3	2.2	2.1	2.3	2.2	2.1	2.3	2.2	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	2.8	4.0	3.4	3.0	4.1	3.6	3.0	4.1	3.6	3.0	4.1	3.6	Escalón N° 7 (h _{inclinada})	
Regla	5.3	8.2	6.8	5.1	8.0	6.6	5.1	8.0	6.6	5.1	8.0	6.6	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	6.0	6.7	6.4	5.7	6.5	6.1	5.7	6.5	6.1	5.7	6.5	6.1	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Regla	4.7	5.5	5.1	4.5	5.2	4.9	4.5	5.2	4.9	4.5	5.2	4.9	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Regla	4.0	5.2	4.6	4.1	5.3	4.7	4.1	5.3	4.7	4.1	5.3	4.7	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Regla	4.5	5.3	4.9	4.5	5.1	4.8	4.5	5.1	4.8	4.5	5.1	4.8	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Regla	4.6	6.0	5.3	4.3	6.1	5.2	4.3	6.1	5.2	4.3	6.1	5.2	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	4.2	5.8	5.0	4.3	5.9	5.1	4.3	5.9	5.1	4.3	5.9	5.1	Escalón N° 92 (h _{inclinada})	
Cinta	2.6	3.6	3.1	2.8	3.4	3.1	2.8	3.4	3.1	2.8	3.4	3.1	0 cm	
Cinta	2.8	4.0	3.4	3.0	4.1	3.6	3.0	4.1	3.6	3.0	4.1	3.6	64 cm	
Cinta	2.2	3.1	2.7	2.0	3.1	2.6	2.0	3.1	2.6	2.0	3.1	2.6	128 cm	

Canal de salida al pie de la rápida escalonada

Tabla No. 18: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, P3.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P3

FECHA/ HORA: 16/07/2018 9:00 a. m.

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 44.50			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		49.64	40.63				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		44.47	44.52				
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)		
23.51	27.96	28.10	4.45	4.59	70.0		
23.53	27.29	27.32	3.76	3.79	145.0		
23.62	28.08	28.20	4.46	4.58	220.0		
23.79	28.03	28.00	4.24	4.21	254.3		
23.76	27.91	27.87	4.15	4.11	270.0		
23.73	27.70	27.68	3.97	3.95	286.5		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	68.20	71.90		3.70			Can. Aprox. (70,0 cm)
A2-C	66.70	69.80		3.10			Can. Aprox. (145,0 cm)
A3-D	65.20	69.10		3.90			Can. Aprox. (220,0 cm)
A3-C	65.20	70.30		5.10			
A3-I	65.15	68.80		3.65			
A4-D	64.15	66.20		2.05			Can. Aprox. (297,0 cm)
A4-C	64.15	66.10		1.95			
A4-I	64.10	65.50		1.40			
E1-C	63.80	67.00	67.70	3.20	3.90	3.55	Escalón 1 (301,0 cm)
E2-D	62.45	60.00	60.00	-2.45	-2.45	-2.45	Escalón 2 (305,4 cm)
E2-C	62.45	60.30	60.30	-2.15	-2.15	-2.15	
E2-I	62.40	61.50	61.60	-0.90	-0.80	-0.85	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.6	91.6		22.0		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	---	---		---		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 19: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, Prueba 4.



**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 DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P4

FECHA/ HORA: 13/07/2018 11:00 a. m.

$$Q = 55.88 \text{ l/s}$$

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)						Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)						Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	5.8	6.2	6.0	6.0	6.6	6.3	6.0	6.6	6.3	6.3	6.3	Escalón N° 1 ($h_{inclinada}$)	Rápida escalonada	
Regla	1.8	8.0	2.2	8.2	2.0	8.1	1.5	7.8	2.0	8.0	1.8	Escalón N° 3 ($h_{inclinada}$)		
Regla	5.0	10.2	5.5	11.2	5.3	10.7	4.8	10.0	5.3	10.9	5.1	Escalón N° 5 ($h_{inclinada}$)		
Regla	6.0	11.5	6.5	14.8	6.3	13.2	5.8	11.2	6.3	14.5	6.1	Escalón N° 7 ($h_{inclinada}$)		
Regla	2.0	11.8	2.4	15.3	2.2	13.6	2.0	11.6	2.5	15.0	2.3	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)		
Regla	10.2	13.3	13.3	11.8	11.8	11.5	9.9	13.0	13.0	11.5	11.5	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)		
Regla	8.4	9.8	9.8	9.1	9.1	9.0	8.5	9.5	9.5	9.0	9.0	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)		
Regla	4.9	6.2	6.2	5.6	5.6	5.4	4.8	6.0	6.0	5.4	5.4	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)		
Regla	5.7	6.4	6.4	6.1	6.1	5.9	5.6	6.2	6.2	5.9	5.9	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)		
Regla	5.6	6.9	6.9	6.3	6.3	6.2	5.4	7.0	7.0	6.2	6.2	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)		
Regla	5.1	6.9	6.9	6.0	6.0	6.1	5.1	7.0	7.0	6.1	6.1	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)		
Cinta	3.4	4.2	4.2	3.8	3.8	3.7	3.2	4.2	4.2	3.7	3.7	0 cm		
Cinta	3.7	4.5	4.5	4.1	4.1	4.0	3.6	4.4	4.4	4.0	4.0	64 cm		
Cinta	2.6	4.0	4.0	3.3	3.3	3.3	2.7	3.9	3.9	3.3	3.3	128 cm		
														Canal de salida al pie de la rápida escalonada

Tabla No. 20: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, P4.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P4

FECHA/ HORA: 13/07/2018 11:00 a. m.

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental				
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58	Q_{Promedio} (l/s) 55.88			
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		51.70	42.65				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		55.97	55.79				
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)		$h_{\text{medido}} - h_0$ (cm)		Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)		
23.52	28.80	28.90	5.28	5.38	70.0		
23.58	27.93	27.80	4.35	4.22	145.0		
23.67	29.11	28.93	5.44	5.26	220.0		
23.84	29.09	28.94	5.25	5.10	254.3		
23.79	28.52	28.73	4.73	4.94	270.0		
23.80	28.50	28.62	4.70	4.82	286.5		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
A1-C	68.20	72.30		4.10			Can. Aprox. (70,0 cm)
A2-C	66.70	70.00		3.30			Can. Aprox. (145,0 cm)
A3-D	65.20	69.80		4.60			Can. Aprox. (220,0 cm)
A3-C	65.20	70.07		4.87			
A3-I	65.15	69.10		3.95			
A4-D	64.15	66.20	66.40	2.05	2.25	2.15	Can. Aprox. (297,0 cm)
A4-C	64.15	66.10	66.20	1.95	2.05	2.00	
A4-I	64.10	64.80	65.10	0.70	1.00	0.85	
E1-C	63.80	66.90	67.80	3.10	4.00	3.55	Escalón 1 (301,0 cm)
E2-D	62.45	59.40		-3.05		-3.05	Escalón 2 (305,4 cm)
E2-C	62.45	62.50		0.05		0.05	
E2-I	62.40	62.50		0.10		0.10	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C						Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	---	---		---		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 21: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, Prueba 5.



**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 DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO) FECHA/ HORA: 12/07/2018 9:00 a. m.

Q = 78.08 l/s

No.	Flujo a la Izquierda						Flujo a la Derecha						Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)						Altura de agua (cm)							
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Promedio			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Promedio				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	7.8	9.1	8.5	5.4	8.7	7.1	Escalón N° 1 ($h_{inclinada}$)							
Regla	1.7	2.3	2.0	2.0	2.4	2.2	Escalón N° 3 ($h_{inclinada}$)							
Regla	5.8	6.8	6.3	6.0	7.0	6.5	Escalón N° 5 ($h_{inclinada}$)							
Regla	9.3	10.2	9.8	9.5	10.5	10.0	Escalón N° 7 ($h_{inclinada}$)							
Regla	10.0	12.0	11.0	10.0	12.0	11.0	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)							
Regla	4.0	5.0	4.5	4.0	5.0	4.5	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)							
Regla	1.2	2.8	2.0	1.0	2.2	1.8	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)							
Regla	6.5	11.0	8.8	6.3	11.3	8.8	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)							
Regla	6.9	8.3	7.6	6.8	8.2	7.5	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)							
Regla	6.9	8.0	7.5	6.8	8.1	7.5	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)							
Regla	6.3	8.2	7.3	6.1	8.4	7.3	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)							
Cinta	4.4	5.4	4.9	4.8	5.7	5.3	0 cm							
Cinta	4.5	6.0	5.3	4.9	6.1	5.5	64 cm							
Cinta	3.6	5.4	4.5	3.6	5.7	4.7	128 cm							

Tabla No. 22: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría original, P5.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P5

FECHA/ HORA: 12/07/2018 9:00 a. m.


Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$


Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 78.08			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		55.35	46.28				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		78.25	77.92				
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)		
23.55	29.94	30.20	6.39	6.65	70.0		
23.59	28.90	29.10	5.31	5.51	145.0		
23.64	30.10	30.20	6.46	6.56	220.0		
23.86	30.13	30.40	6.27	6.54	254.3		
23.79	30.39	30.25	6.60	6.46	270.0		
23.80	29.75	29.90	5.95	6.10	286.5		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
A1-C	68.20	73.20		5.00			Can. Aprox. (70,0 cm)
A2-C	66.70	71.30		4.60			Can. Aprox. (145,0 cm)
A3-D	65.20	70.90		5.70			Can. Aprox. (220,0 cm)
A3-C	65.20	71.60		6.40			
A3-I	65.15	69.90		4.75			
A4-D	64.15	66.00	66.10	1.85	1.95	1.90	Can. Aprox. (297,0 cm)
A4-C	64.15	66.20	66.40	2.05	2.25	2.15	
A4-I	64.10	64.60	64.80	0.50	0.70	0.60	
E1-C	63.80	67.60	67.90	3.80	4.10	3.95	Escalón 1 (301,0 cm)
E2-D	62.45	63.80	63.90	1.35	1.45	1.40	Escalón 2 (305,4 cm)
E2-C	62.45	57.30	57.40	-5.15	-5.05	-5.10	
E2-I	62.40	61.90	62.00	-0.50	-0.40	-0.45	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.0	72.2		40.8		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	82.8	71.1		52.3		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

PRUEBAS EN DISEÑO MODIFICADO M1

Tabla No. 23: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, geometría modificada M1, P0.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA
OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)



FECHA/ HORA: 2018-09-17 9:00

Q = 14.35 l/s

No.	MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA						Ubicación	Zona
	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)		Promedio	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)		Promedio		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Promedio			
Regla	2.0	2.2	2.1	2.2	2.3	2.3	Inicio de la curva	Curva
Regla	1.3	1.4	1.4	1.0	1.2	1.1	Centro de la curva	
Regla	0.7	1.0	0.9	0.6	0.9	0.8	Final de la curva	
Regla	1.4	1.7	1.6	1.1	1.8	1.5	Escalón N° 9 (h _{inclinada})	Rápida escalonada
Regla	1.1	2.3	1.7	1.0	2.4	1.7	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	1.3	2.4	1.9	1.2	2.5	1.9	Escalón N° 11 (h _{inclinada})	
Regla	1.3	2.5	1.9	1.3	2.7	2.0	Escalón N° 12 (h _{inclinada})	
Regla	1.5	2.5	2.0	1.9	2.7	2.3	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Regla	1.7	2.5	2.1	1.9	2.6	2.3	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Regla	1.8	2.5	2.2	1.9	2.7	2.3	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Regla	2.0	2.7	2.4	1.9	2.7	2.3	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Regla	2.0	2.8	2.4	1.9	2.7	2.3	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	2.2	3.0	2.6	2.1	2.8	2.5	Escalón N° 89 (h _{inclinada})	
Cinta	1.2	1.4	1.3	1.2	1.6	1.4	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta	0.8	1.1	1.0	0.7	1.0	0.9	64 cm	
Cinta	0.9	1.5	1.2	0.9	1.6	1.3	128 cm	

Tabla No. 24: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 0.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P0

FECHA/ HORA: 2018-09-17 9:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 14.35			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		43.15	34.10				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		14.40	14.29				
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)	
23,22		25,41	25,35	2,19	2,13	70,0	
23,32		25,26	25,36	1,94	2,04	145,0	
23,44		25,46	25,67	2,02	2,23	220,0	
23,55		25,49	25,56	1,94	2,01	254,3	
23,54		25,45	25,52	1,91	1,98	274,5	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
C1-D	181,90	183,10		1,20			Inicio de la curva (289,8 cm)
C1-C	181,80	182,80		1,00			
C1-I	181,80	183,10		1,30			
C2-D	173,70	173,90		0,20			Centro de la curva (318,5 cm)
C2-C	173,70	173,70		0,00			
C2-I	173,70	173,60		-0,10			
C3-D	156,00	157,80		1,80			Final de la curva (346,8 cm)
C3-C	156,00	156,40		0,40			
C3-I	156,00	156,90		0,90			
E9-D	150,00	153,80	153,40	3,80	3,40	3,60	Escalón 9 (340,4 cm)
E9-C	150,00	154,80	154,10	4,80	4,10	4,45	
E9-I	150,00	153,80	153,40	3,80	3,40	3,60	
E10-D	145,00	144,70		-0,30			Escalón 10 (345,4 cm)
E10-C	144,90	144,60		-0,30			
E10-I	144,90	144,60		-0,30			
E11-D	135,00	134,70		-0,30			Escalón 11 (350,4 cm)
E11-I	135,00	134,80		-0,20			
E12-D	125,00	125,10	124,80	0,10	-0,20	-0,05	Escalón 12 (355,4 cm)
E12-I	125,00	125,60	125,20	0,60	0,20	0,40	
OBSERVACIONES GENERALES EN LA PRUEBA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113,0	100,5		12,5		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73,5	73,3		40,8		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 25: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 1.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	2.5	3.1	2.80	2.5	3.1	2.80	Inicio de la curva	Curva
Regla	1.8	2.3	2.05	1.6	1.9	1.75	Centro de la curva	
Regla	1.3	1.8	1.55	1.2	1.5	1.35	Final de la curva	
Regla	1.7	2.2	1.95	1.6	2.1	1.60	Escalón N° 9 ($h_{inclinada}$)	Rápida escalonada
Regla	2.1	2.6	2.35	1.9	2.6	2.25	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)	
Regla	2.1	2.7	2.40	2.0	2.6	2.30	Escalón N° 12 ($h_{inclinada}$)	
Regla	2.0	2.9	2.45	2.2	3.1	2.65	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)	
Regla	2.0	2.8	2.40	2.2	3.0	2.60	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)	
Regla	2.0	2.6	2.30	2.0	2.9	2.45	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)	
Regla	1.9	2.5	2.20	2.2	2.9	2.55	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)	
Regla	2.5	3.1	2.80	2.7	3.3	3.00	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)	
Regla	3.2	3.9	3.55	3.4	4.0	3.70	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	1.7	2.4	2.05	1.7	2.3	2.00	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta	0.9	1.6	1.25	0.9	1.6	1.25	64 cm	
Cinta	1.1	1.9	1.50	1.2	2.0	1.60	128 cm	



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA
OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)



NOMBRE: _____ PI _____ FECHA/ HORA: 2018-09-14 11:00

Q = 23.35 l/s

Tabla No. 26: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 1.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P1


FECHA/ HORA: 2018-09-14 11:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 23.35			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.59				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		45.37	36.29				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		23.51	23.20				
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)	
23.11		26.09	26.15	2.98	3.04	70.0	
23.31		25.91	25.87	2.60	2.56	145.0	
23.41		26.42	26.36	3.01	2.95	220.0	
23.59		26.29	26.51	2.70	2.92	254.3	
23.55		26.21	26.33	2.66	2.78	274.5	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
C1-D	181.90	183.70		1.80			Inicio de la curva (289,8 cm)
C1-C	181.80	183.00		1.20			
C1-I	181.80	183.30		1.50			
C2-D	173.70	174.00		0.30			Centro de la curva (318,5 cm)
C2-C	173.70	173.70		0.00			
C2-I	173.70	173.40		-0.30			
C3-D	156.00	158.10		2.10			Final de la curva (346,8 cm)
C3-C	156.00	156.50		0.50			
C3-I	156.00	157.20		1.20			
E9-D	150.00	154.90	154.20	4.90	4.20	4.55	Escalón 9 (340,4 cm)
E9-C	149.90	155.90	156.30	6.00	6.40	6.20	
E9-I	149.90	154.90	154.40	5.00	4.50	4.75	
E10-D	145.00	140.20	139.60	-4.80	-5.40	-5.10	Escalón 10 (345,4 cm)
E10-C	144.90	142.50	141.10	-2.40	-3.80	-3.10	
E10-I	144.90	140.00	138.50	-4.90	-6.40	-5.65	
E11-D	135.00	135.10	134.60	0.10	-0.40	-0.15	Escalón 11 (350,4 cm)
E11-I	135.00	135.00	134.30	0.00	-0.70	-0.35	
E12-D	125.00	126.00	125.90	1.00	0.90	0.95	Escalón 12 (355,4 cm)
E12-I	125.00	126.20	126.00	1.20	1.00	1.10	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.00	95.80		17.20		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	0.00	0.00		0.00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	


Tabla No. 27: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 2.


ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA
OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

NOMBRE: _____
 No. Prueba: _____
 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)
 p2

Q = 33.67 l/s

FECHA/ HORA: 2018-09-14 8:45



No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	3.4	4.0	3.70	3.4	4.0	3.70	Inicio de la curva	Curva
Regla	2.8	3.5	3.15	3.2	4.0	3.60	Centro de la curva	
Regla	2.7	3.3	3.00	2.9	3.5	3.20	Final de la curva	
Regla	2.6	3.6	3.10	2.6	3.7	3.15	Escalón N° 9 (h _{inclinada})	Rápida escalonada
Regla	2.5	3.6	3.05	2.5	3.6	3.05	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	2.5	3.5	3.00	2.4	3.5	2.95	Escalón N° 12 (h _{inclinada})	
Regla	2.9	3.8	3.35	3.2	4.1	3.65	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Regla	2.7	3.4	3.05	2.4	3.1	2.75	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Regla	2.5	3.2	2.85	2.5	3.2	2.85	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Regla	2.6	3.3	2.95	2.6	3.4	3.00	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Regla	2.9	3.5	3.20	3.0	3.8	3.40	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	4.2	5.1	4.65	4.3	5.2	4.75	Escalón N° 92 (h _{inclinada})	
Cinta	2.3	3.0	2.65	2.3	2.8	2.55	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta	1.4	2.2	1.80	1.4	2.1	1.75	64 cm	
Cinta	1.3	2.0	1.65	1.5	2.3	1.90	128 cm	

Tabla No. 28: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 2.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P2

FECHA/ HORA: 2018-09-14 8:45

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 33.67			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.59				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		47.54	38.54				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		33.64	33.69				
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)	
23.26		27.17	27.24	3.91	3.98	70.0	
23.37		26.36	26.43	2.99	3.06	145.0	
23.41		27.23	27.53	3.82	4.12	220.0	
23.64		27.36	27.33	3.72	3.69	254.3	
23.58		26.97	27.14	3.39	3.56	274.5	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
C1-D	181.90	183.70		1.80			Inicio de la curva (289,8 cm)
C1-C	181.80	183.00		1.20			
C1-I	181.80	183.00		1.20			
C2-D	173.70	173.90		0.20			Centro de la curva (318,5 cm)
C2-C	173.70	173.30		-0.40			
C2-I	173.70	173.00		-0.70			
C3-D	156.00	158.60		2.60			Final de la curva (346,8 cm)
C3-C	156.00	156.70		0.70			
C3-I	156.00	157.80		1.80			
E9-D	150.00	155.90	155.30	5.90	5.30	5.60	Escalón 9 (340,4 cm)
E9-C	150.00	156.00	155.40	6.00	5.40	5.70	
E9-I	149.90	155.40	154.80	5.50	4.90	5.20	
E10-D	145.00	139.70	138.80	-5.30	-6.20	-5.75	Escalón 10 (345,4 cm)
E10-C	144.90	141.10	139.90	-3.80	-5.00	-4.40	
E10-I	144.90	139.40	138.00	-5.50	-6.90	-6.20	
E11-D	135.00	136.60	134.40	1.60	-0.60	0.50	Escalón 11 (350,4 cm)
E11-I	135.00	134.00	132.80	-1.00	-2.20	-1.60	
E12-D	125.00	126.20	125.00	1.20	0.00	0.60	Escalón 12 (355,4 cm)
E12-I	125.00	126.20	126.40	1.20	1.40	1.30	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.00	87.40		25.60		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	0.00	0.00		0.00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 29: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 3.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	3.8	4.3	4.05	4.7	5.3	5.00	Inicio de la curva	Curva
Regla	3	3.6	3.30	3.5	4	3.75	Centro de la curva	
Regla	3.1	3.8	3.45	2.8	3.5	3.15	Final de la curva	
Regla	3.0	5.5	4.25	3.0	5.6	4.30	Escalón N° 9 (h _{inclinada})	Rápida escalonada
Regla	3.0	5.8	4.40	3.2	5.3	4.25	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	2.9	6.3	4.60	2.8	6.5	4.65	Escalón N° 12 (h _{inclinada})	
Regla	3.5	5.4	4.45	3.6	5.5	4.55	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Regla	3.4	5.1	4.25	3.5	5.2	4.35	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Regla	3.4	5.3	4.35	3.5	5.4	4.45	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Regla	3.2	5.5	4.35	3.3	5.6	4.45	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Regla	3.5	6.1	4.80	3.6	6.2	4.90	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	5.2	6.5	5.85	5.2	6.7	5.95	Escalón N° 89 (h _{inclinada})	
Cinta	2.8	3.4	3.10	3.0	3.6	3.30	0 cm	
Cinta	1.8	2.3	2.05	1.9	2.7	2.30	64 cm	
Cinta	1.4	2.0	1.70	1.5	2.0	1.75	128 cm	



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA
OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)



NOMBRE: _____
 No. Prueba: P3

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO)

Q = 44.15 l/s

FECHA/ HORA: 2018-09-13 14:15

Tabla No. 30: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 3.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P3

FECHA/ HORA: 2018-09-13 14:15

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 44.15			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.59				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		49.59	40.56				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		44.20	44.09				
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)			
23.00	27.90	4.90		70.0			
23.34	27.20	3.86		145.0			
23.38	27.75	4.37		220.0			
23.58	27.75	4.17		254.3			
23.50	27.60	4.10		274.5			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
C1-D	181.90	183.90		2.00			Inicio de la curva (283,69 cm)
C1-C	181.80	183.10		1.30			
C1-I	181.80	183.20		1.40			
C2-D	173.40	173.90		0.50			Centro de la curva (310,80 cm)
C2-C	173.40	173.10		-0.30			
C2-I	173.40	172.80		-0.60			
C3-D	156.00	159.10		3.10			Final de la curva (337,90 cm)
C3-C	156.00	157.20		1.20			
C3-I	156.00	158.20		2.20			
E9-D	150.00	156.00	155.70	6.00	5.70	5.85	Escalón 9 (340,4 cm)
E9-C	150.00	157.00	156.30	7.00	6.30	6.65	
E9-I	150.00	156.20	155.80	6.20	5.80	6.00	
E10-D	145.00	138.90	138.60	-6.10	-6.40	-6.25	Escalón 10 (345,4 cm)
E10-C	144.90	141.30	140.00	-3.60	-4.90	-4.25	
E10-I	144.90	137.90	138.20	-7.00	-6.70	-6.85	
E11-D	135.00	135.50	134.00	0.50	-1.00	-0.25	Escalón 11 (350,4 cm)
E11-I	135.00	133.40	135.50	-1.60	0.50	-0.55	
E12-D	125.00	125.70	124.00	0.70	-1.00	-0.15	Escalón 12 (355,4 cm)
E12-I	125.00	130.60	128.40	5.60	3.40	4.50	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	0.00	0.00		0.00		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	0.00	0.00		0.00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 31: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 4.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	4.4	5.0	4.70	4.7	5.6	5.15	Inicio de la curva	Curva
Regla	4.2	5.5	4.85	4.6	5.5	5.05	Centro de la curva	
Regla	4.9	5.3	5.10	4.8	5.2	5.00	Final de la curva	
Regla	5.5	5.8	5.65	5.4	5.7	5.55	Escalón N° 9 ($h_{inclinada}$)	Rápida escalonada
Regla	5.3	6.8	6.05	5.5	6.8	6.15	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5.7	6.7	6.20	5.8	6.8	6.30	Escalón N° 12 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5.5	6.4	5.95	5.6	6.6	6.10	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5.7	6.2	5.95	5.7	6.3	6.00	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5.2	6.0	5.60	5.3	6.0	5.65	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5.3	6.4	5.85	5.5	6.6	6.05	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5.7	6.9	6.30	5.9	7.0	6.45	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)	
Regla	6.3	7.2	6.75	6.3	7.4	6.85	Escalón N° 85 ($h_{inclinada}$)	
Cinta 5	3.4	4.0	3.70	3.3	4.0	3.65	0 cm	
Cinta 6	2.6	3.3	2.95	2.4	3.2	2.80	64 cm	
Regla	2.4	3.4	2.90	2.3	3.2	2.75	128 cm	



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 - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P4

FECHA/ HORA: 2018-09-17 14:00

$$Q = 55.71 \text{ l/s}$$

Tabla No. 32: Registro de datos tomados con limnímetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 4.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P4

FECHA/ HORA: 2018-09-17 14:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 55.71			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.59				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		51.68	42.62				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		55.85	55.56				
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)	
23.25		28.45	28.21	5.20	4.96	70.0	
23.30		27.67	27.85	4.37	4.55	145.0	
23.37		28.97	28.61	5.60	5.24	220.0	
23.59		28.38	28.20	4.79	4.61	254.3	
23.02		28.45	28.51	5.43	5.49	274.5	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
C1-D	181.90	184.00		2.10			Inicio de la curva (283,69 cm)
C1-C	181.80	183.10	183.00	1.30	1.20	1.25	
C1-I	181.80	183.00	182.80	1.20	1.00	1.10	
C2-D	173.70	173.20	173.30	-0.50	-0.40	-0.45	Centro de la curva (310,80 cm)
C2-C	173.70	172.90	172.70	-0.80	-1.00	-0.90	
C2-I	173.70	172.30		-1.40			
C3-D	156.00	159.20	159.30	3.20	3.30	3.25	Final de la curva (337,90 cm)
C3-C	156.00	157.30	157.10	1.30	1.10	1.20	
C3-I	156.00	158.60	158.30	2.60	2.30	2.45	
E9-D	150.00	156.30	155.80	6.30	5.80	6.05	Escalón 9 (340,4 cm)
E9-C	150.00	157.40	156.00	7.40	6.00	6.70	
E9-I	150.00	156.20	155.70	6.20	5.70	5.95	
E10-D	145.00	142.30	140.80	-2.70	-4.20	-3.45	Escalón 10 (345,4 cm)
E10-C	144.90	142.80	142.00	-2.10	-2.90	-2.50	
E10-I	144.90	142.60	142.10	-2.30	-2.80	-2.55	
E11-D	135.00	137.10	135.40	2.10	0.40	1.25	Escalón 11 (350,4 cm)
E11-I	135.00	136.00	134.00	1.00	-1.00	0.00	
E12-D	125.00	128.30	126.00	3.30	1.00	2.15	Escalón 12 (355,4 cm)
E12-I	125.00	127.40	126.20	2.40	1.20	1.80	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.00	80.20		32.80		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73.50	73.50		0.00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 33: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 5.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	5.8	6.4	6.10	5.3	6.0	5.65	Inicio de la curva	Curva
Regla	6.8	7.5	7.15	5.8	6.8	6.30	Centro de la curva	
Regla	5.6	6.8	6.20	5.5	6.9	6.20	Final de la curva	
Regla	6.2	7.0	6.45	6.4	7.2	6.80	Escalón N° 9 (h _{inclinada})	Rápida escalonada
Regla	6.3	7.4	6.85	6.5	7.5	7.00	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	6.4	7.2	6.80	6.4	7.4	6.90	Escalón N° 12 (h _{inclinada})	
Regla	6.1	6.8	6.45	6.2	6.9	6.55	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Regla	5.9	7.0	6.45	6.0	7.0	6.50	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Regla	6.2	7.0	6.60	6.3	7.2	6.75	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Regla	6.7	7.6	7.15	6.9	7.8	7.35	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Regla	7.0	7.7	7.35	7.0	7.6	7.30	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	7.5	8.9	8.20	7.4	9.0	8.20	Escalón N° 89 (h _{inclinada})	
Cinta 5	4.5	5.1	4.80	4.7	5.2	4.95	0 cm	
Cinta 6	3.5	4.1	3.80	3.7	4.2	3.95	64 cm	
Regla	2.7	3.5	3.10	2.9	3.7	3.30	128 cm	



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 - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P5

Q = 78.05 l/s

FECHA/ HORA: 2018-09-12 11:00

Tabla No. 34: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M1, Prueba 5.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - OPTIMIZACIÓN 1 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P5

FECHA/ HORA: 2018-09-12 11:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 78.05			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.59				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		55.33	46.30				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		78.12	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)			
23.23	29.83	6.60		70.0			
23.36	28.15	4.79		145.0			
23.32	29.81	6.49		220.0			
23.51	29.88	6.37		254.3			
23.59	29.74	6.15		274.5			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
C1-D	181.80	183.00		1.20			Inicio de la curva (283,69 cm)
C1-C	181.70	182.90		1.20			
C1-I	181.70	182.80		1.10			
C2-D	173.60	172.80	172.50	-0.80	-1.10	-0.95	Centro de la curva (310,80 cm)
C2-C	173.60	171.80	171.40	-1.80	-2.20	-2.00	
C2-I	173.60	171.10		-2.50			
C3-D	156.00	159.00		3.00			Final de la curva (337,90 cm)
C3-C	156.00	157.50		1.50			
C3-I	156.00	158.90		2.90			
E9-D	150.00	155.70	155.00	5.70	5.00	5.35	Escalón 9 (340,4 cm)
E9-C	150.00	157.10	156.60	7.10	6.60	6.85	
E9-I	150.00	156.70	155.90	6.70	5.90	6.30	
E10-D	144.90	143.50		-1.40			Escalón 10 (345,4 cm)
E10-C	144.90	143,50	143,40	-1,40	-1,50	-1,45	
E10-I	144.90	143.60		-1.30			
E11-D	135.00	138,40	137,60	3,40	2,60	3,00	Escalón 11 (350,4 cm)
E11-I	135.00	138,90	138,20	3,90	3,20	3,55	
E12-D	125.00	126,00	125,70	1,00	0,70	0,85	Escalón 12 (355,4 cm)
E12-I	125.00	127,90	126,80	2,90	1,80	2,35	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	112.90	71.30		41.60		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	72.60	70.70		1.90		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

PRUEBAS DISEÑO MODIFICADO M2

Tabla No. 35: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, geometría modificada M2, P0.



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 - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

FECHA/ HORA: 2019-02-12 14:00

No. Prueba: P0 Q = 14.42 l/s

No.	Flujo a la izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Cinta	1.9	2.4	2.2	1.8	2.4	2.1	Escalón a (h _{vertical})	Rápida Escalonada
Cinta	1.4	1.9	1.7	1.2	1.6	1.4	Escalón N° 1 (h _{inclinada})	
Cinta	1.3	1.8	1.6	1.4	1.8	1.6	Escalón N° 3 (h _{inclinada})	
Cinta	1.7	2.2	2.0	1.8	2.3	2.1	Escalón N° 6 (h _{inclinada})	
Cinta	2.0	2.8	2.4	2.1	2.8	2.5	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Cinta	2.2	2.8	2.5	2.2	2.8	2.5	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta	2.0	3.0	2.5	2.0	3.2	2.6	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta	2.1	3.1	2.6	2.1	3.2	2.7	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta	2.2	3.1	2.7	2.0	3.2	2.6	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Cinta	2.4	3.4	2.9	2.4	3.4	2.9	Escalón N° 92 (h _{inclinada})	
Cinta	2.0	2.8	2.4	2.1	2.8	2.5	Punto de Inicio del Flujo Uniforme: Escalón #10	
Cinta	0.9	1.7	1.3	0.9	1.7	1.3	(1) 0 cm	
Cinta	2.0	2.7	2.4	1.9	2.4	2.2	(2) 64 cm	
Cinta	1.7	2.4	2.1	1.8	2.3	2.1	(3) 128 cm	
								Canal de salida al pie de la rápida escalonada

Tabla No. 36: Registro de datos tomados con limnímetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 0.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P0

FECHA/ HORA: 2019-02-12


14:00

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	14.42			
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)			
23,27	25,41	2,14		70,0			
23,09	25,42	2,33		145,0			
23,51	25,61	2,10		220,0			
23,52	25,51	1,99		254,3			
23,54	25,59	2,05		272,0			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
Eb-D	63,30	66,40		3,10		3,10	Escalón b (290,40 cm)
Eb-C	63,30	66,50		3,20		3,20	
Eb-I	63,30	66,50		3,20		3,20	
Ec-D	62,50	64,60		2,10		2,10	Escalón c (295,40 cm)
Ec-C	62,50	64,40		1,90		1,90	
Ec-I	62,50	64,50		2,00		2,00	
E1-C	61,10	64,00		2,90		2,90	Escalón 1 (Ø300,40 cm)
E2-C	59,20	60,40	60,90	1,20	1,70	1,45	Escalón 2 (Ø305,40 cm)
E3-D	56,70	58,90	59,00	2,20	2,30	2,25	Escalón 3 (310,40 cm)
E3-C	56,80	58,40	58,90	1,60	2,10	1,85	
E3-I	56,70	58,70	59,30	2,00	2,60	2,30	
E4-C	53,80	55,00	56,70	1,20	2,90	2,05	Escalón 4 (Ø15,40 cm)
E5-C	67,90	69,40	69,90	1,50	2,00	1,75	Escalón 5 (Ø20,40 cm)
E6-C	64,10	65,70	66,40	1,60	2,30	1,95	Escalón 6 (Ø25,40 cm)
E7-C	59,50	61,10	62,50	1,60	3,00	2,30	Escalón 7 (Ø30,40 cm)
E8-D	54,90	57,30	57,40	2,40	2,50	2,45	Escalón 8 (335,40 cm)
E8-C	54,80	57,10	58,40	2,30	3,60	2,95	
E8-I	54,80	58,90	59,60	4,10	4,80	4,45	
E9-D	49,90	50,90	51,30	1,00	1,40	1,20	Escalón 9 (340,40 cm)
E9-C	49,90	50,90	51,20	1,00	1,30	1,15	
E9-I	49,90	51,50	51,10	1,60	1,20	1,40	
E10-C	44,90	47,50	48,10	2,60	3,20	2,90	Escalón 10 (Ø45,40 cm)
E12-D	35,00	37,10		2,10		2,10	Escalón 12 (355,40 cm)
E12-I	35,00	37,30		2,30		2,30	
E14-D	24,90	26,90		2,00		2,00	
E14-I	24,90	27,30		2,40		2,40	Escalón 14 (365,40 cm)
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113,10	101,40		11,70		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73,70	73,70		0,00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 37: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 1.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA
MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)



CIERHI
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO) P1

No. Prueba: _____

FECHA/ HORA: 2019-02-11 15:00

Q = 23.68 l/s

No.	MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA						Ubicación	Zona
	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha				
	Altura de agua (cm)							
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)		Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)		Promedio			
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Promedio		
Cinta	2.7	3.3	3.0	3.4	2.8	3.1	Escalón a (h _{vertical})	
Cinta	2.8	3.3	3.1	2.6	2.0	2.3	Escalón N° 1 (h _{inclinada})	
Cinta	2.3	2.7	2.5	2.6	2.0	2.3	Escalón N° 3 (h _{inclinada})	
Cinta	2.2	2.8	2.5	2.7	2.1	2.4	Escalón N° 6 (h _{inclinada})	
Cinta	3.5	4.5	4.0	4.7	3.1	3.9	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Cinta	4.9	5.9	5.4	3.9	2.4	3.2	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta	2.0	3.8	2.9	4.7	3.5	4.1	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta	2.9	4.8	3.9	4.7	3.4	4.1	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta	3.0	4.9	4.0	5.0	3.2	4.1	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Cinta	3.6	4.5	4.1	4.5	3.6	4.1	Escalón N° 92 (h _{inclinada})	
Cinta	5.2	6.3	5.8	3.8	3.1	3.5	Punto de Inicio del Flujo Uniforme: Escalón #17	
Cinta	1.4	2.5	2.0	2.5	1.4	2.0	(1) 0 cm	
Cinta	2.8	3.8	3.3	3.8	2.9	3.4	(2) 64 cm	
Cinta	2.3	3.3	2.8	3.2	2.2	2.7	(3) 128 cm	
							Canal de salida al pie de la rápida escalonada	

Tabla No. 38: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 1.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P1

FECHA/ HORA: 2019-02-11 15:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)			
Lectura cero limnómetro: h ₀ (cm)=		37.60	28.58	23.68			
Lectura medida limnómetro: h _{lim} (cm)=		45.34	36.46				
Caudal instalación experimental: Q _m (l/s)=		23.37	23.99				
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)		
23,27	26,30	26,42	3,03	3,15	70,0		
23,35	25,78	25,79	2,43	2,44	145,0		
23,43	26,59	26,73	3,16	3,30	220,0		
23,54	26,38	26,47	2,84	2,93	254,3		
23,55	26,28	26,40	2,73	2,85	272,0		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
Eb-D	63,30	67,20		3,90		3,90	Escalón b (290.40 cm)
Eb-C	63,30	67,30		4,00		4,00	
Eb-I	63,30	67,25		3,95		3,95	
Ec-D	62,50	64,10	64,20	1,60	1,70	1,65	Escalón c (295.40 cm)
Ec-C	62,50	63,60	63,80	1,10	1,30	1,20	
Ec-I	62,50	64,00		1,50		1,50	
E1-C	61,10	62,00	62,10	0,90	1,00	0,95	Escalón 1 (280.40 cm)
E2-C	59,20	59,60	59,70	0,40	0,50	0,45	Escalón 2 (285.40 cm)
E3-D	56,70	58,90	59,10	2,20	2,40	2,30	Escalón 3 (310.40 cm)
E3-C	56,80	58,30	58,70	1,50	1,90	1,70	
E3-I	56,70	58,80	59,00	2,10	2,30	2,20	
E4-C	53,80	54,50	54,90	0,70	1,10	0,90	Escalón 4 (285.40 cm)
E5-C	67,90	69,40	69,60	1,50	1,70	1,60	Escalón 5 (280.40 cm)
E6-C	64,10	65,70	66,40	1,60	2,30	1,95	Escalón 6 (285.40 cm)
E7-C	59,50	60,50	61,30	1,00	1,80	1,40	Escalón 7 (280.40 cm)
E8-D	54,90	57,30	58,50	2,40	3,60	3,00	Escalón 8 (335.40 cm)
E8-C	54,80	58,00	58,80	3,20	4,00	3,60	
E8-I	54,80	58,80	60,70	4,00	5,90	4,95	
E9-D	49,90	50,50	51,50	0,60	1,60	1,10	Escalón 9 (340.40 cm)
E9-C	49,90	50,80	52,50	0,90	2,60	1,75	
E9-I	49,90	50,10	51,80	0,20	1,90	1,05	
E10-C	44,90	47,90	50,20	3,00	5,30	4,15	Escalón 10 (2845.40 cm)
E12-D	35,00	37,00	37,20	2,00	2,20	2,10	Escalón 12 (355.40 cm)
E12-I	35,00	36,70	36,90	1,70	1,90	1,80	
E14-D	24,90	26,60	26,70	1,70	1,80	1,75	
E14-I	24,90	26,70	27,40	1,80	2,50	2,15	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113,10	92,50		20,60		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73,70	73,70		0,00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 39: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 2.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Cinta	3.5	3.9	3.7	3.8	4.3	4.1	Escalón a (h _{vertical})	Rápida Escalonada
Cinta	3.2	3.8	3.5	3.5	3.9	3.7	Escalón N° 1 (h _{inclinada})	
Cinta	3.7	4.3	4.0	3.8	4.2	4.0	Escalón N° 3 (h _{inclinada})	
Cinta	3.7	4.4	4.1	3.9	4.4	4.2	Escalón N° 6 (h _{inclinada})	
Cinta	4.0	5.1	4.6	3.9	4.9	4.4	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Cinta	3.9	5.0	4.5	3.8	5.3	4.6	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta	3.8	5.4	4.6	3.9	5.3	4.6	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta	4.0	5.1	4.6	3.9	5.4	4.7	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta	4.4	5.4	4.9	3.9	5.4	4.7	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Cinta	4.8	5.5	5.2	4.6	5.3	5.0	Escalón N° 92 (h _{inclinada})	
Cinta	4.0	4.9	4.5	4.0	4.8	4.4	Punto de Inicio del Flujo Uniforme: Escalón #22	
Cinta	2.5	3.0	2.8	2.0	3.1	2.6	(1) 0 cm	
Cinta	3.6	4.4	4.0	3.7	4.7	4.2	(2) 64 cm	
Cinta	3.9	4.6	4.3	4.0	4.7	4.4	(3) 128 cm	
								Canal de salida al pie de la rápida escalonada



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)



No. Prueba: P2

Q = 34.48 l/s

FECHA/ HORA: 2019-02-08 12:00

Tabla No. 40: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 2.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P2

FECHA/ HORA: 2019-02-08


12:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:


$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)			
Lectura cero limnómetro: h ₀ (cm)=		37.60	28.58	34.48			
Lectura medida limnómetro: h _{lim} (cm)=		47.71	38.69				
Caudal instalación experimental: Q _m (l/s)=		34.48	34.48				
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)		
23.23	27.35		4.12		70.0		
23.30	26.45		3.15		145.0		
23.44	27.31		3.87		220.0		
23.54	27.32		3.78		254.3		
23.56	27.01		3.45		272.0		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
Eb-D	63.30	68.00		4.70		4.70	Escalón b (290.40 cm)
Eb-C	63.30	68.10		4.80		4.80	
Eb-I	63.30	67.90		4.60		4.60	
Ec-D	62.50	64.10		1.60		1.60	Escalón c (295.40 cm)
Ec-C	62.50	62.90	63.50	0.40	1.00	0.70	
Ec-I	62.50	63.10	63.40	0.60	0.90	0.75	
E1-C	61.10	61.30		0.20		0.20	Escalón 1 (280.40 cm)
E2-C	59.20	59.00		-0.20		-0.20	Escalón 2 (285.40 cm)
E3-D	56.70	58.80	59.40	2.10	2.70	2.40	Escalón 3 (310.40 cm)
E3-C	56.80	58.40	58.60	1.60	1.80	1.70	
E3-I	56.70	58.50		1.80		1.80	
E4-C	53.80	54.00	54.40	0.20	0.60	0.40	Escalón 4 (285.40 cm)
E5-C	67.90	69.00	69.20	1.10	1.30	1.20	Escalón 5 (282.40 cm)
E6-C	64.10	65.30	65.70	1.20	1.60	1.40	Escalón 6 (282.40 cm)
E7-C	59.50	60.40	62.90	0.90	3.40	2.15	Escalón 7 (283.40 cm)
E8-D	54.90	58.30	59.10	3.40	4.20	3.80	Escalón 8 (335.40 cm)
E8-C	54.80	57.50	59.10	2.70	4.30	3.50	
E8-I	54.80	61.40	62.20	6.60	7.40	7.00	
E9-D	49.90	49.30	52.40	-0.60	2.50	0.95	Escalón 9 (340.40 cm)
E9-C	49.90	50.50	52.30	0.60	2.40	1.50	
E9-I	49.90	50.00	51.80	0.10	1.90	1.00	
E10-C	44.90	50.40	51.40	5.50	6.50	6.00	Escalón 10 (284.40 cm)
E12-D	35.00	37.50	39.90	2.50	4.90	3.70	Escalón 12 (355.40 cm)
E12-I	35.00	36.60	37.50	1.60	2.50	2.05	
E14-D	24.90	27.10	27.80	2.20	2.90	2.55	Escalón 14 (365.40 cm)
E14-I	24.90	26.80	27.00	1.90	2.10	2.00	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.10	87.50		25.60		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73.70	73.70		0.00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 41: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 3.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



CIERHI
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO) P3

No. Prueba: Q = 44.58 l/s

FECHA/ HORA: 2019-02-07 10:00

No.	MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA						Ubicación	Zona
	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha				
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)		Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)		Promedio			
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Cinta	3.9	4.6	4.3	4.0	5.0	4.5	Escalón a (h _{vertical})	
Cinta	4.2	5.0	4.6	4.2	5.0	4.6	Escalón N° 1 (h _{inclinada})	
Cinta	4.5	5.2	4.9	4.0	4.8	4.4	Escalón N° 3 (h _{inclinada})	
Cinta	4.0	5.3	4.7	4.3	5.4	4.9	Escalón N° 6 (h _{inclinada})	
Cinta	5.2	6.0	5.6	4.9	5.8	5.4	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Cinta	4.4	5.5	5.0	4.3	5.6	5.0	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta	3.8	5.5	4.7	4.6	5.8	5.2	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta	4.9	5.8	5.4	4.8	6.0	5.4	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta	4.9	6.0	5.5	4.8	5.9	5.4	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Cinta	5.0	5.8	5.4	5.1	6.0	5.6	Escalón N° 92 (h _{inclinada})	
Cinta	4.5	6.0	5.3	4.6	6.0	5.3	Punto de Inicio del Flujo Uniforme: Escalón #24	
Cinta	2.5	3.5	3.0	2.5	3.7	3.1	(1) 0 cm	
Cinta	4.4	5.6	5.0	4.6	5.5	5.1	(2) 64 cm	
Cinta	4.2	5.2	4.7	4.0	5.0	4.5	(3) 128 cm	
								Canal de salida al pie de la rápida escalonada

Tabla No. 42: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 3.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P3

FECHA/ HORA: 2019-02-07

10:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58	44.58			
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		49.59	40.71				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		44.20	44.95				
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)		
23.04	27.84	27.92	4.80	4.88	70.0		
23.32	26.95	27.02	3.63	3.70	145.0		
23.40	27.90	28.00	4.50	4.60	220.0		
23.52	27.90	27.96	4.38	4.44	254.3		
23.53	27.68	27.70	4.15	4.17	272.0		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
Eb-D	63.30	68.60		5.30		5.30	Escalón b (290.40 cm)
Eb-C	63.30	68.80		5.50		5.50	
Eb-I	63.30	68.40		5.10		5.10	
Ec-D	62.50	63.80	64.00	1.30	1.50	1.40	Escalón c (295.40 cm)
Ec-C	62.50	62.40	62.70	-0.10	0.20	0.05	
Ec-I	62.50	62.70	62.80	0.20	0.30	0.25	
E1-C	61.10	60.60	60.80	-0.50	-0.30	-0.40	Escalón 1 (280.40 cm)
E2-C	59.20	58.20	58.50	-1.00	-0.70	-0.85	Escalón 2 (285.40 cm)
E3-D	56.70	58.60	58.90	1.90	2.20	2.05	Escalón 3 (310.40 cm)
E3-C	56.80	58.10	58.30	1.30	1.50	1.40	
E3-I	56.70	58.80		2.10		2.10	
E4-C	53.80	53.90	54.40	0.10	0.60	0.35	Escalón 4 (281.40 cm)
E5-C	67.90	68.50	69.00	0.60	1.10	0.85	Escalón 5 (282.40 cm)
E6-C	64.10	64.50	65.20	0.40	1.10	0.75	Escalón 6 (282.40 cm)
E7-C	59.50	60.50	62.80	1.00	3.30	2.15	Escalón 7 (283.40 cm)
E8-D	54.90	58.50	60.50	3.60	5.60	4.60	Escalón 8 (335.40 cm)
E8-C	54.80	57.00	58.50	2.20	3.70	2.95	
E8-I	54.80	58.60	61.10	3.80	6.30	5.05	
E9-D	49.90	48.90	50.80	-1.00	0.90	-0.05	Escalón 9 (340.40 cm)
E9-C	49.90	51.10	53.70	1.20	3.80	2.50	
E9-I	49.90	51.10	53.10	1.20	3.20	2.20	
E10-C	44.90	48.50	51.50	3.60	6.60	5.10	Escalón 10 (284.40 cm)
E12-D	35.00	38.70	41.20	3.70	6.20	4.95	Escalón 12 (355.40 cm)
E12-I	35.00	37.50	42.40	2.50	7.40	4.95	
E14-D	24.90	28.20	29.40	3.30	4.50	3.90	Escalón 14 (365.40 cm)
E14-I	24.90	26.60	30.50	1.70	5.60	3.65	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.10	90.50		22.60		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73.70	73.70		0.00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 43: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 4.

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		
Cinta	5.3	5.9	5.6	4.9	5.8	5.4	Escalón a ($h_{vertical}$)	
Cinta	4.5	5.1	4.8	5.3	6.3	5.8	Escalón N° 1 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	4.5	5.4	5.0	5.4	6.4	5.9	Escalón N° 3 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.1	6.5	5.8	5.8	6.5	6.2	Escalón N° 6 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.1	6.4	5.8	5.9	6.8	6.4	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.5	6.9	6.2	5.6	7.1	6.4	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.4	7.1	6.3	5.8	7.1	6.5	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.0	6.8	5.9	6.1	7.3	6.7	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.9	7.3	6.6	6.0	7.1	6.6	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.9	7.3	6.6	6.4	7.4	6.9	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	5.5	6.9	6.2	5.4	6.8	6.1	Punto de Inicio del Flujo Uniforme: Escalón #31	
Cinta	3.1	4.1	3.6	3.2	4.5	3.9	(1) 0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta	5.4	6.5	6.0	5.7	6.5	6.1	(2) 64 cm	
Cinta	5.2	6.1	5.7	5.3	6.2	5.8	(3) 128 cm	



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 - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P4

FECHA/ HORA: 2019-02-06 11:30

Q = 55.97 l/s

Tabla No. 44: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 4.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P4

FECHA/ HORA: 2019-02-06

11:30

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58	55.97			
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		51.67	42.71				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		55.79	56.14				
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)			
23.11	28.45	5.34		70.0			
23.30	27.62	4.32		145.0			
23.42	28.73	5.31		220.0			
23.53	28.67	5.14		254.3			
23.53	28.49	4.96		272.0			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
Eb-D	63.30	69.00		5.70		5.70	Escalón b (290.40 cm)
Eb-C	63.30	69.30		6.00		6.00	
Eb-I	63.30	68.90		5.60		5.60	
Ec-D	62.50	62.90	63.10	0.40	0.60	0.50	Escalón c (295.40 cm)
Ec-C	62.50	61.50	62.90	-1.00	0.40	-0.30	
Ec-I	62.50	62.30	62.10	-0.20	-0.40	-0.30	
E1-C	61.10	59.90	59.70	-1.20	-1.40	-1.30	Escalón 1 (Ø00.40 cm)
E2-C	59.20	57.40	57.70	-1.80	-1.50	-1.65	Escalón 2 (Ø05.40 cm)
E3-D	56.70	58.60	58.90	1.90	2.20	2.05	Escalón 3 (310.40 cm)
E3-C	56.80	57.50	57.90	0.70	1.10	0.90	
E3-I	56.70	58.30	58.60	1.60	1.90	1.75	
E4-C	53.80	53.10	53.90	-0.70	0.10	-0.30	Escalón 4 (Ø15.40 cm)
E5-C	67.90	68.00	68.60	0.10	0.70	0.40	Escalón 5 (Ø20.40 cm)
E6-C	64.10	64.20	64.90	0.10	0.80	0.45	Escalón 6 (Ø25.40 cm)
E7-C	59.50	60.60	62.10	1.10	2.60	1.85	Escalón 7 (Ø30.40 cm)
E8-D	54.90	58.30	59.20	3.40	4.30	3.85	Escalón 8 (335.40 cm)
E8-C	54.80	56.80	58.30	2.00	3.50	2.75	
E8-I	54.80	57.30	58.30	2.50	3.50	3.00	
E9-D	49.90	49.50	52.00	-0.40	2.10	0.85	Escalón 9 (340.40 cm)
E9-C	49.90	51.30	52.60	1.40	2.70	2.05	
E9-I	49.90	51.40	52.50	1.50	2.60	2.05	
E10-C	44.90	48.80	51.30	3.90	6.40	5.15	Escalón 10 (Ø45.40 cm)
E12-D	35.00	38.70	41.00	3.70	6.00	4.85	Escalón 12 (355.40 cm)
E12-I	35.00	39.30	41.60	4.30	6.60	5.45	
E14-D	24.90	28.40	30.50	3.50	5.60	4.55	Escalón 14 (365.40 cm)
E14-I	24.90	27.30	30.60	2.40	5.70	4.05	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113.10	79.50		33.60		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73.70	73.70		0.00		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

Tabla No. 45: Registro de datos tomados con cinta y regla para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 5.

No.	Flujo a la Izquierda Altura de agua (cm)			Flujo a la Derecha Altura de agua (cm)			Ubicación	Zona
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Cinta	6.0	7.0	6.5	5.2	6.4	5.8	Escalón a ($h_{vertical}$)	Rápida Escalonada
Cinta	6.0	8.1	7.1	5.5	6.6	6.1	Escalón N° 1 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	7.4	8.5	8.0	6.5	8.0	7.3	Escalón N° 3 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	7.9	10.9	9.4	7.8	10.6	9.2	Escalón N° 6 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	7.8	10.7	9.3	8.0	10.8	9.4	Escalón N° 9 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	7.8	10.5	9.2	8.5	11.5	10.0	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	7.1	10.3	8.7	6.8	10.4	8.6	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	6.8	10.1	8.5	7.5	10.0	8.8	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	6.7	10.0	8.4	7.8	10.1	9.0	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	7.8	10.2	9.0	8.6	10.4	9.5	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	6.7	8.2	7.5	6.8	8.5	7.7	Escalón N° 92 ($h_{inclinada}$)	
Cinta	7.0	10.2	8.6	7.1	10.3	8.7	Punto de Inicio del Flujo Uniforme: Escalón #33	
Cinta	4.0	5.5	4.8	4.2	5.9	5.1	(1) 0 cm	
Cinta	6.2	8.5	7.4	6.5	9.0	7.8	(2) 64 cm	
Cinta	5.9	8.1	7.0	6.2	8.5	7.4	(3) 128 cm	
								Canal de salida al pie de la rápida escalonada



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 - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: PS

FECHA/HORA: 2019-02-04 10:00

Q = 77.89 l/s

Tabla No. 46: Registro de datos tomados con limnómetros y piezómetros para la rápida escalonada, flujo de aproximación supercrítico, geometría modificada M2, Prueba 5.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA - MODIFICACIÓN M2 (FLUJO SUPERCRÍTICO)

No. Prueba: P5

FECHA/ HORA: 2019-02-04

10:00

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnómetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37.60	28.58	77.89			
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		55.33	46.24				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		78.12	77.67				
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)			
23,05	29,60	6,55		70,0			
23,33	28,60	5,27		145,0			
23,42	29,75	6,33		220,0			
23,55	30,05	6,50		254,3			
23,55	29,69	6,14		272,0			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Promedio	Ubicación
Eb-D	63,30	69,90		6,60		6,60	Escalón b (290,40 cm)
Eb-C	63,30	70,10	70,20	6,80	6,90	6,85	
Eb-I	63,30	69,60	69,80	6,30	6,50	6,40	
Ec-D	62,50	60,60	61,30	-1,90	-1,20	-1,55	Escalón c (295,40 cm)
Ec-C	62,50	59,80	60,60	-2,70	-1,90	-2,30	
Ec-I	62,50	60,40	60,60	-2,10	-1,90	-2,00	
E1-C	61,10	57,30	57,60	-3,80	-3,50	-3,65	Escalón 1 (Ø300,40 cm)
E2-C	59,20	55,10	55,50	-4,10	-3,70	-3,90	Escalón 2 (Ø305,40 cm)
E3-D	56,70	57,70		1,00		1,00	Escalón 3 (310,40 cm)
E3-C	56,80	56,30	56,60	-0,50	-0,20	-0,35	
E3-I	56,70	56,90	57,50	0,20	0,80	0,50	
E4-C	53,80	51,90	52,20	-1,90	-1,60	-1,75	Escalón 4 (Ø15,40 cm)
E5-C	67,90	67,30		-0,60		-0,60	Escalón 5 (Ø20,40 cm)
E6-C	64,10	63,60	64,10	-0,50	0,00	-0,25	Escalón 6 (Ø25,40 cm)
E7-C	59,50	59,80	60,40	0,30	0,90	0,60	Escalón 7 (Ø30,40 cm)
E8-D	54,90	56,80	57,10	1,90	2,20	2,05	Escalón 8 (335,40 cm)
E8-C	54,80	57,00	57,80	2,20	3,00	2,60	
E8-I	54,80	57,90	59,00	3,10	4,20	3,65	
E9-D	49,90	50,80	51,00	0,90	1,10	1,00	Escalón 9 (340,40 cm)
E9-C	49,90	49,70	50,00	-0,20	0,10	-0,05	
E9-I	49,90	50,70	51,10	0,80	1,20	1,00	
E10-C	44,90	49,40	51,30	4,50	6,40	5,45	Escalón 10 (Ø45,40 cm)
E12-D	35,00	37,20	38,10	2,20	3,10	2,65	Escalón 12 (355,40 cm)
E12-I	35,00	37,30	40,00	2,30	5,00	3,65	
E14-D	24,90	27,80	28,50	2,90	3,60	3,25	Escalón 14 (365,40 cm)
E14-I	24,90	27,40	29,80	2,50	4,90	3,70	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN INTERNO (ZONA DE COMPUERTA)							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Ubicación	
I1-C	113,10	71,10		42,00		Fondo Canal, aguas arriba de la compuerta	
I2-C	73,70	69,50		4,20		Tapa Canal, aguas abajo de la compuerta	

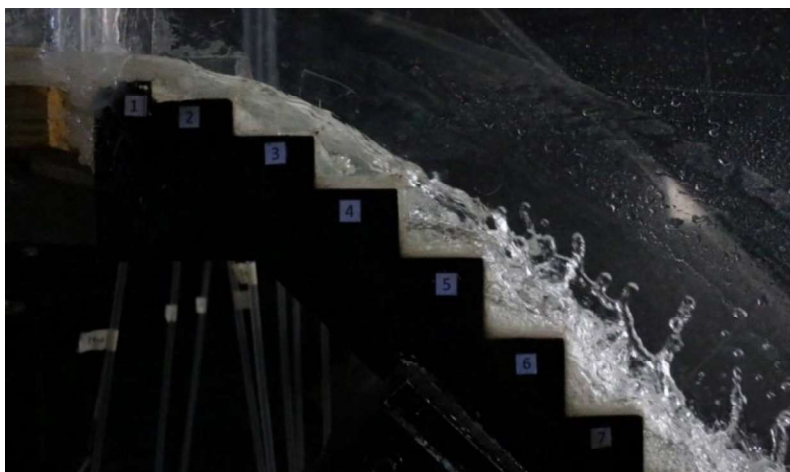
ANEXO 6

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO: PRUEBAS
EN DISEÑO ORIGINAL, DISEÑO MODIFICADO M1 Y DISEÑO
MODIFICADO M2**

PRUEBAS EN DISEÑO ORIGINAL

PRUEBA P0: $Q = 14,48 \text{ l/s}$

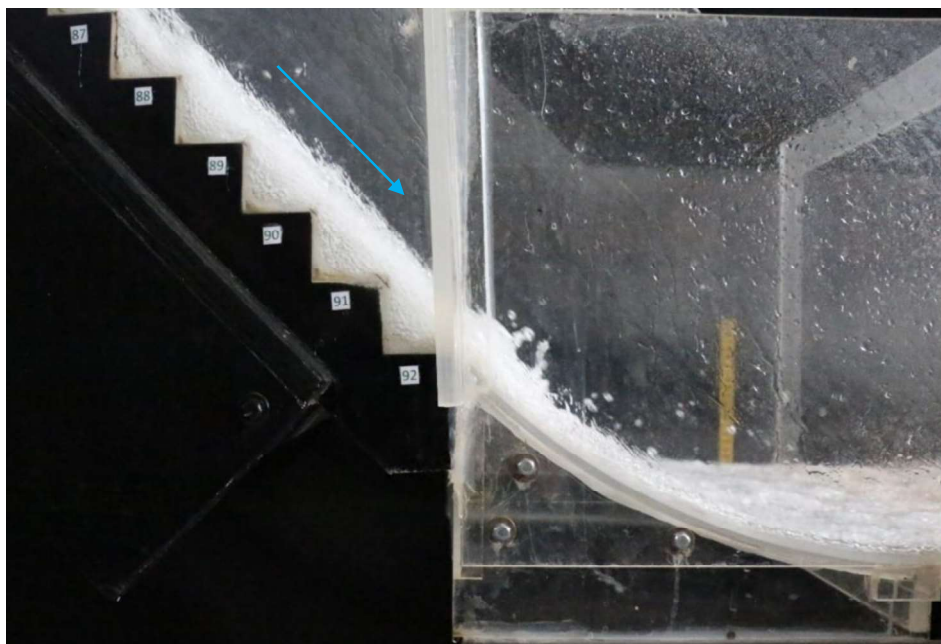
Fotografía No. 34: Prueba 0. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones e identificación del punto inicial de aireación.



Fotografía No. 35: Prueba 0. Geometría con diseño Original, Vista superior al flujo a la entrada a la rápida escalonada.



Fotografía No. 36: Prueba 0. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha, flujo al pie de la rápida e inicio del canal de salida.



PRUEBA P1: $Q = 23,13 \text{ l/s}$

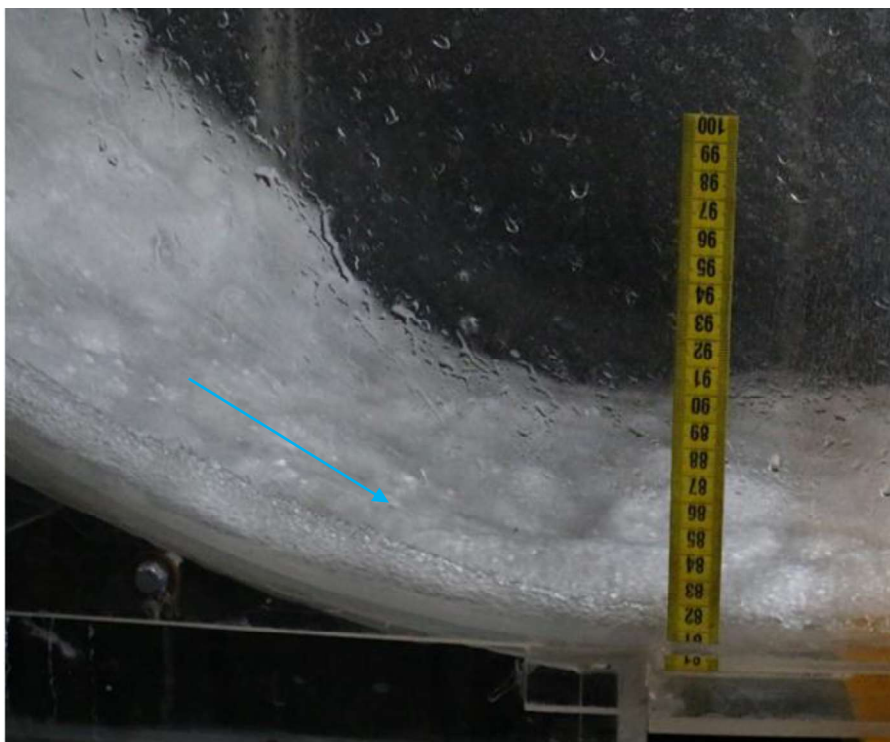
Fotografía No. 37: Prueba 1. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones e identificación del punto inicial de aireación.



Fotografía No. 38: Prueba 1. Geometría con diseño Original, Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 39: Prueba 1. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.



PRUEBA P2: $Q = 34.09$ l/s

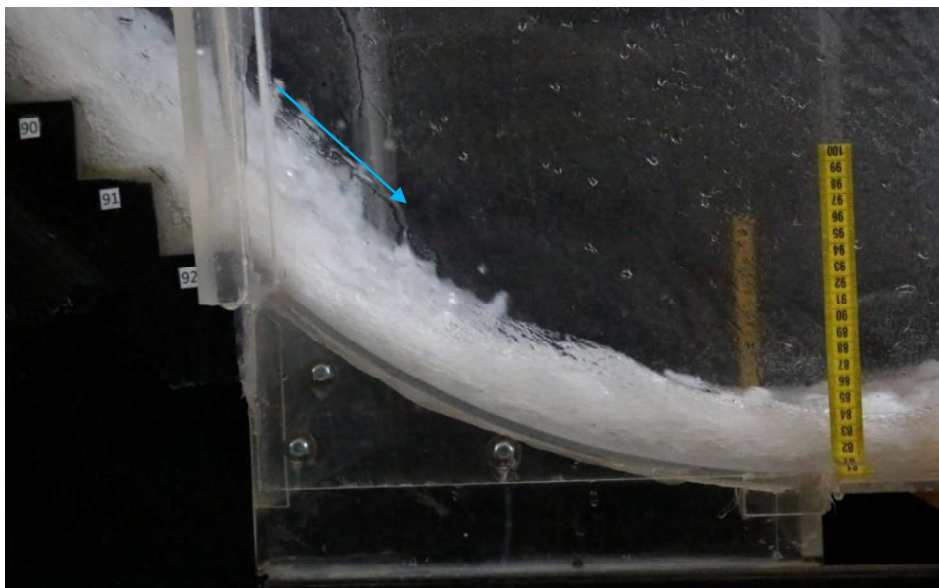
Fotografía No. 40: Prueba 2. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones e identificación del punto inicial de aireación.



Fotografía No. 41: Prueba 2. Geometría con diseño Original, Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

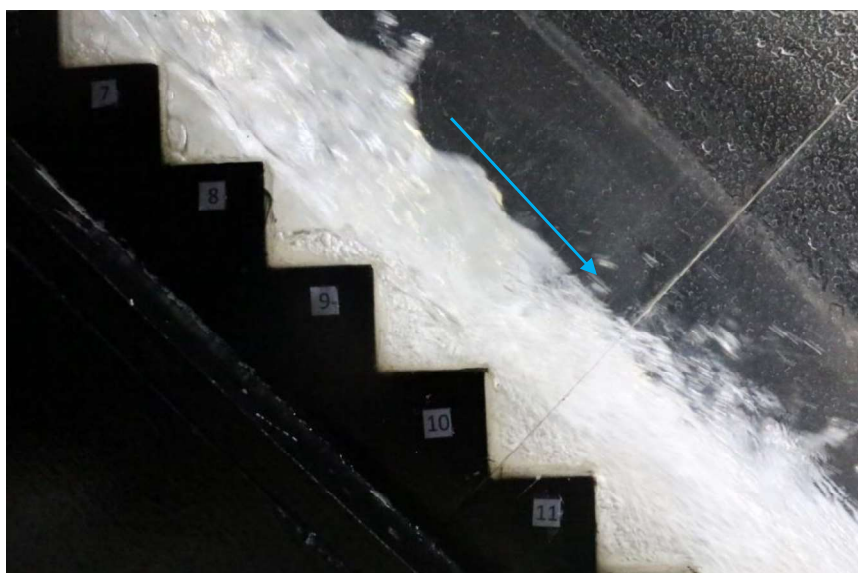


Fotografía No. 42: Prueba 2. Geometría con diseño Original, Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.

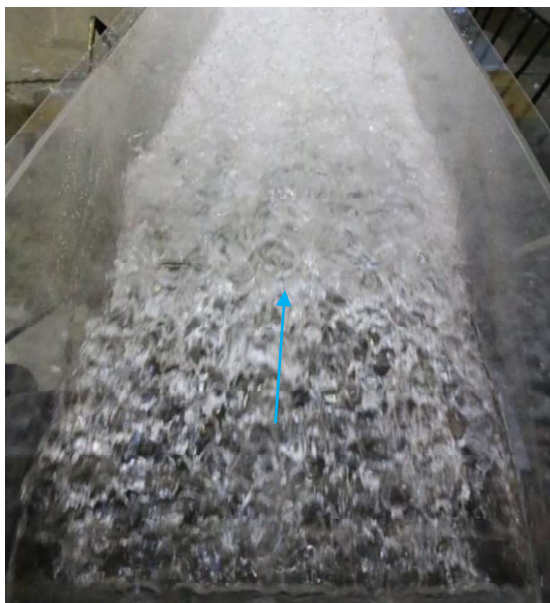


PRUEBA P3: $Q = 44,50$ l/s

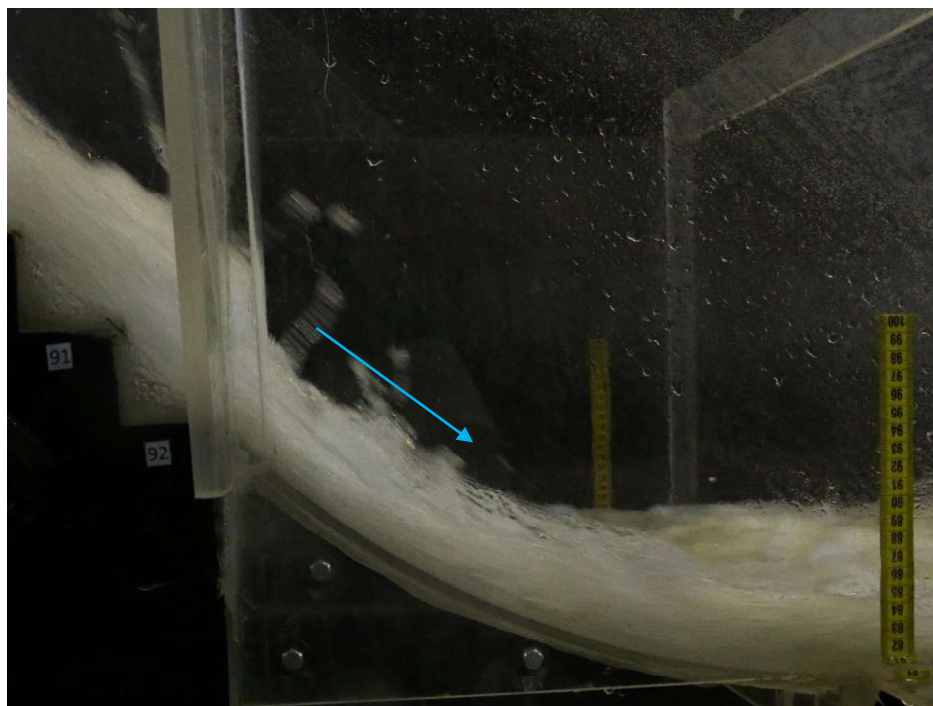
Fotografía No. 43: Prueba 3. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones de la rápida escalonada.



Fotografía No. 44: Prueba 3. Geometría con diseño Original, Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

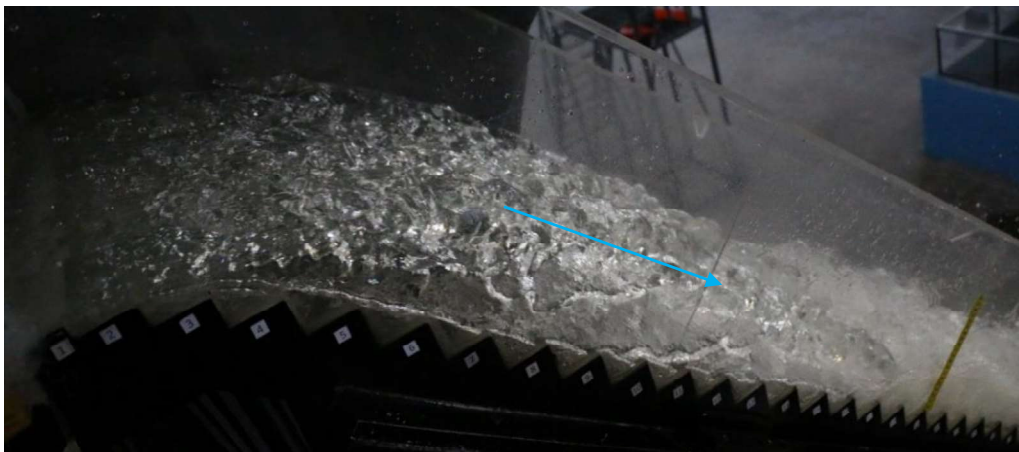


Fotografía No. 45: Prueba 3. Geometría con diseño Original, Vista lateral izquierda del flujo al inicio del canal de salida.



PRUEBA P4: $Q = 55,88$ l/s

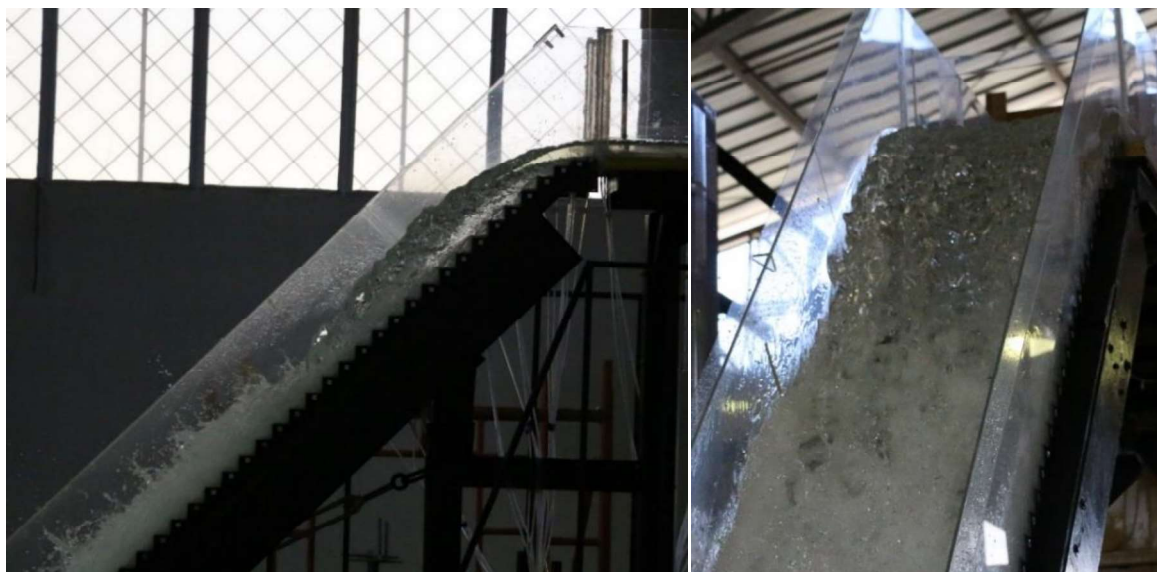
Fotografía No. 46: Prueba 4. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones e identificación del punto inicial de aireación.



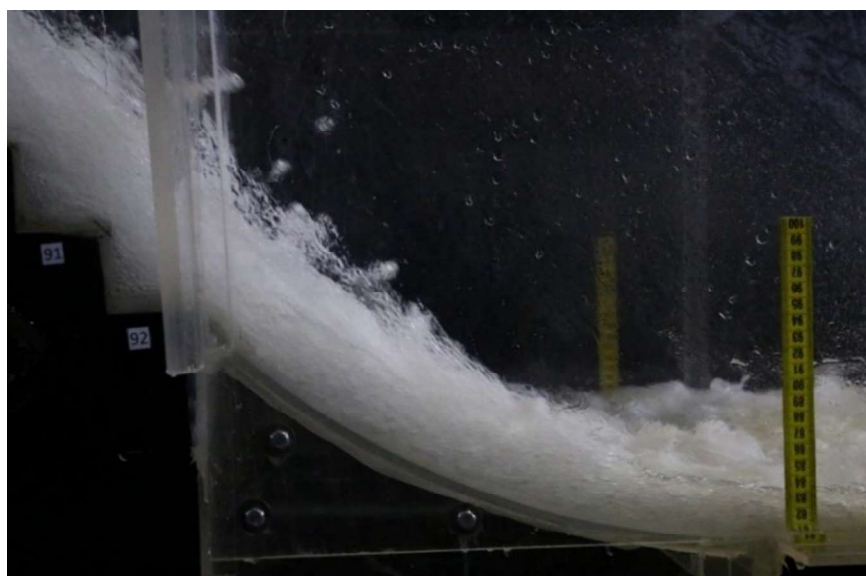
Fotografía No. 47: Prueba 4. Geometría con diseño Original, Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 48: Prueba 4. Geometría con diseño Original, (A) Vista superior izquierda del flujo en la instalación experimental, (B) Vista frontal del flujo.



Fotografía No. 49: Prueba 4. Geometría con diseño Original, Vista lateral izquierda del flujo al inicio del canal de salida.



PRUEBA P5: $Q = 78.08$ l/s

Fotografía No. 50: Prueba 5. Geometría con diseño Original, Vista lateral derecha del flujo en los primeros escalones de la rápida escalonada.



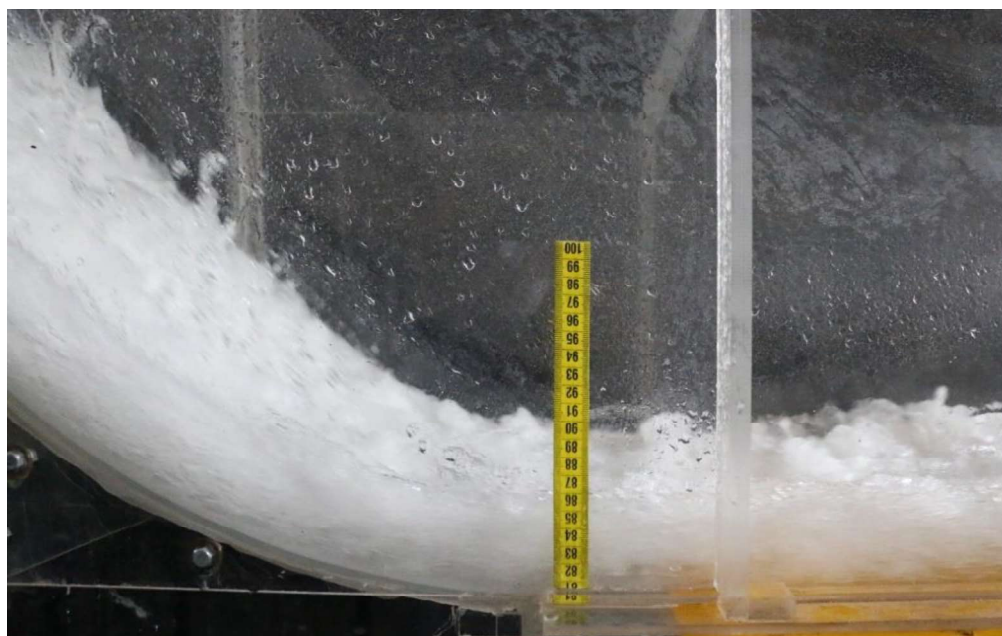
Fotografía No. 51: Prueba 5. Geometría con diseño Original, Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire.



Fotografía No. 52: Prueba 5. Geometría con diseño Original, (A) Vista frontal del flujo y (B) Vista lateral izquierda del flujo en la rápida escalonada.



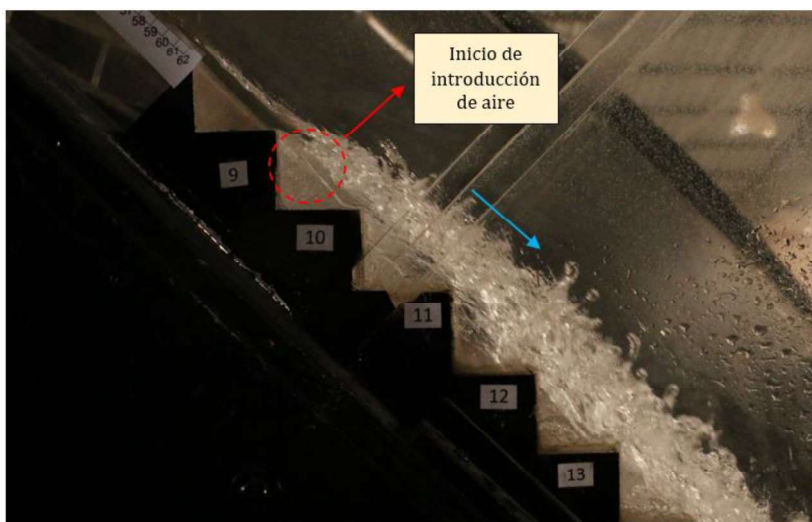
Fotografía No. 53: Prueba 5, Geometría con diseño Original, Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.



PRUEBAS EN DISEÑO MODIFICADO M1

PRUEBA P0: $Q = 14,35 \text{ l/s}$

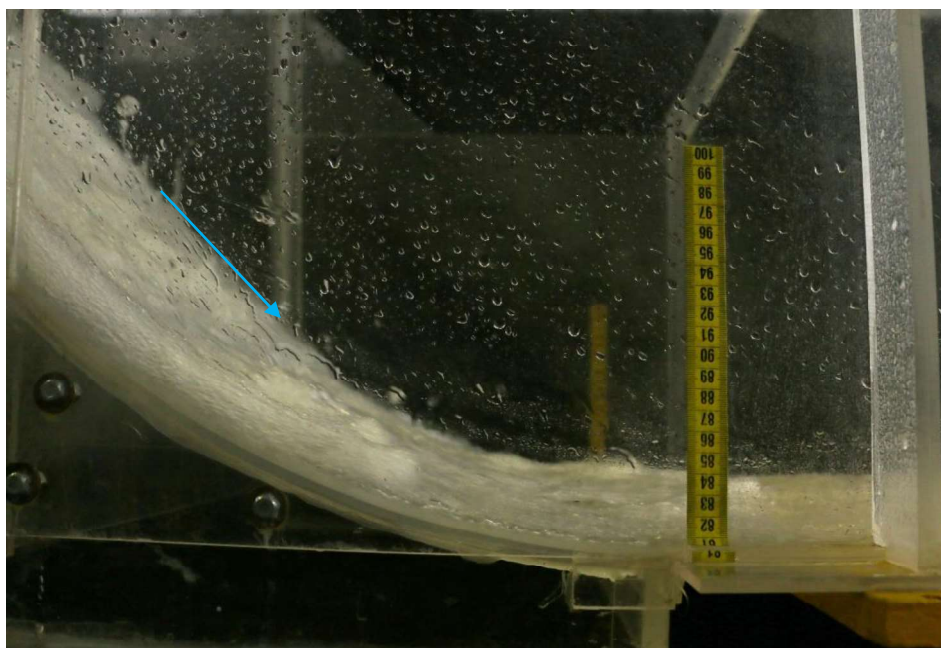
Fotografía No. 54: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 55: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

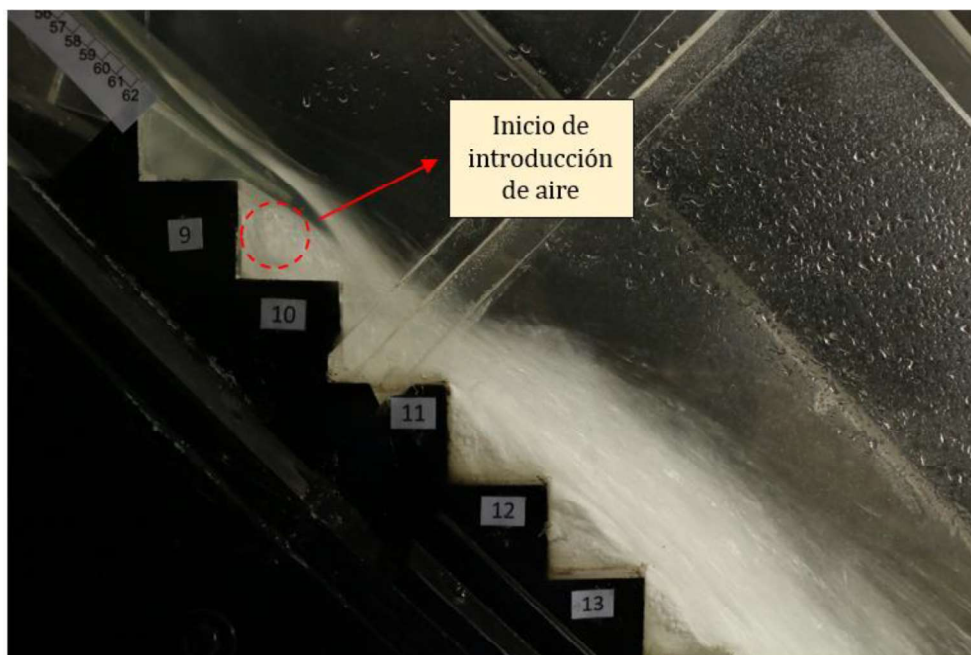


Fotografía No. 56: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.



PRUEBA P1: $Q = 23,35$ l/s

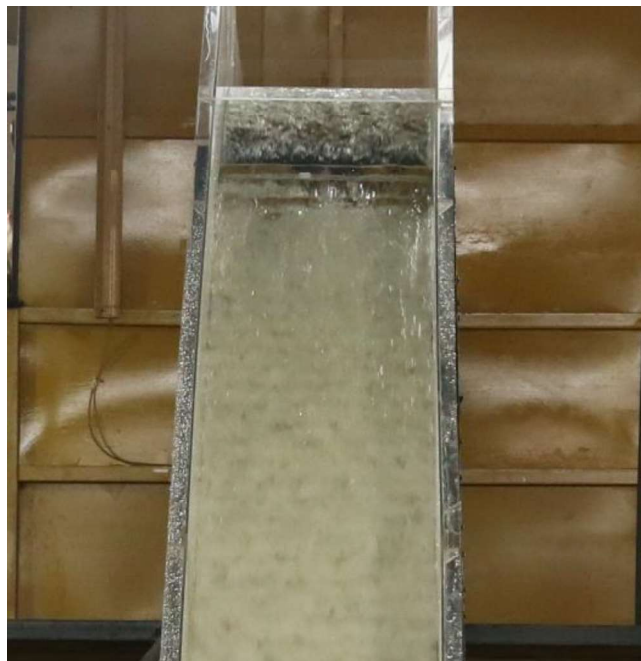
Fotografía No. 57: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



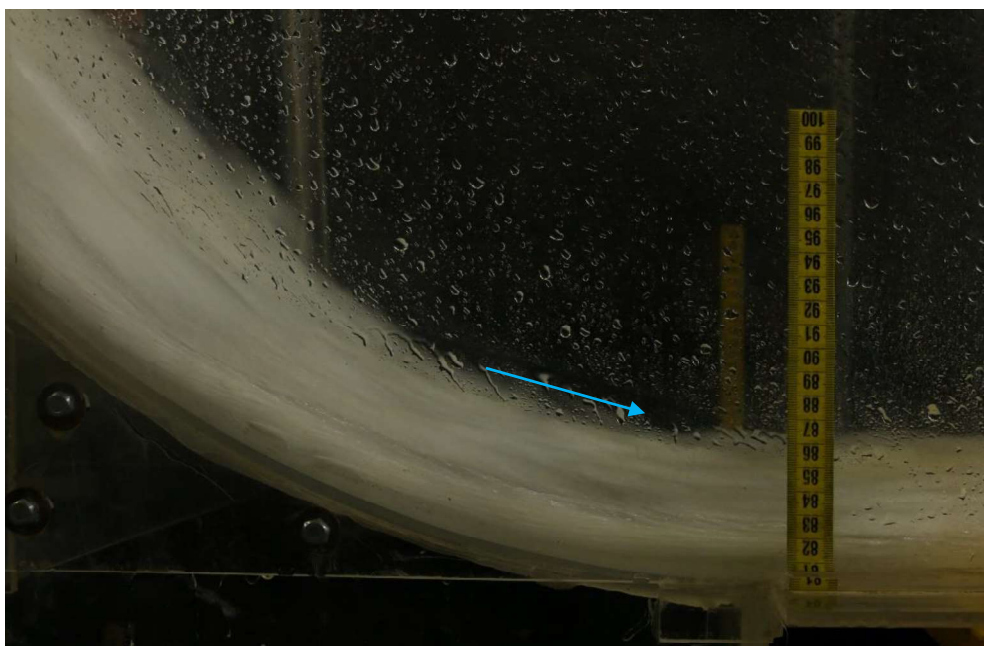
Fotografía No. 58: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en la rápida escalonada.



Fotografía No. 59: Prueba 1. Vista frontal del flujo al inicio de la rápida escalonada.

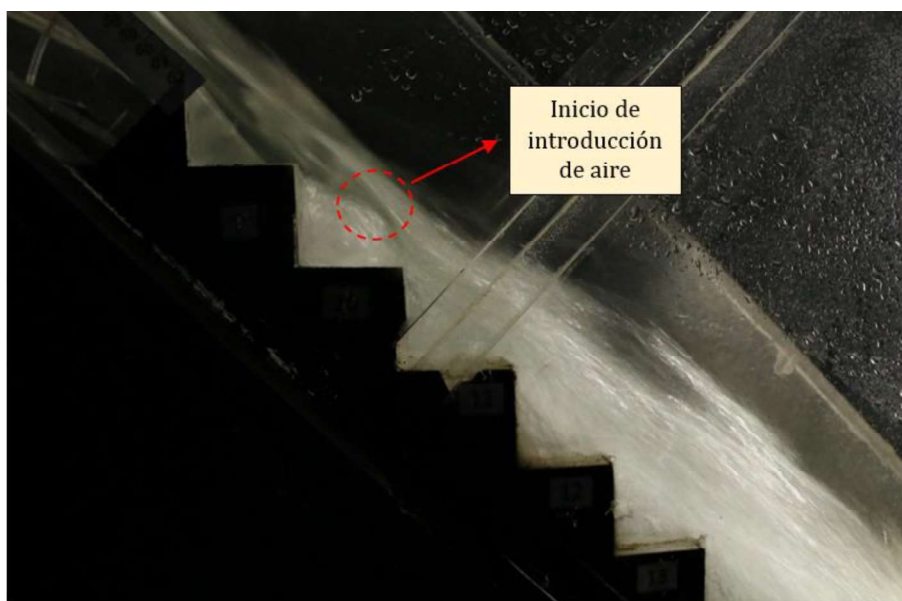


Fotografía No. 60: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo al inicio del canal de salida.



PRUEBA P2: $Q = 33,67$ l/s

Fotografía No. 61: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.



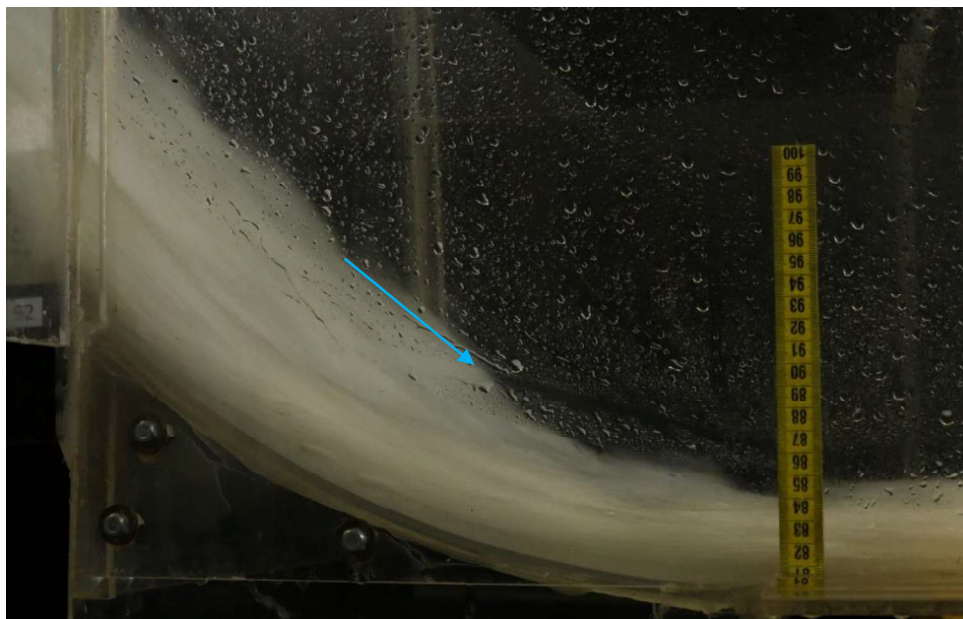
Fotografía No. 62: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 63: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 64: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.

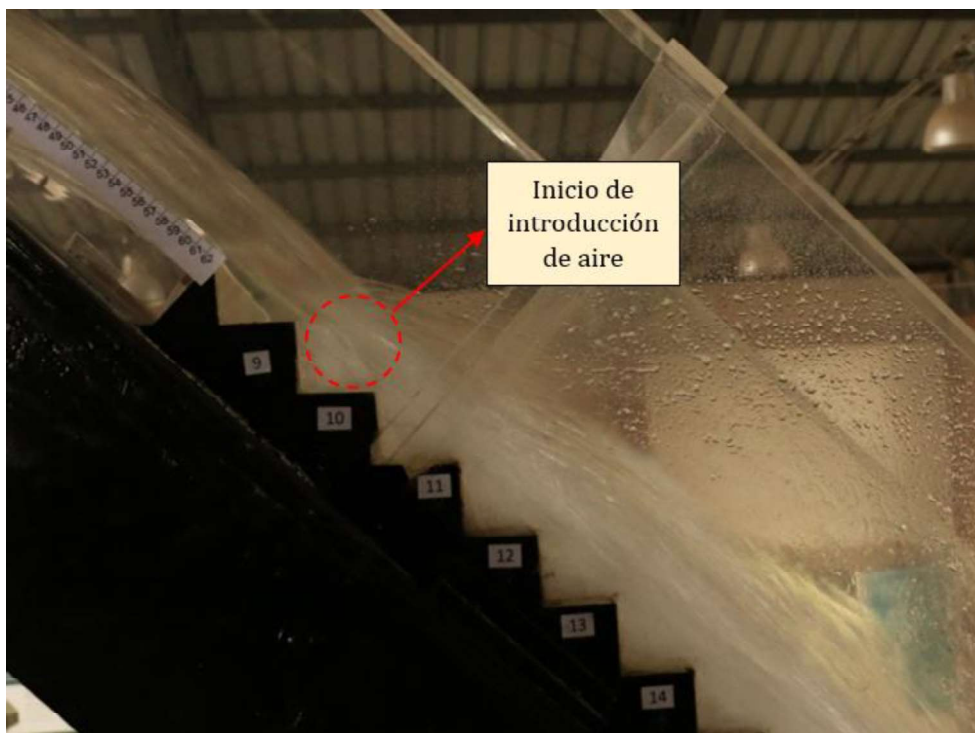


PRUEBA P3: $Q = 44,15 \text{ l/s}$

Fotografía No. 65: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.



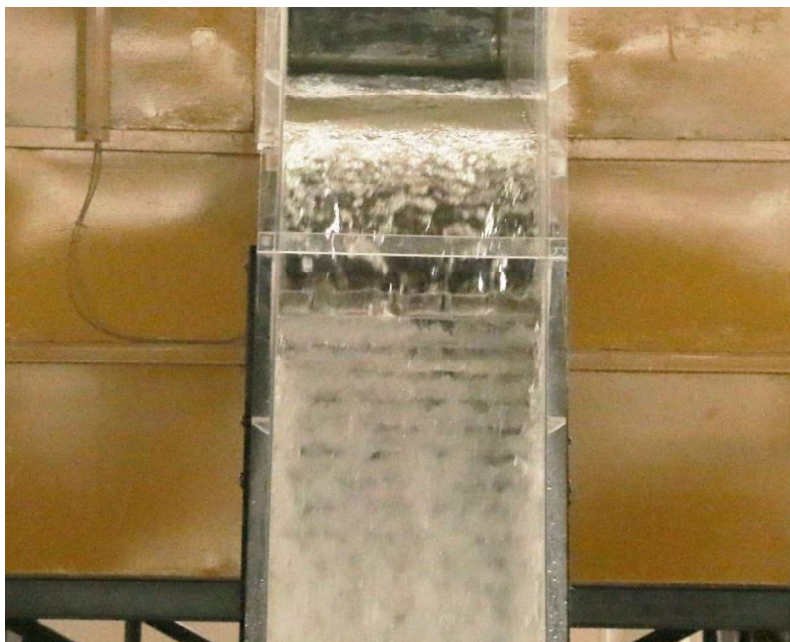
Fotografía No. 66: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



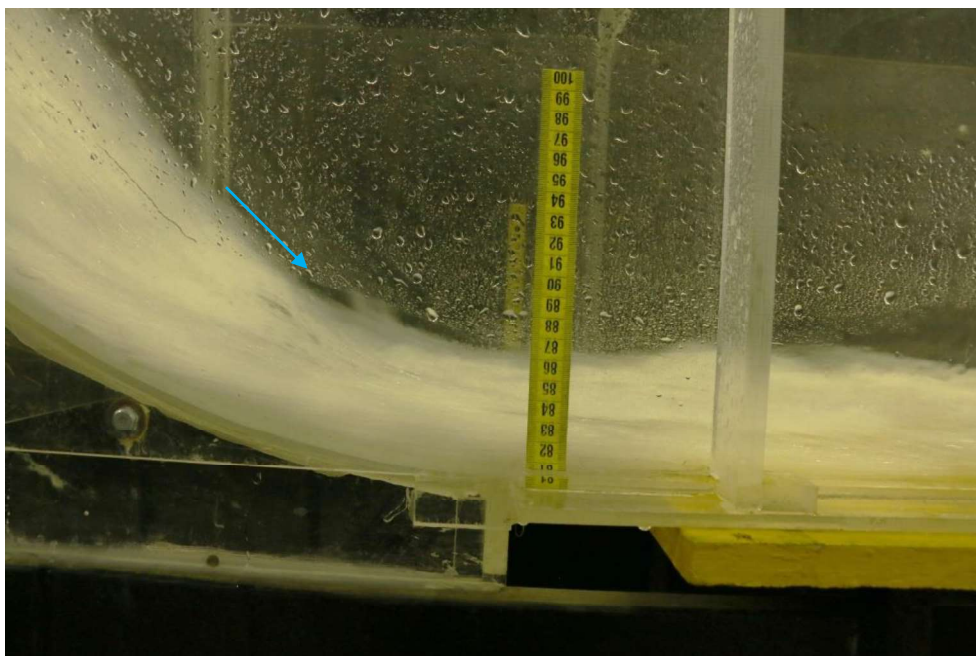
Fotografía No. 67: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M1. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 68: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

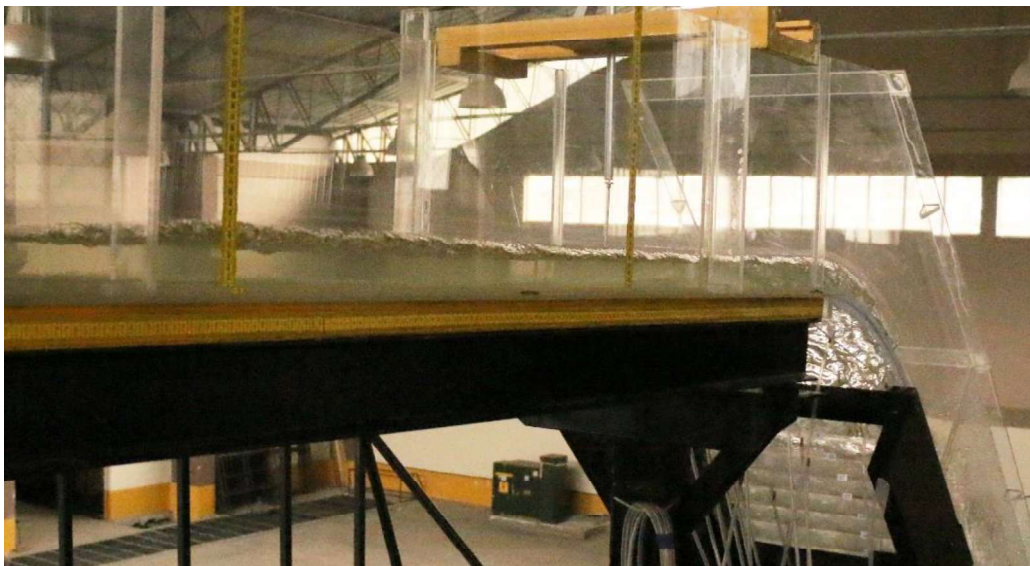


Fotografía No. 69: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.



PRUEBA P4: $Q = 55,71$ l/s

Fotografía No. 70: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral derecha del flujo en el tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.



Fotografía No. 71: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 72: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 73: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.



PRUEBA P5: $Q = 78,05$ l/s

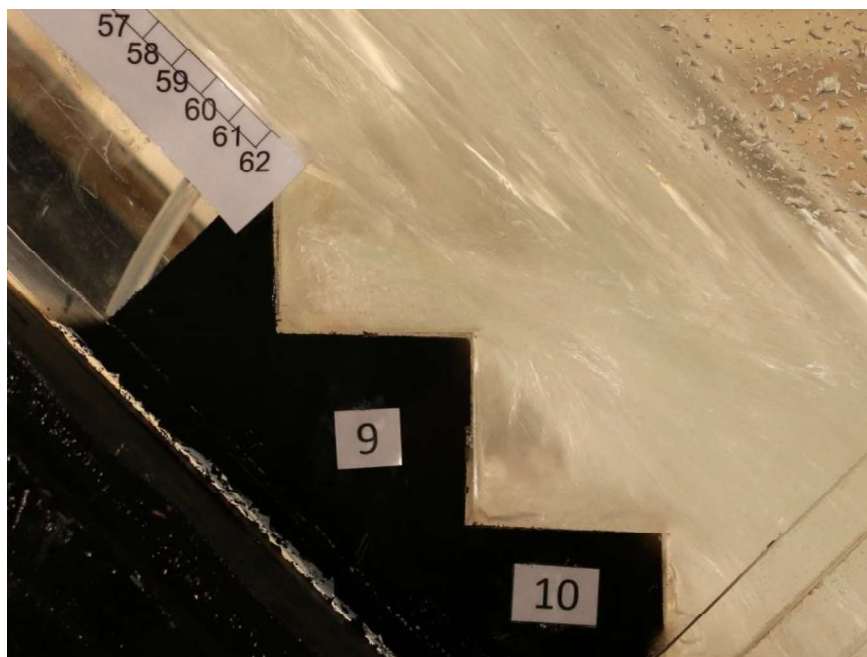
Fotografía No. 74: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.



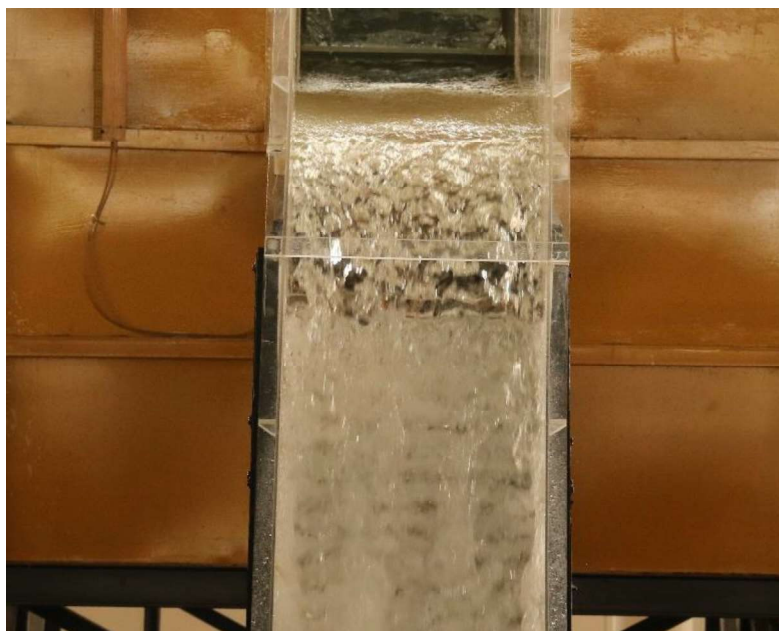
Fotografía No. 75: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



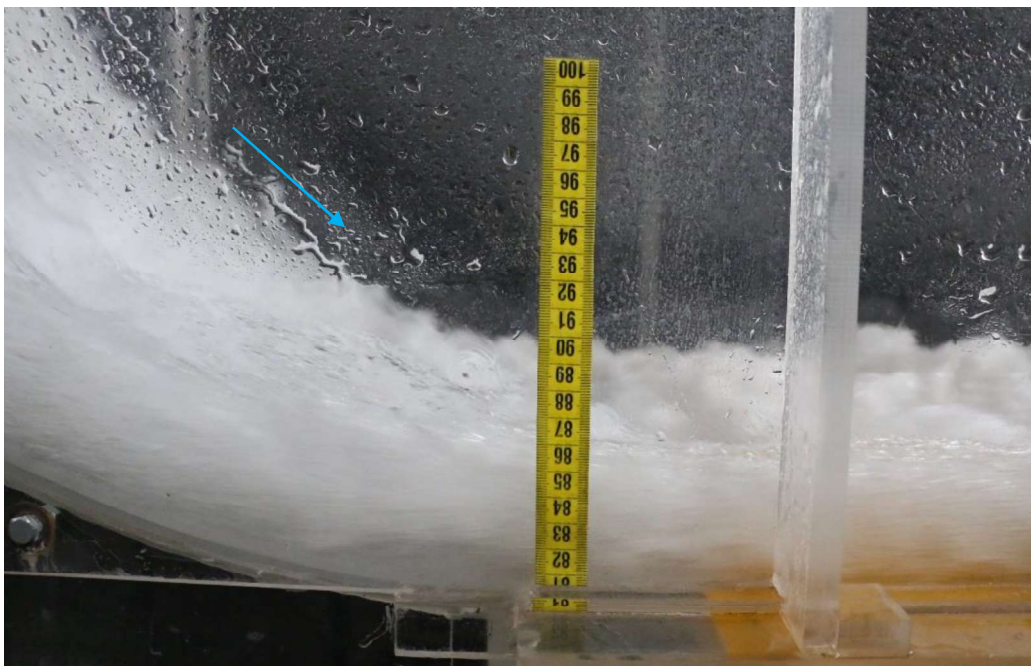
Fotografía No. 76: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 77: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista frontal del flujo en la rápida escalonada.



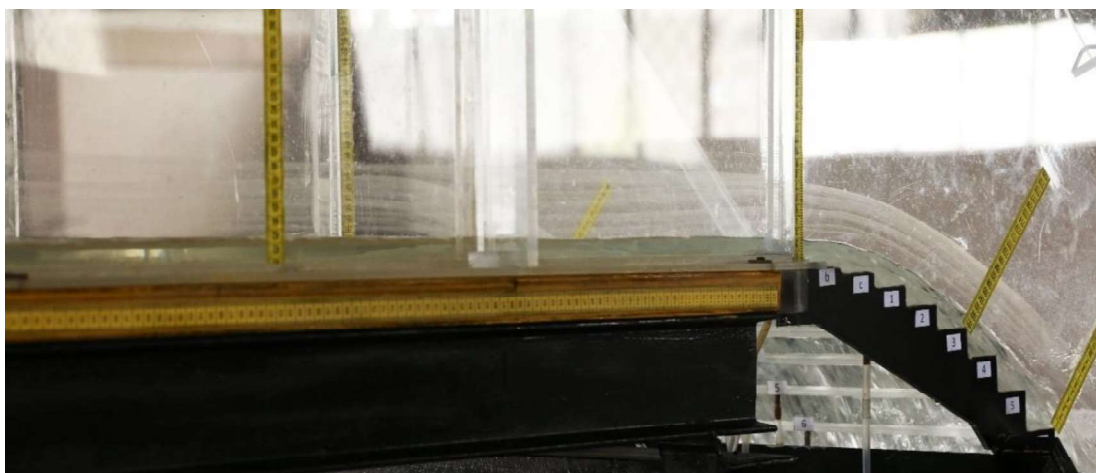
Fotografía No. 78: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M1. Vista lateral izquierda del flujo en el inicio del canal de salida.



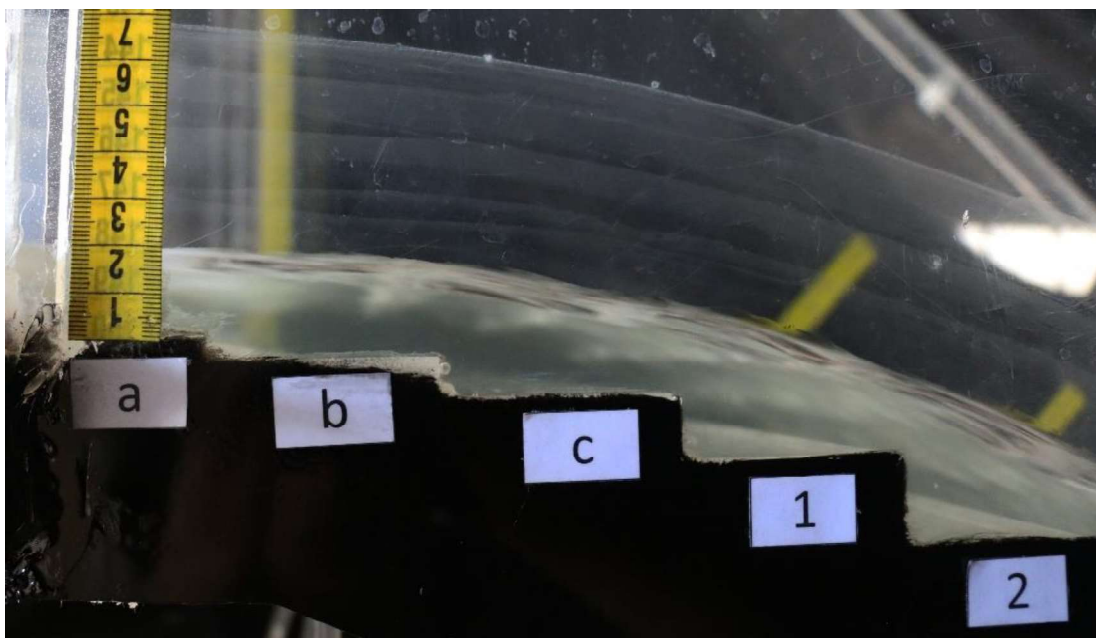
PRUEBAS EN DISEÑO MODIFICADO M2

PRUEBA P0: $Q = 14,42$ l/s

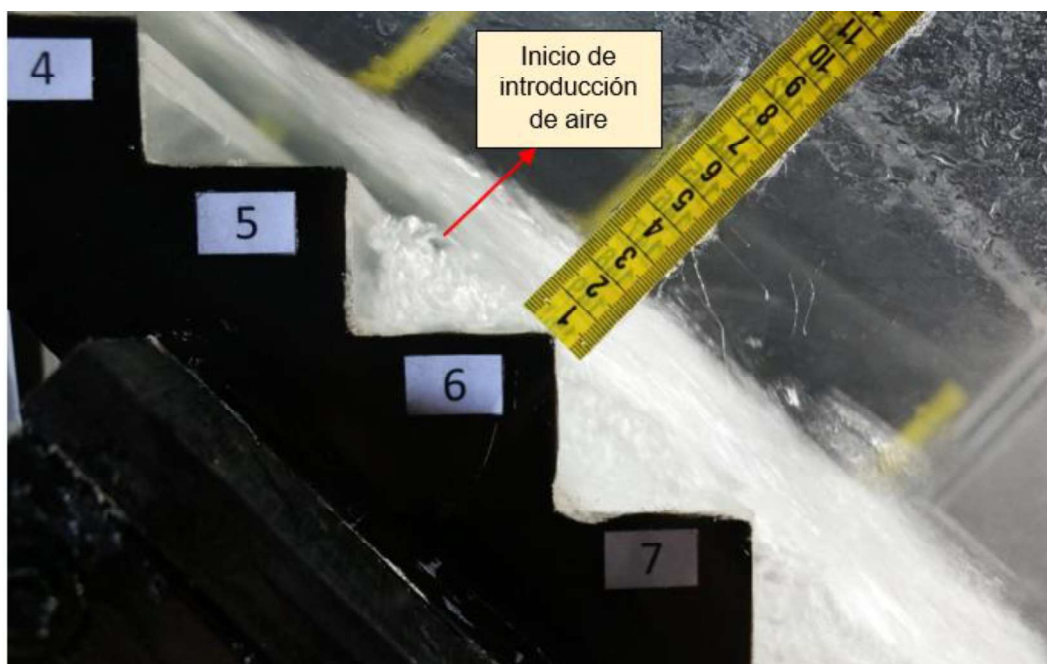
Fotografía No. 79: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



Fotografía No. 80: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 81: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



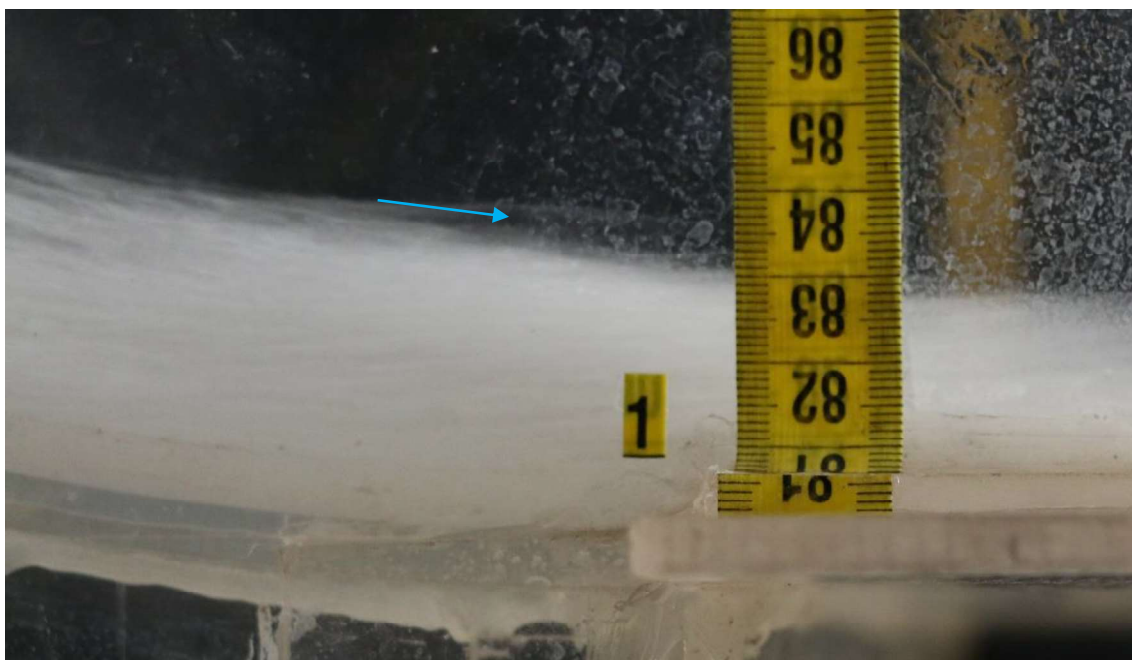
Fotografía No. 82: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 83: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

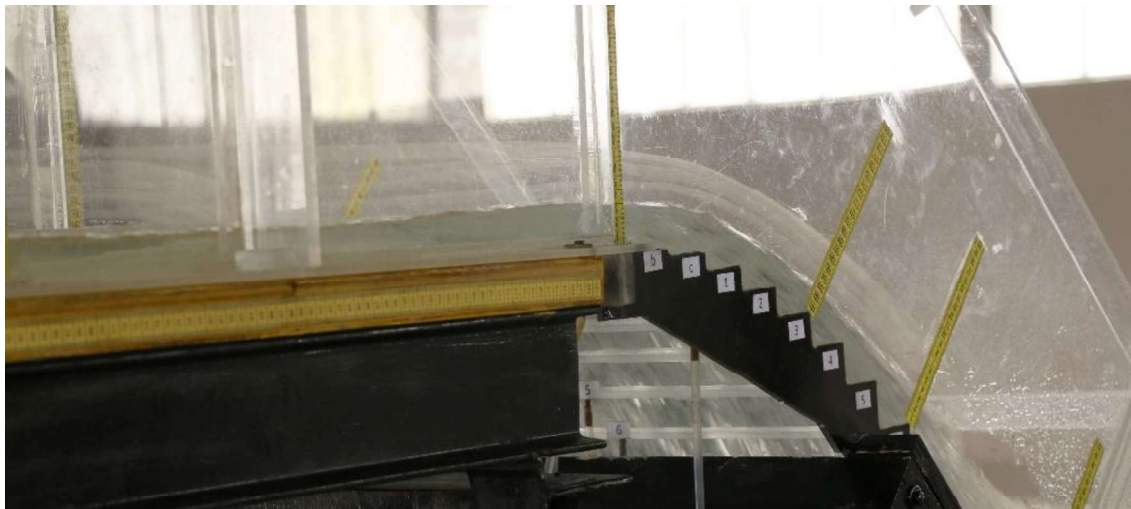


Fotografía No. 84: Prueba 0, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.

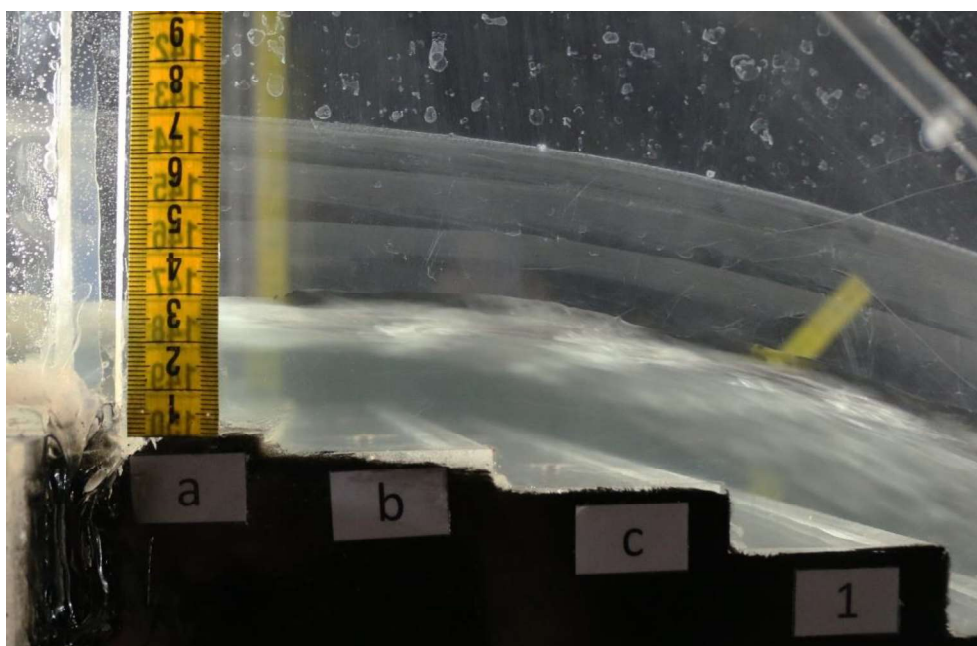


PRUEBA P1: $Q = 23,68$ l/s

Fotografía No. 85: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



Fotografía No. 86: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



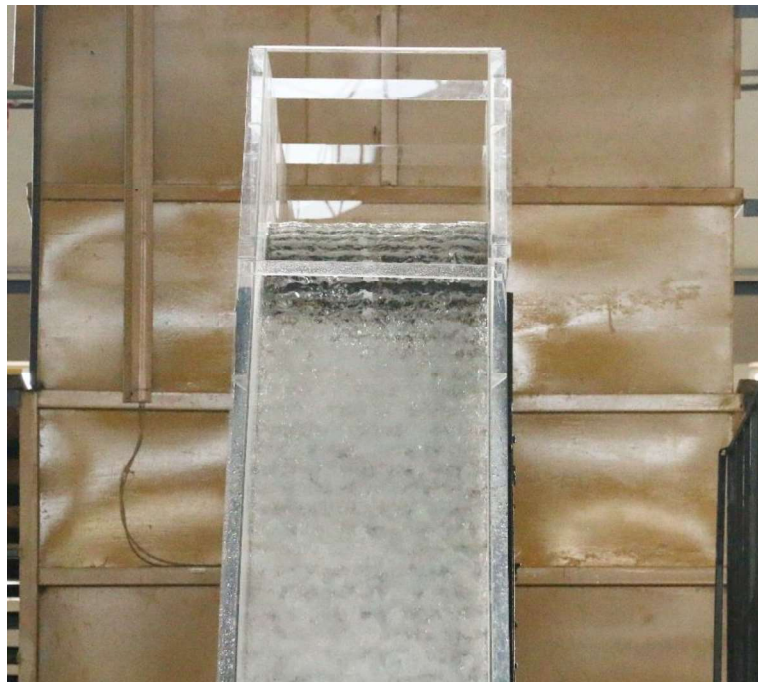
Fotografía No. 87: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



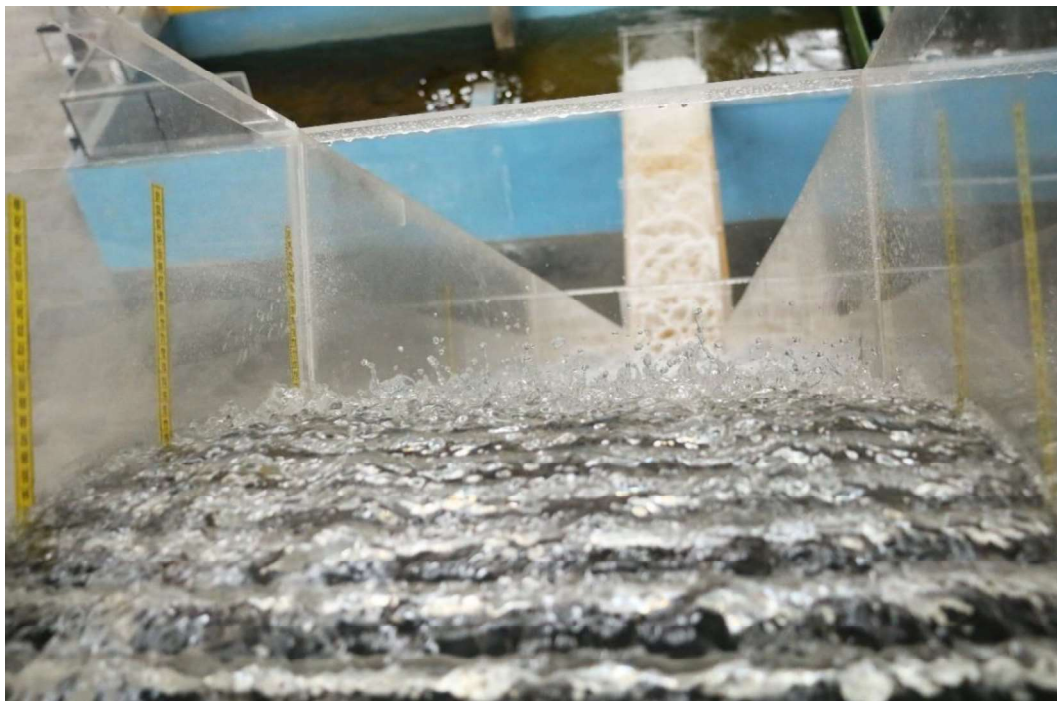
Fotografía No. 88: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en la rápida escalonada.



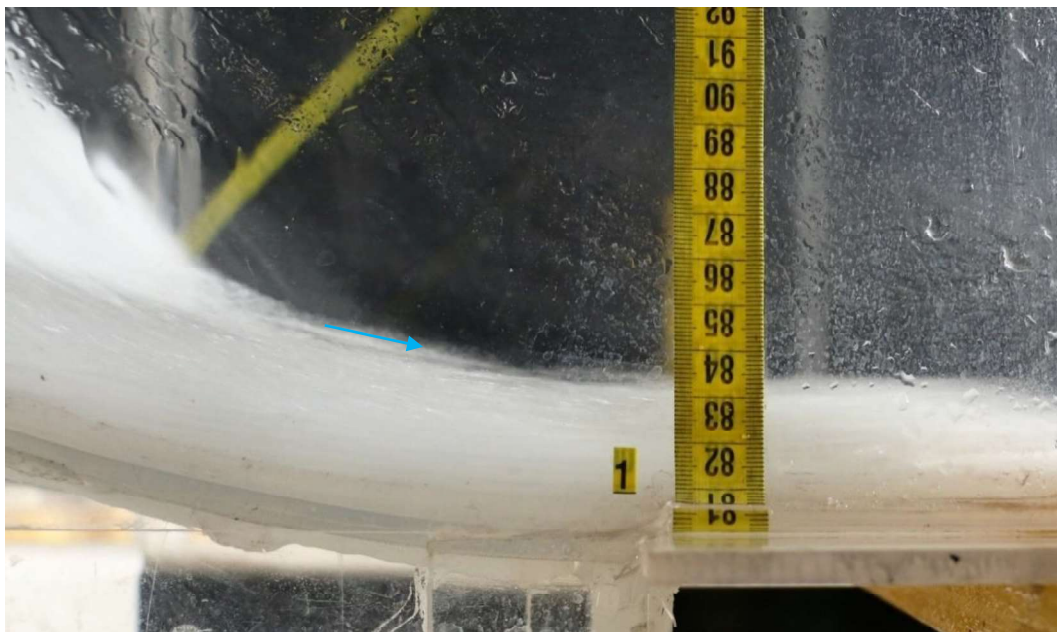
Fotografía No. 89: Prueba 1. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 90: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 91: Prueba 1, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.

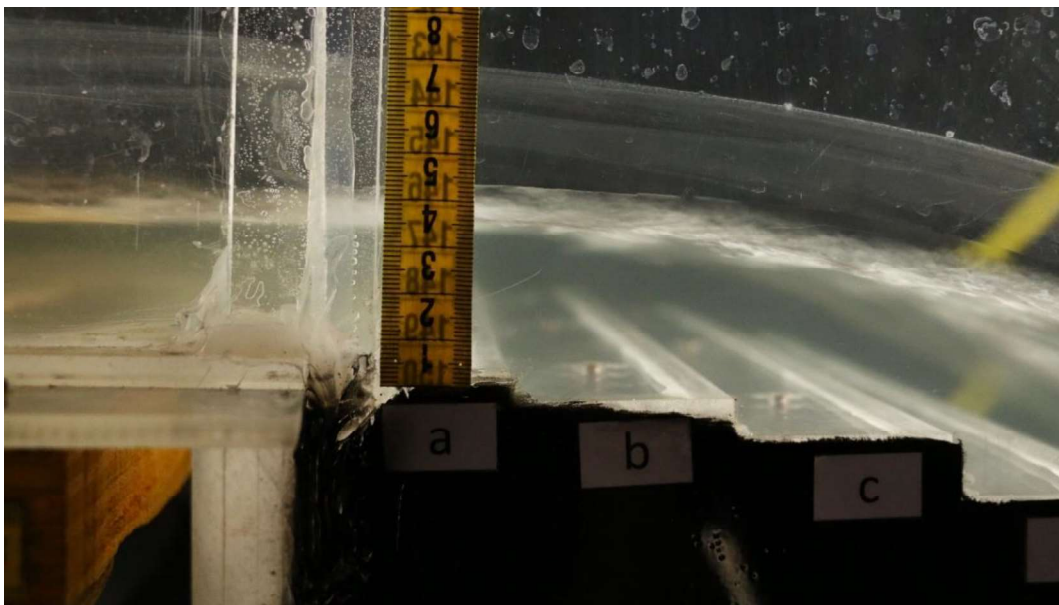


PRUEBA P2: $Q = 34,48$ l/s

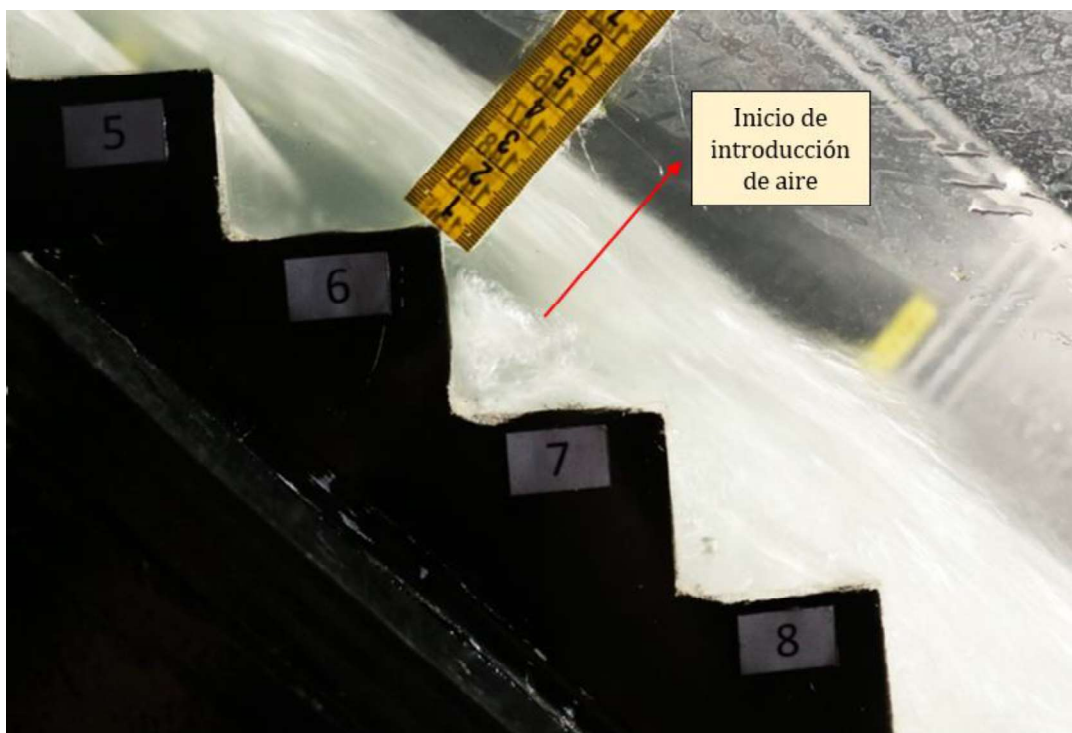
Fotografía No. 92: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



Fotografía No. 93: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



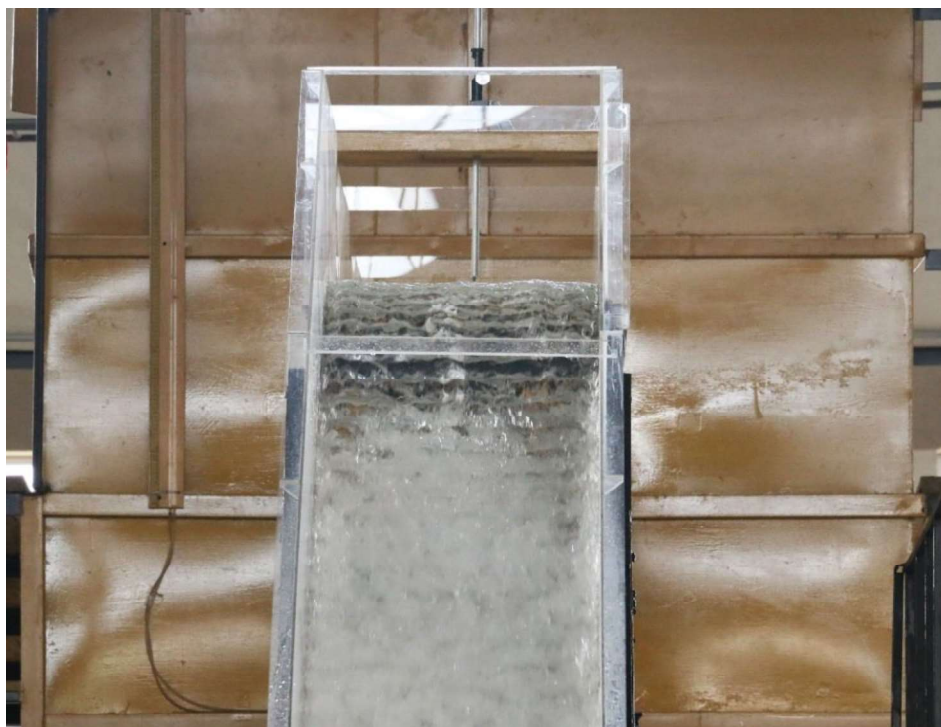
Fotografía No. 94: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



Fotografía No. 95: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en la rápida escalonada.



Fotografía No. 96: Prueba 2, Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 97: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

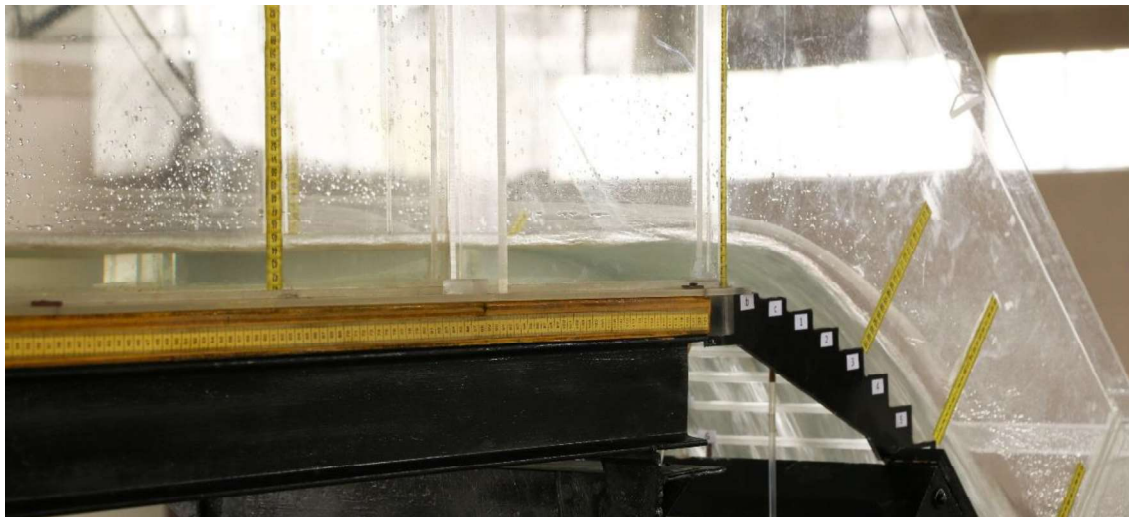


Fotografía No. 98: Prueba 2, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.

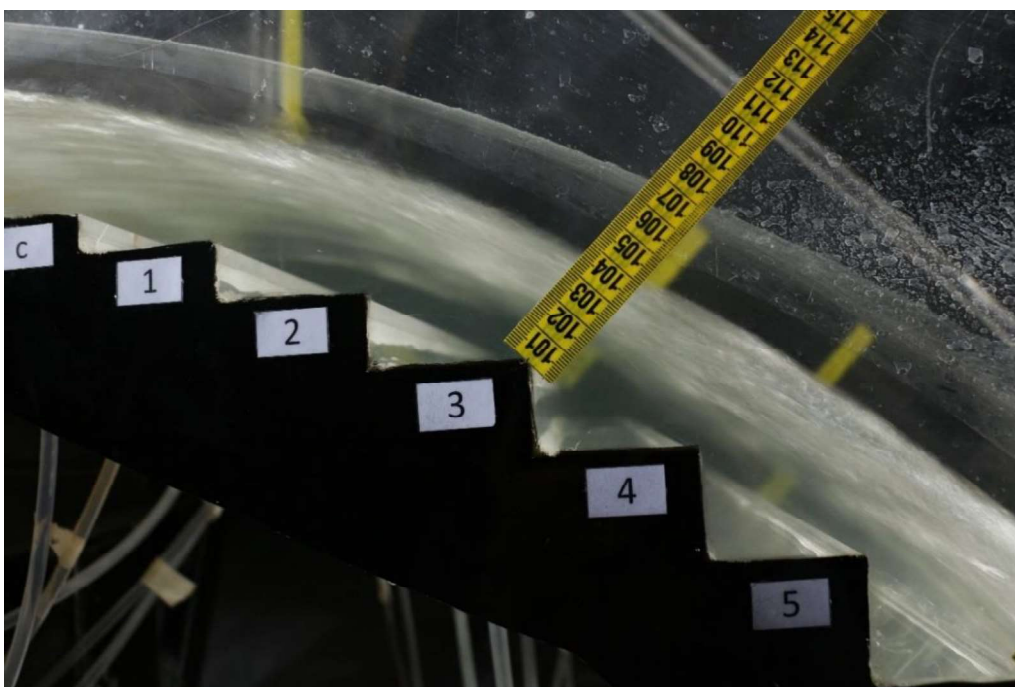


PRUEBA P3: $Q = 44,58$ l/s

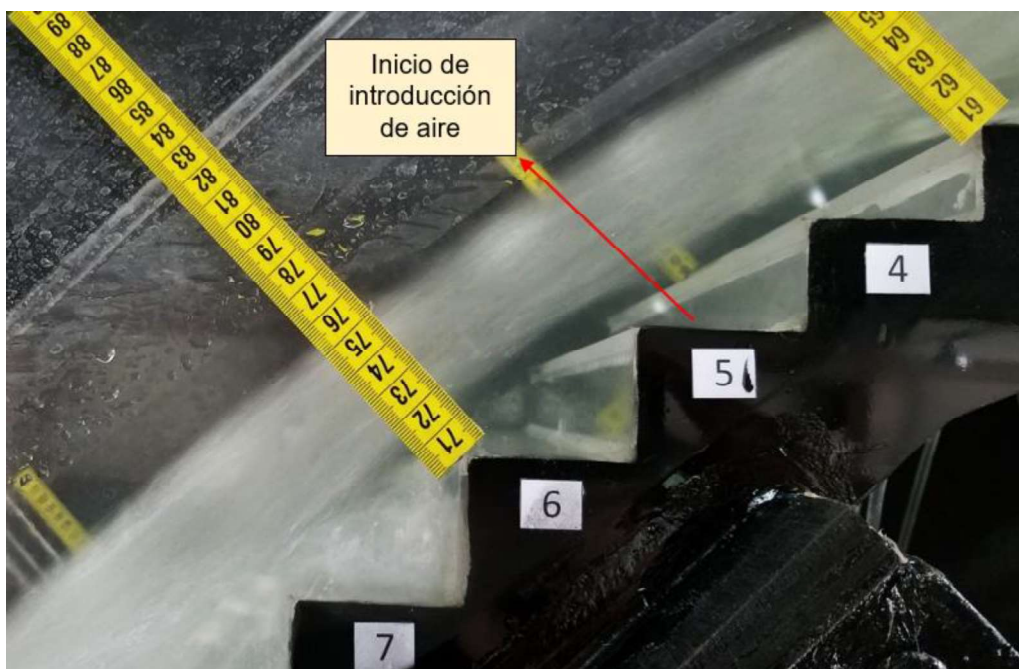
Fotografía No. 99: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



Fotografía No. 100: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 101: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral izquierda del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



Fotografía No. 102: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en la rápida escalonada.



Fotografía No. 103: Prueba 3. Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 104: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

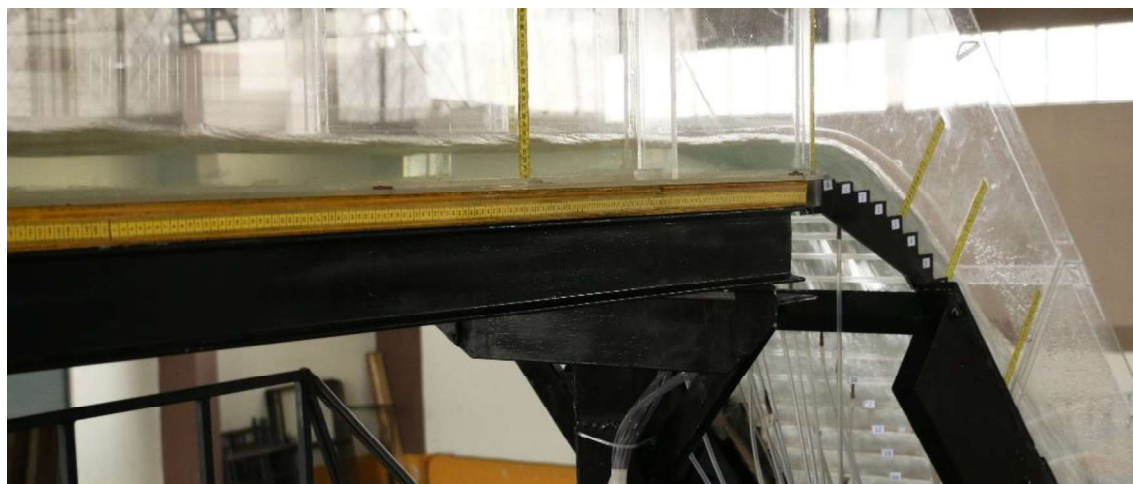


Fotografía No. 105: Prueba 3, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.

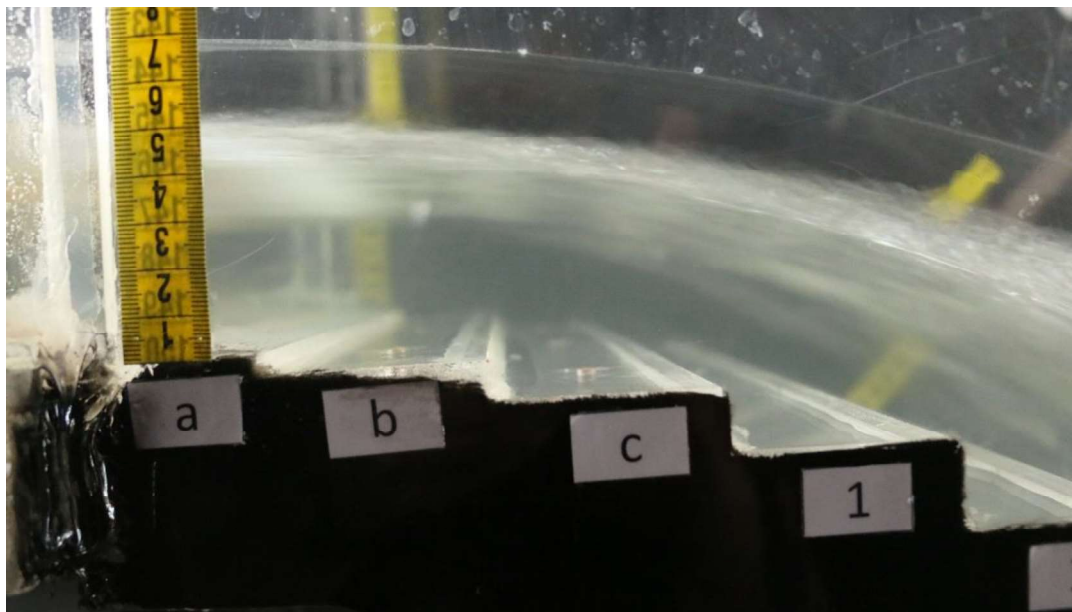


PRUEBA P4: $Q = 55,97$ l/s

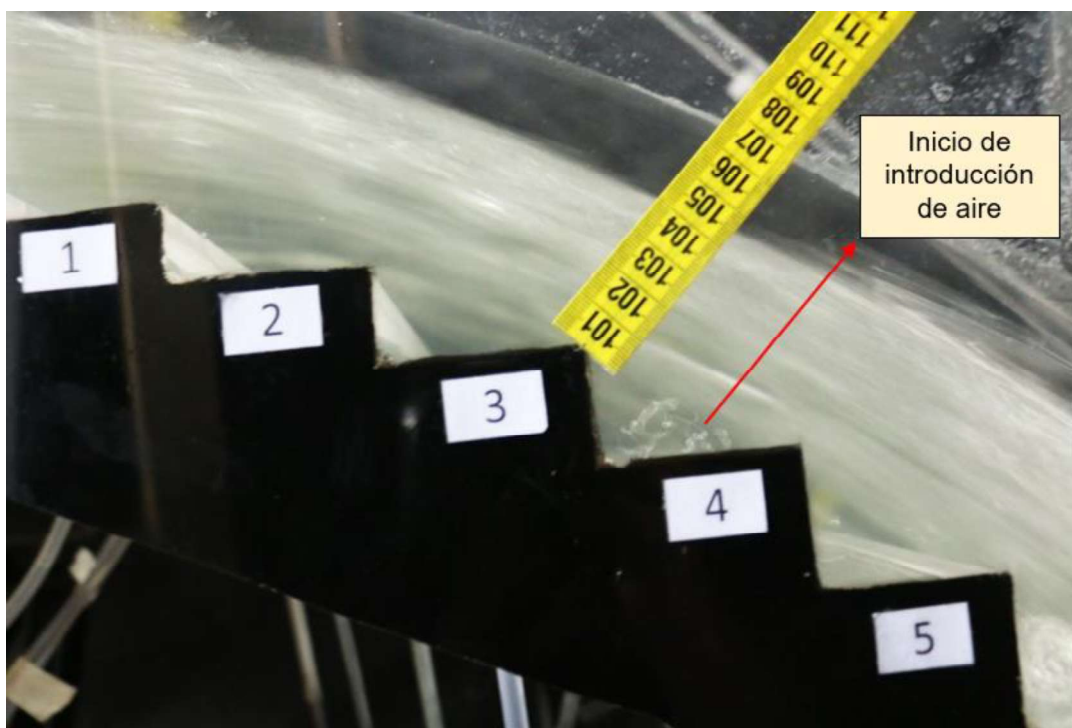
Fotografía No. 106: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



Fotografía No. 107: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 108: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



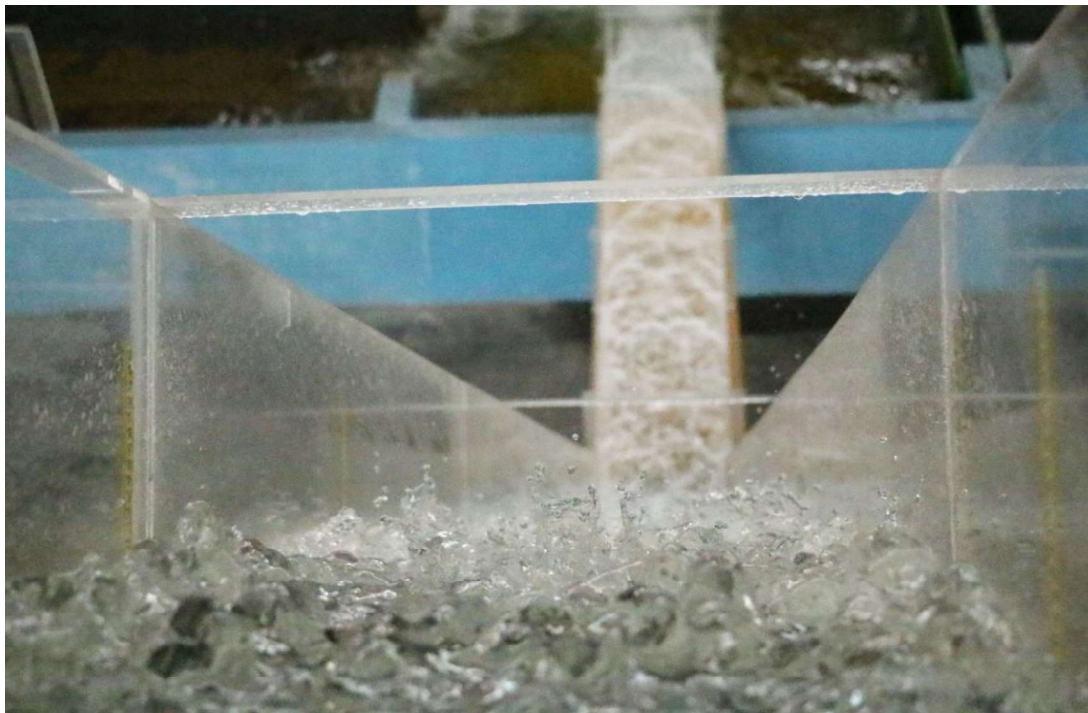
Fotografía No. 109: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en la rápida escalonada.



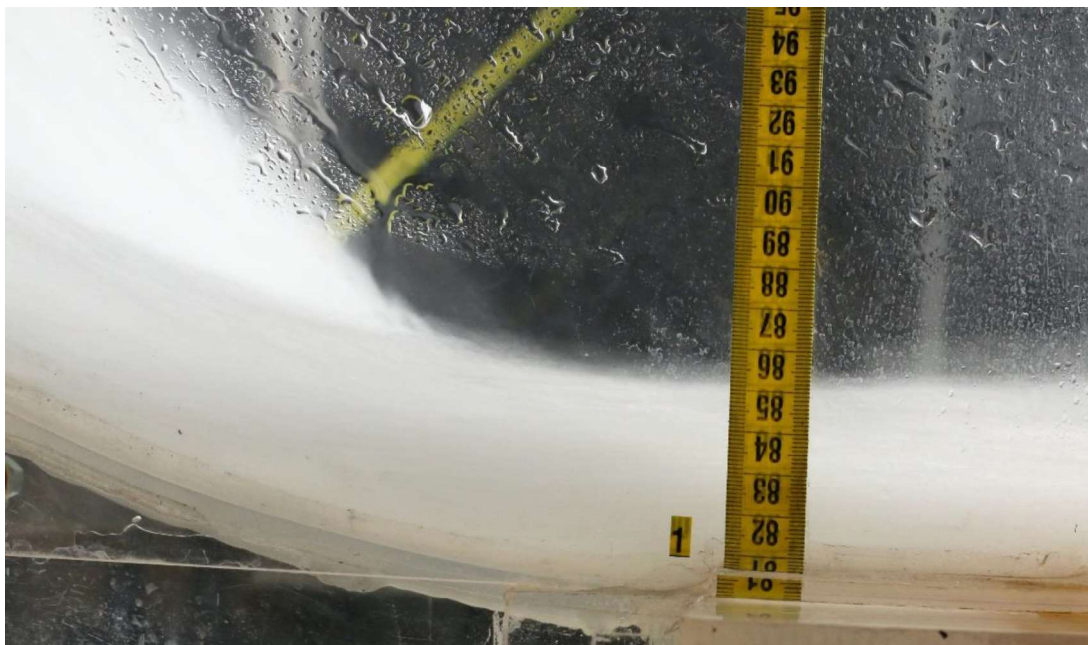
Fotografía No. 110: Prueba 4, Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 111: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.

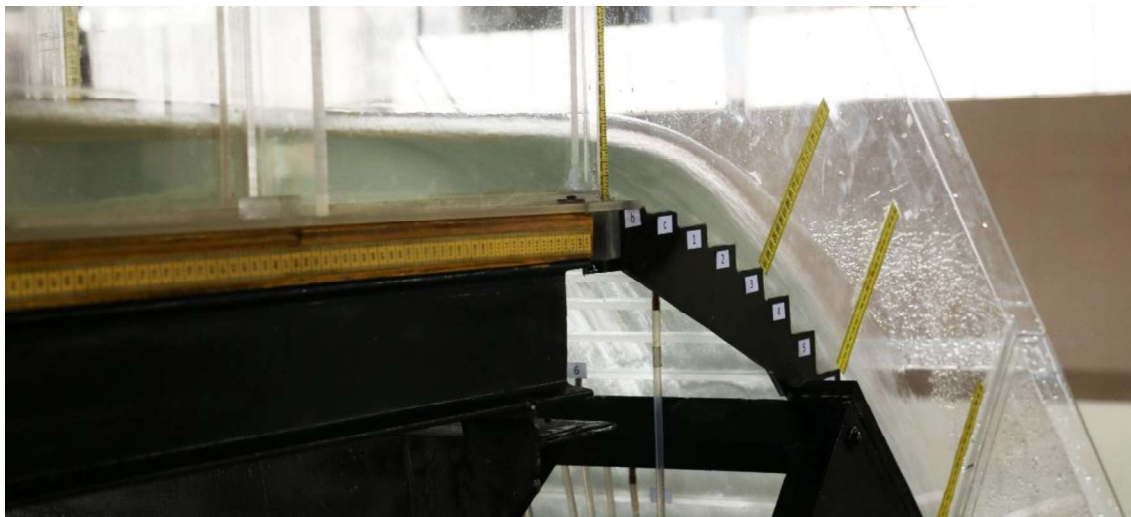


Fotografía No. 112: Prueba 4, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.

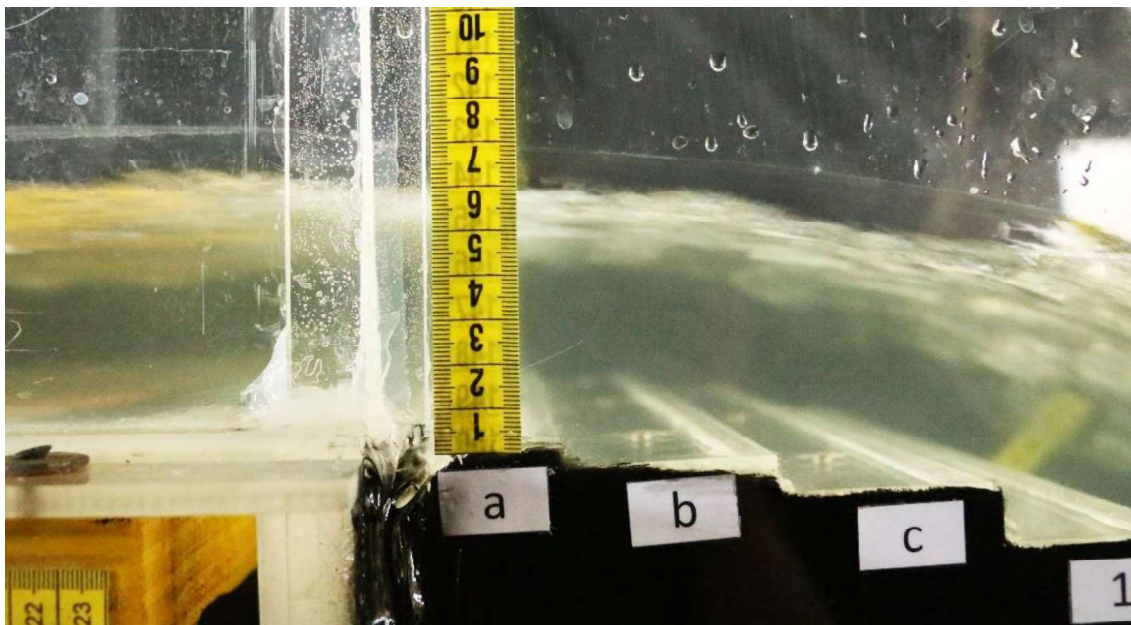


PRUEBA P5: $Q = 77.89$ l/s

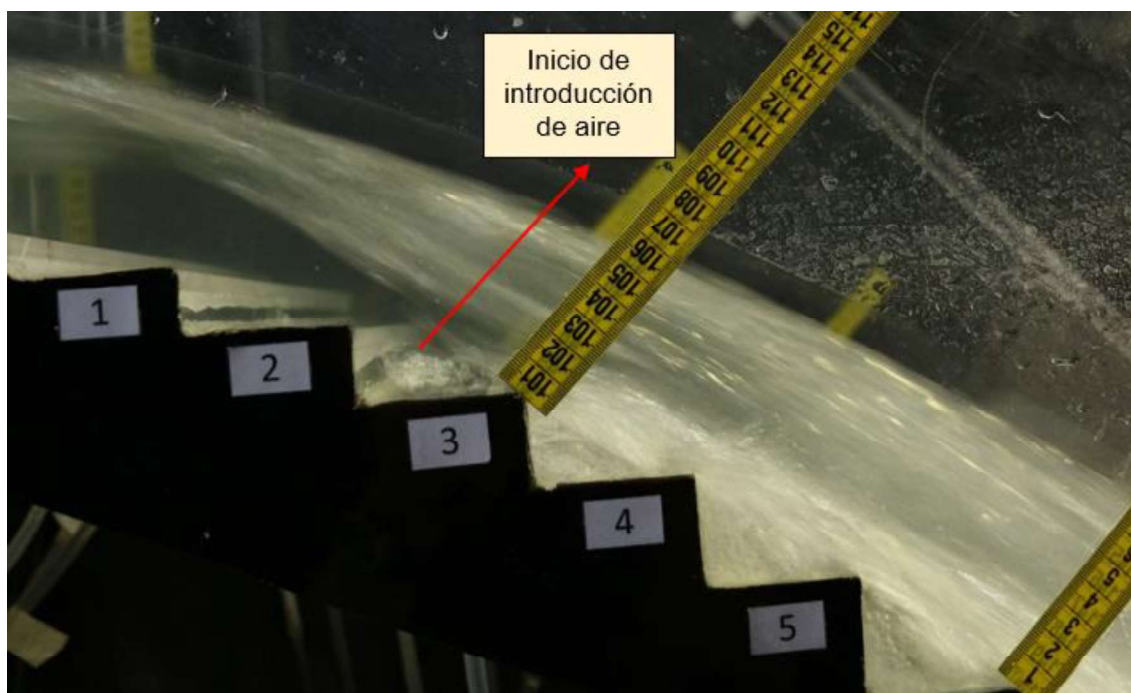
Fotografía No. 113: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el canal de aproximación a la rápida escalonada.



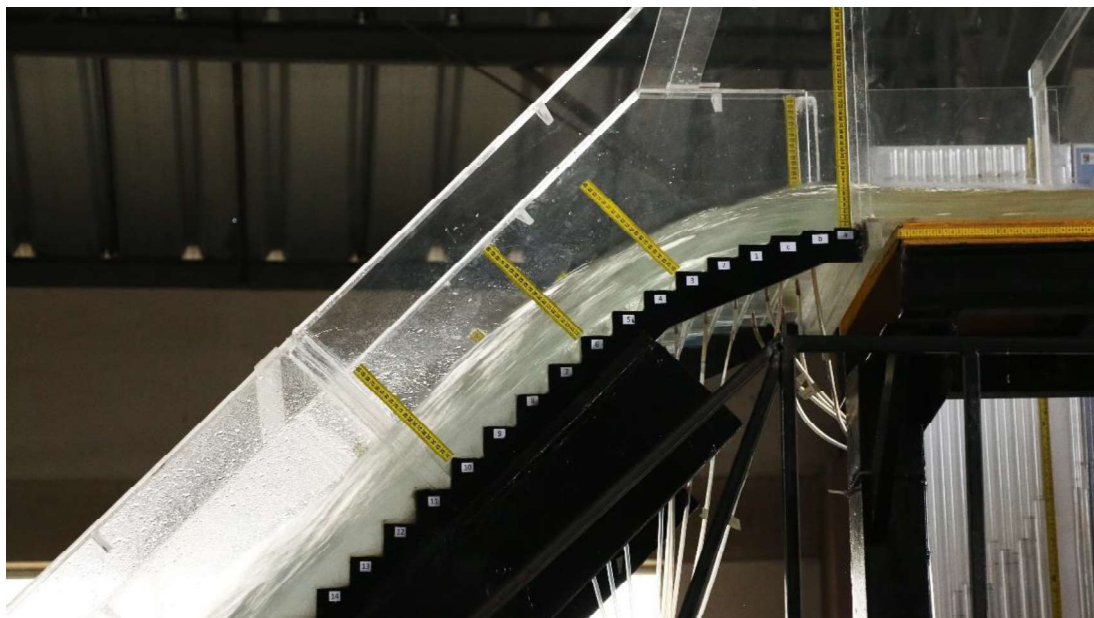
Fotografía No. 114: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



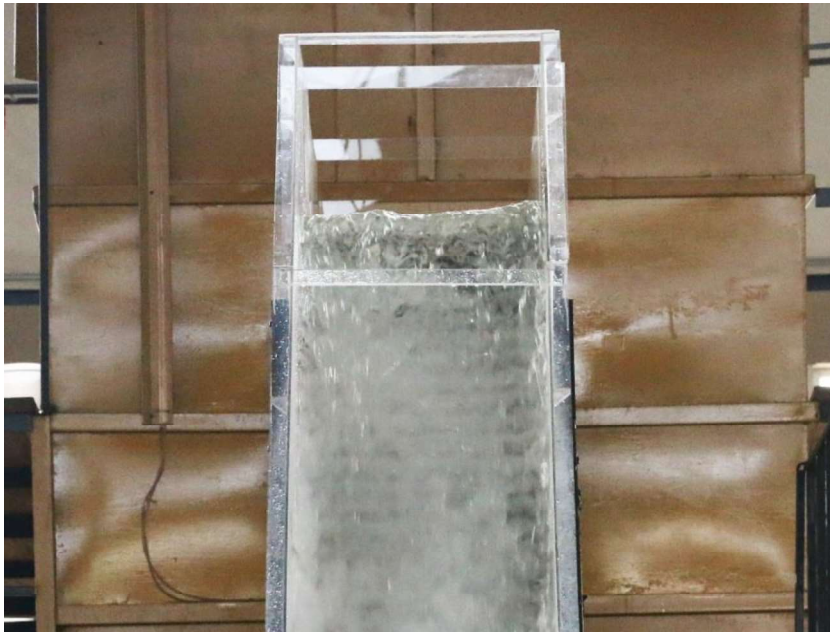
Fotografía No. 115: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el punto de inicio de introducción de aire en la rápida escalonada.



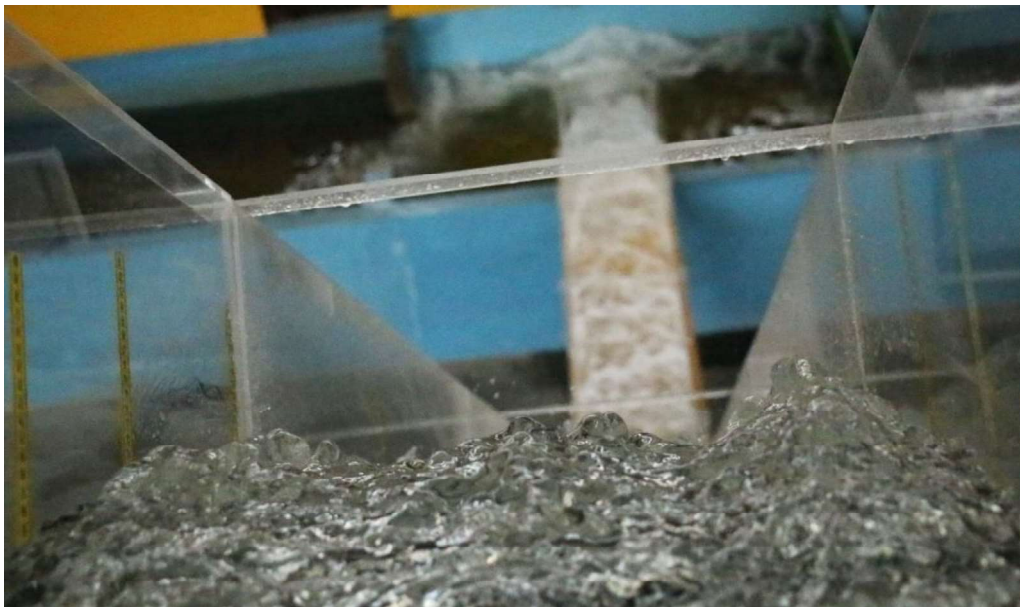
Fotografía No. 116: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en la rápida escalonada.



Fotografía No. 117: Prueba 5, Vista frontal del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 118: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista superior del flujo en el inicio de la rápida escalonada.



Fotografía No. 119: Prueba 5, Geometría con diseño Modificado M2. Vista lateral derecha del flujo en el inicio del canal de salida.



ANEXO 7

**EJEMPLO PRÁCTICO DE PREDISEÑO DE UNA RÁPIDA ESCALONADA
APLICANDO LAS CURVAS ADIMENSIONALES OBTENIDAS EN EL ESTUDIO**

Para plantear un ejemplo práctico de prediseño de una rápida escalonada aplicando las curvas adimensionales obtenidas en este estudio, se debe tener en cuenta dos restricciones necesarias para la validez de su aplicación, estas son:

- El flujo de aproximación tiene que ser en régimen supercrítico
- El ángulo de inclinación de la rápida escalonada debe ser de 45°

Ejemplo práctico:

Se requiere realizar el prediseño de una rápida escalonada que debido a las condiciones topográficas del terreno presenta flujo de aproximación supercrítico y un ángulo de inclinación de 45° . El caudal de diseño es de $125 \text{ m}^3/\text{s}$.

ZONA NO AIREADA

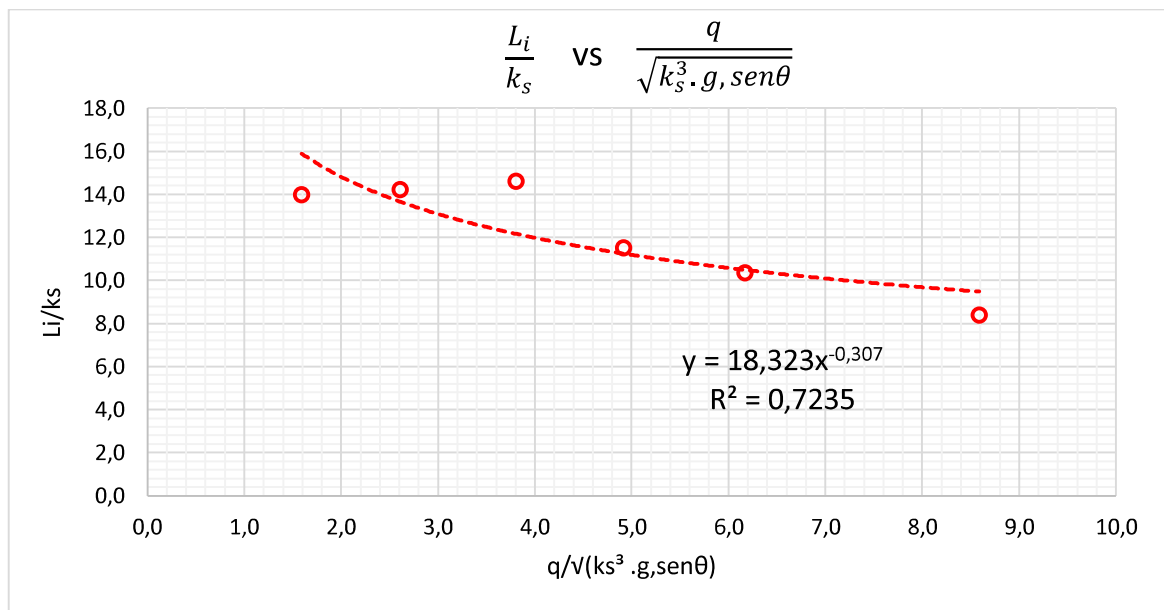
A continuación, se presentan las ecuaciones adimensionales obtenidas mediante el análisis dimensional:

$$\frac{L_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

$$\frac{y_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

A partir de los datos obtenidos en la instalación experimental y con la ayuda de las curvas adimensionales obtenidas en el análisis dimensional se obtuvieron los siguientes gráficos y ecuaciones.

Gráfico No. 1: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ec. (3-1).



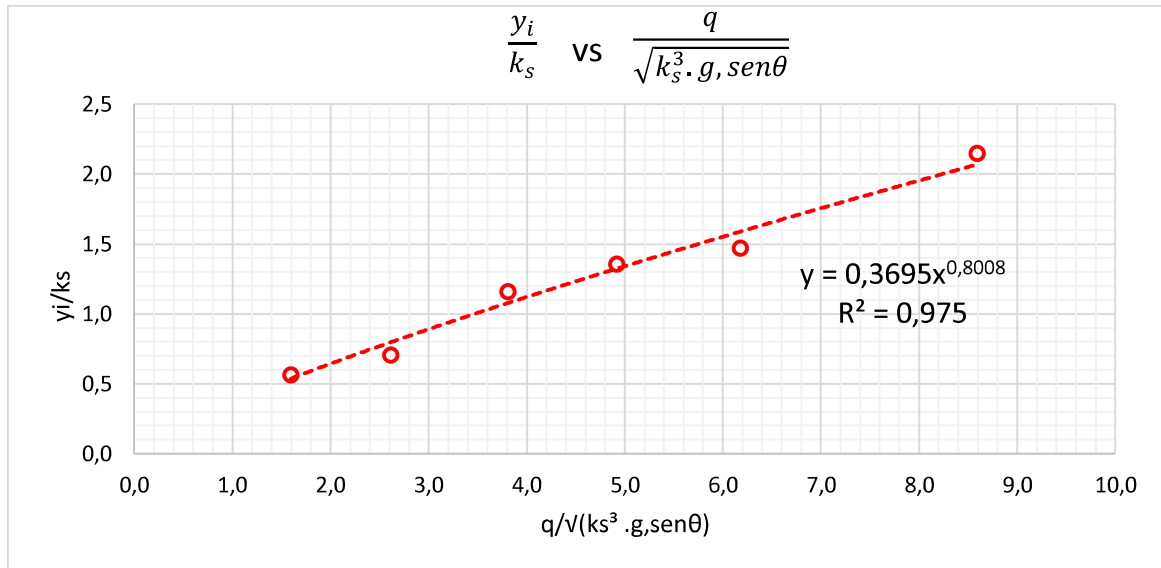
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{L_i}{k_s} = 18.323 * \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{-0.307} \quad (0-1)$$

Esta ecuación sirve para obtener la distancia al punto de inicio de aireación medido desde el umbral de la rápida.

Gráfico No. 2: Curva adimensional correspondiente a los parámetros descritos en la ec. (3-1)



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.3695 \left(\frac{q}{k_s^3 * g * \text{sen}\theta} \right)^{0.8008} \quad (0-2)$$

Esta ecuación sirve para obtener la profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación.

ZONA AIREADA

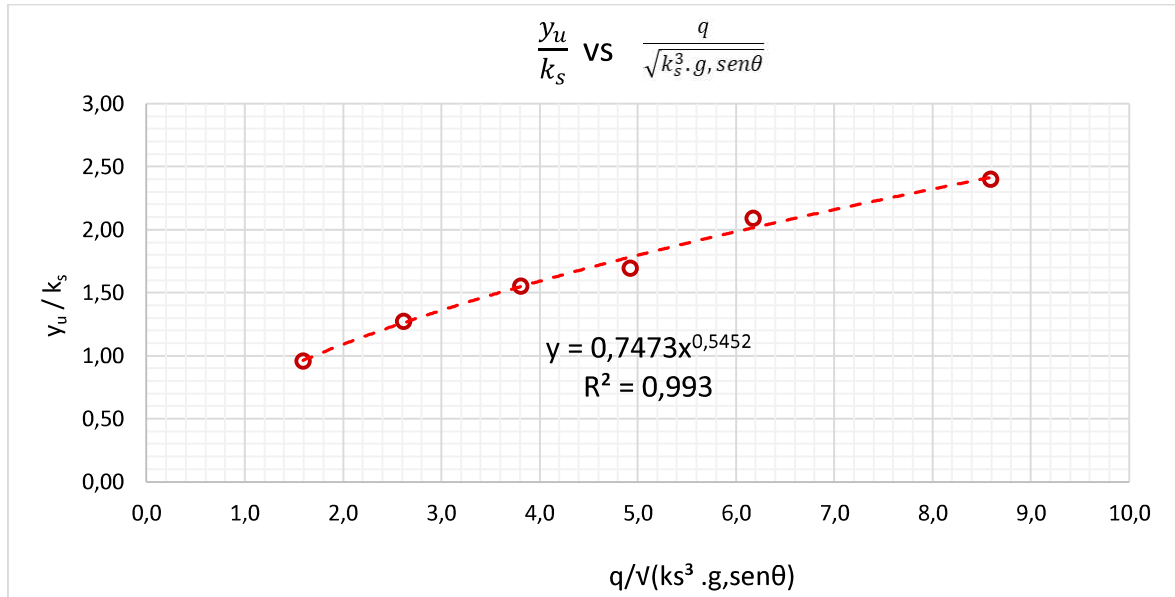
A continuación, se presentan las ecuaciones adimensionales obtenidas mediante el análisis dimensional:

$$\frac{L_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

$$\frac{y_i}{k_s} = f \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)$$

A partir de los datos obtenidos en la instalación experimental y con la ayuda de las curvas adimensionales obtenidas en el análisis dimensional se obtuvieron los siguientes gráficos y ecuaciones.

Gráfico No. 3: Curva adimensional de los parámetros descritos en la ec. (3-3)

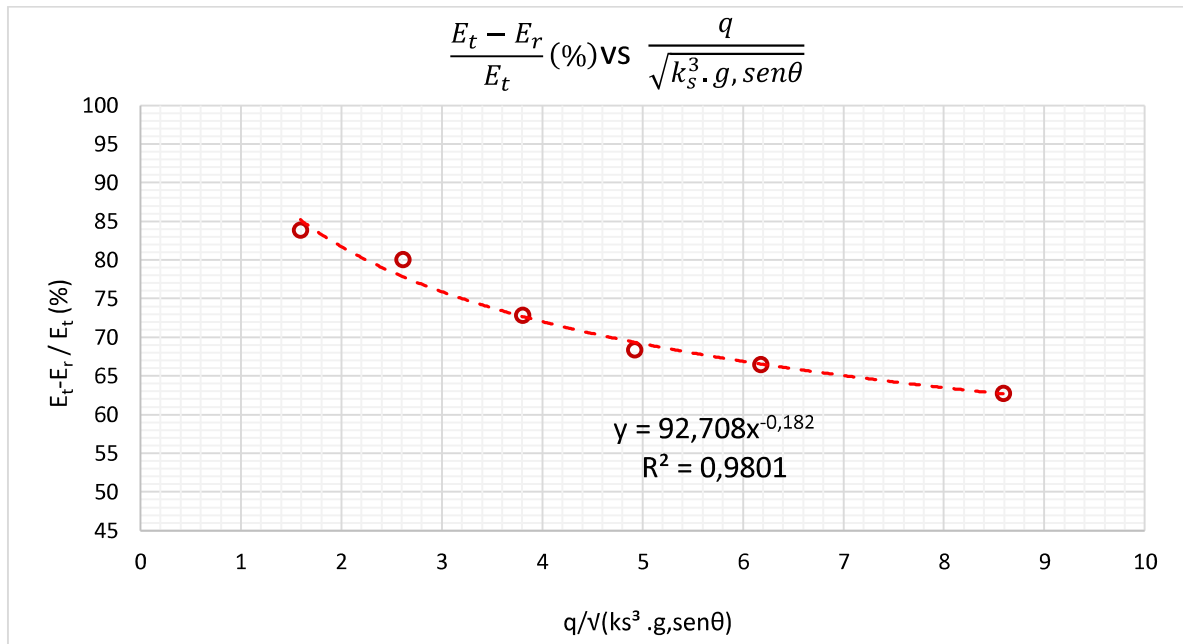


REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{y_u}{k_s} = 0,7473 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{0,5452} \quad (0-3)$$

Esta ecuación sirve para obtener la profundidad de agua en la zona de flujo uniforme.

Gráfico No. 4: Curva adimensional de los parámetros descritos en la ec. (3-4)

REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Siendo la ecuación de la curva:

$$\frac{\Delta E}{E_t} = 92.708 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}} \right)^{-0.182}$$

Esta ecuación sirve para obtener la disipación de energía en la rápida escalonada.

SOLUCIÓN:

Con las dos condiciones establecidas al inicio del presente ejercicio práctico y el uso de las gráficas obtenidas en el presente estudio, se plantean tres opciones variando la altura y la longitud de los peldaños pero manteniendo la relación para que se cumpla que la rápida escalonada tenga un ángulo de inclinación de 45°, también se consideran tres valores de ancho de la rápida para obtener curvas de tendencia en función del caudal unitario.

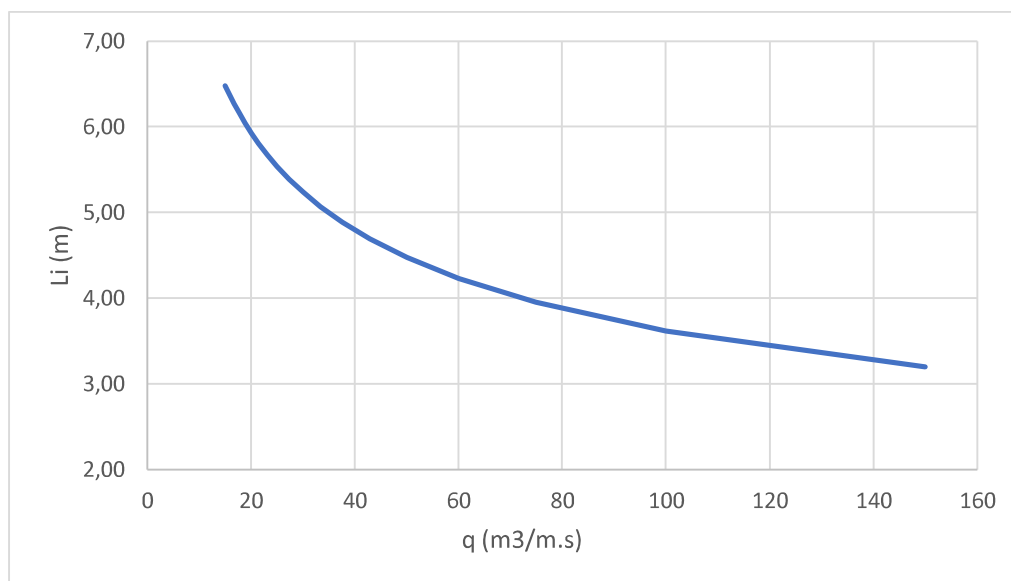
A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla No. 47: Cálculo de disipación de energía de la rápida escalonada que tiene una altura y longitud de peldaño de 1.0 (m) para diferentes anchos de la rápida.

Q diseño	150	m ³ /s			
h=l	1	m			
θ	45	°			
cos θ	0.707				
sen θ	0.707				
ks	0.707	m			
g	9.81	m/s ²			
Ancho de la Rápida	Caudal Unitario	Longitud al Inicio de la Autoaireación	Calado en el punto de Inicio de la Autoaireación	Calado en la Zona de Flujo Uniforme	Disipación de Energía
b (m)	q (m³/m/s)	Li (m)	Yi (m)	Yu (m)	ΔE/Et (%)
1.00	150.00	3.19	10.09	6.36	40.41
1.50	100.00	3.62	7.29	5.10	43.51
2.00	75.00	3.95	5.79	4.36	45.85
2.50	60.00	4.23	4.84	3.86	47.75
3.00	50.00	4.47	4.18	3.49	49.36
3.50	42.86	4.69	3.70	3.21	50.76
4.00	37.50	4.89	3.32	2.98	52.01
4.50	33.33	5.07	3.02	2.80	53.14
5.00	30.00	5.23	2.78	2.64	54.17
5.50	27.27	5.39	2.58	2.51	55.11
6.00	25.00	5.54	2.40	2.39	55.99
6.50	23.08	5.67	2.25	2.29	56.82
7.00	21.43	5.80	2.12	2.20	57.59
7.50	20.00	5.93	2.01	2.12	58.32
8.00	18.75	6.05	1.91	2.05	59.00
8.50	17.65	6.16	1.82	1.98	59.66
9.00	16.67	6.27	1.74	1.92	60.28
9.50	15.79	6.37	1.66	1.86	60.88
10.00	15.00	6.47	1.60	1.81	61.45

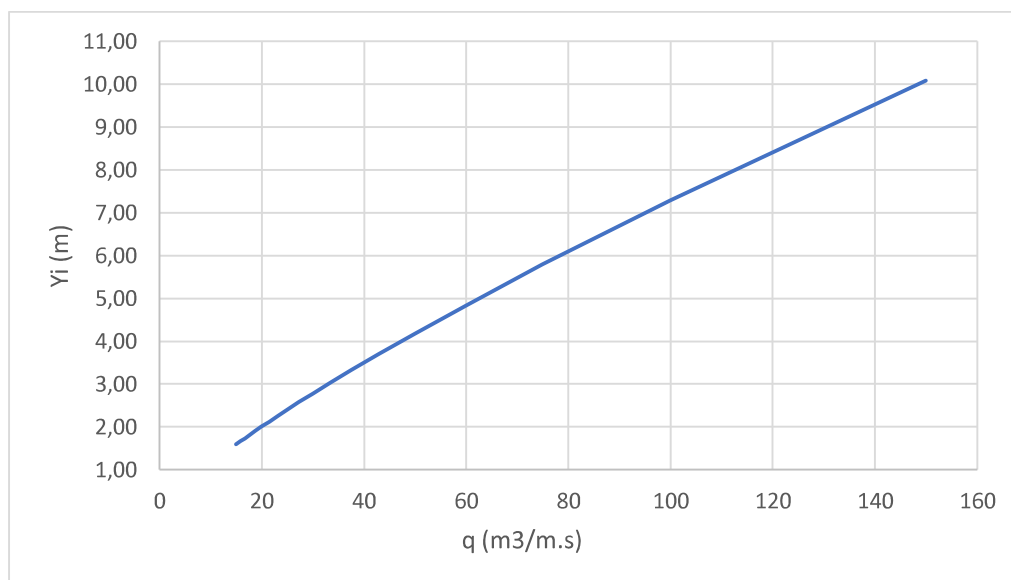
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 5: Curva de variación de la distancia al punto de inicio de aireación medido desde el umbral de la rápida en función del caudal unitario



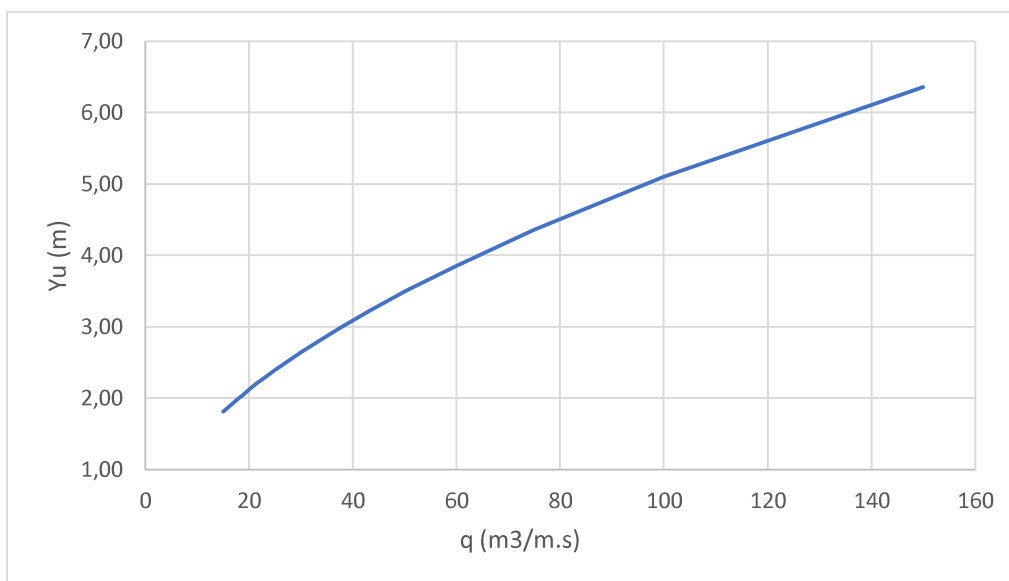
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 6: Curva de variación de la profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación en función del caudal unitario.



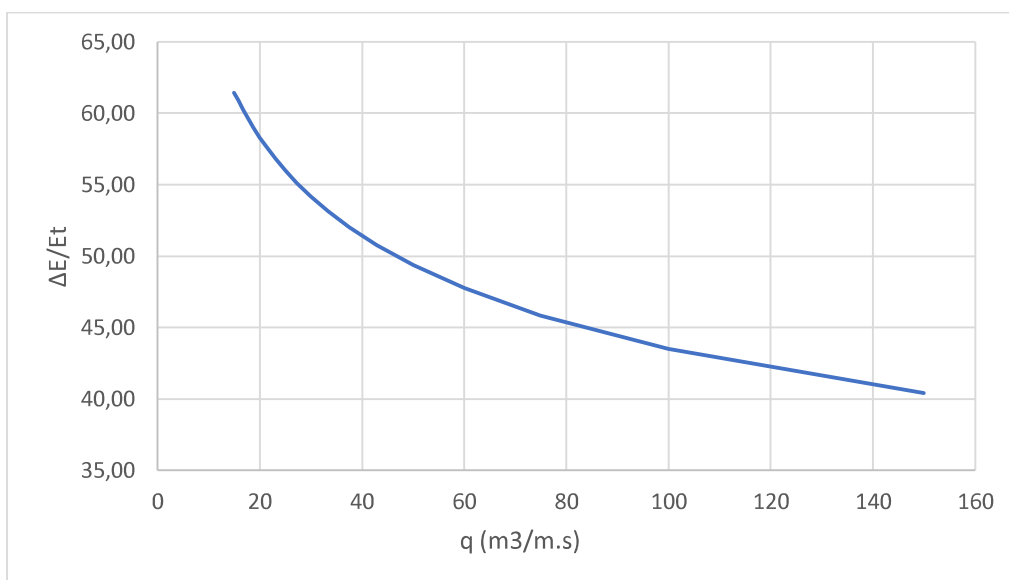
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 7: Curva de variación de la profundidad de agua en la zona de flujo uniforme en función del caudal unitario.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 8: Curva de variación de la disipación de energía en función del caudal unitario.



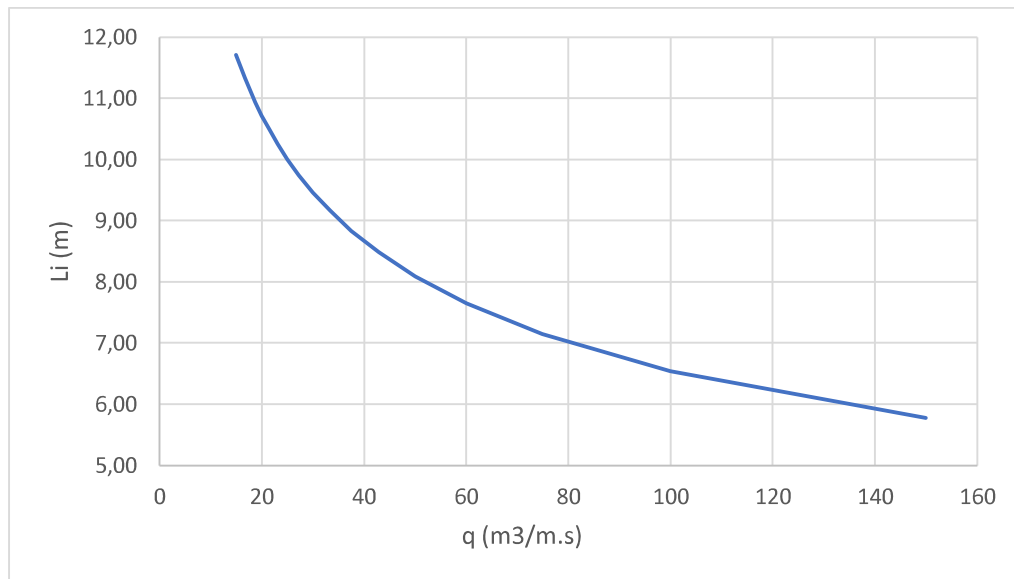
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 48: Cálculo de disipación de energía de la rápida escalonada que tiene una altura y longitud de peldaño de 1.5 (m) para diferentes anchos de la rápida.

Q diseño	150	m ³ /s			
h=l	1.5	m			
θ	45	°			
cos θ	0.707				
sen θ	0.707				
ks	1.061	m			
g	9.81	m/s ²			
Ancho de la Rápida	Caudal Unitario	Longitud al Inicio de la Autoaireación	Calado en el punto de Inicio de la Autoaireación	Calado en la Zona de Flujo Uniforme	Disipación de Energía
b (m)	q (m³/m/s)	Li (m)	Yi (m)	Yu (m)	$\Delta E/E_t$ (%)
1.00	150.00	5.77	9.30	6.84	45.14
1.50	100.00	6.54	6.72	5.49	48.60
2.00	75.00	7.14	5.34	4.69	51.21
2.50	60.00	7.65	4.46	4.15	53.34
3.00	50.00	8.09	3.86	3.76	55.14
3.50	42.86	8.48	3.41	3.46	56.70
4.00	37.50	8.84	3.06	3.21	58.10
4.50	33.33	9.16	2.79	3.01	59.36
5.00	30.00	9.46	2.56	2.85	60.51
5.50	27.27	9.74	2.37	2.70	61.57
6.00	25.00	10.01	2.21	2.58	62.55
6.50	23.08	10.26	2.08	2.47	63.47
7.00	21.43	10.49	1.96	2.37	64.33
7.50	20.00	10.72	1.85	2.28	65.14
8.00	18.75	10.93	1.76	2.20	65.91
8.50	17.65	11.14	1.67	2.13	66.64
9.00	16.67	11.33	1.60	2.07	67.34
9.50	15.79	11.52	1.53	2.01	68.01
10.00	15.00	11.71	1.47	1.95	68.64

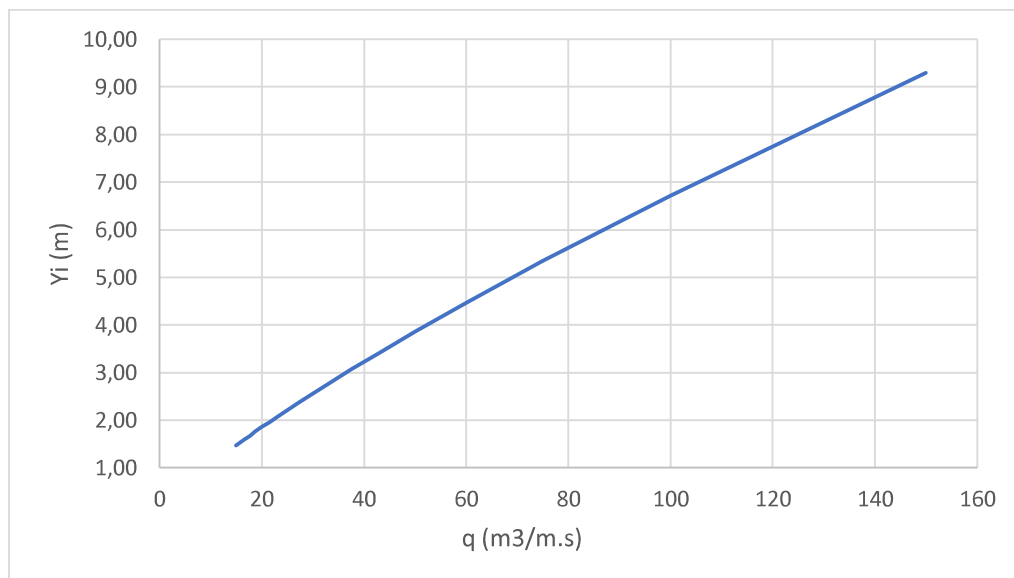
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 9: Curva de variación de la distancia al punto de inicio de aireación medido desde el umbral de la rápida en función del caudal unitario.



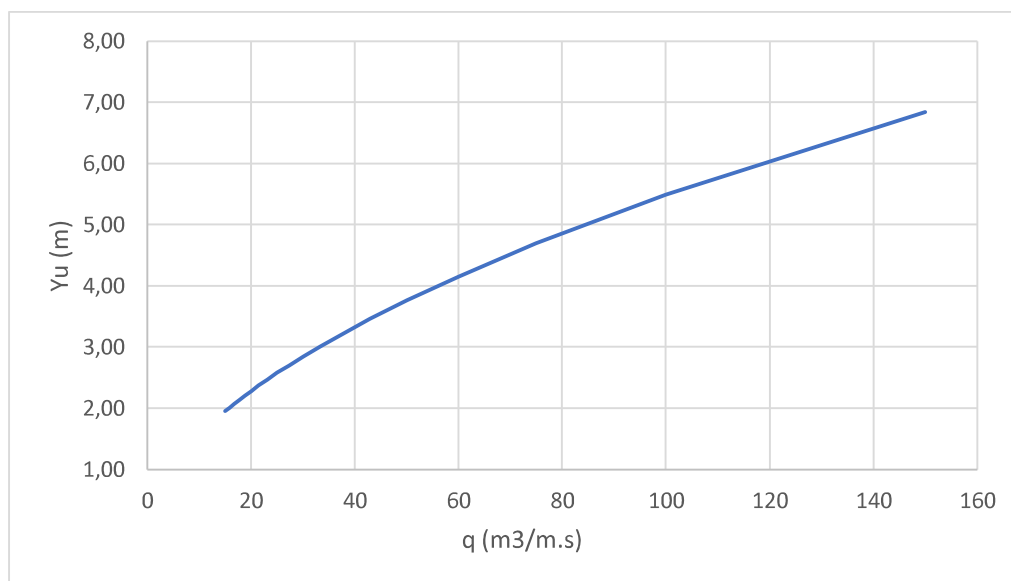
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 10: Curva de variación de la profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación en función del caudal unitario.



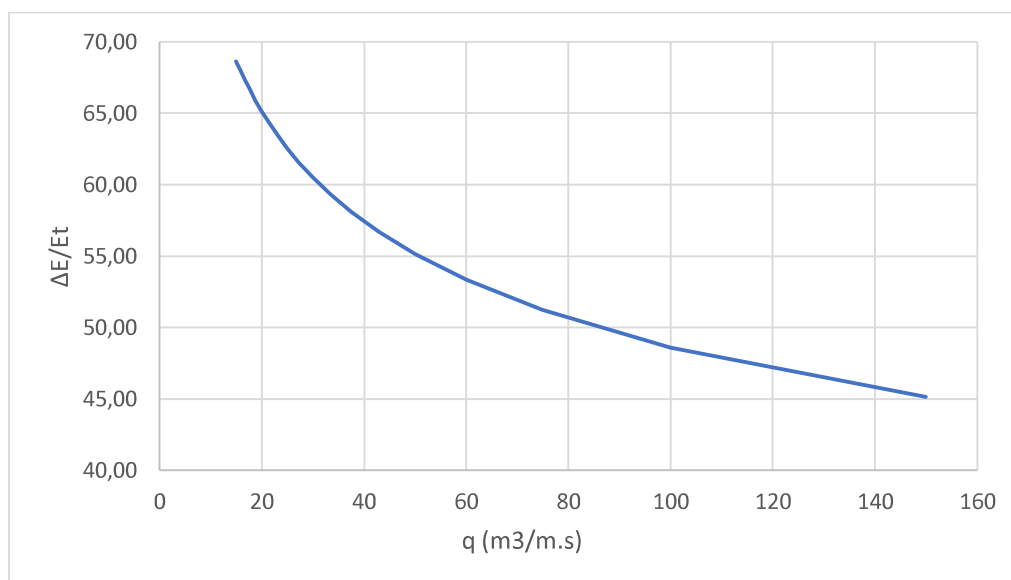
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 11: Curva de variación de la profundidad de agua en la zona de flujo uniforme en función del caudal unitario.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 12: Curva de variación de la disipación de energía ($\Delta E/E_t$) en función del caudal unitario.



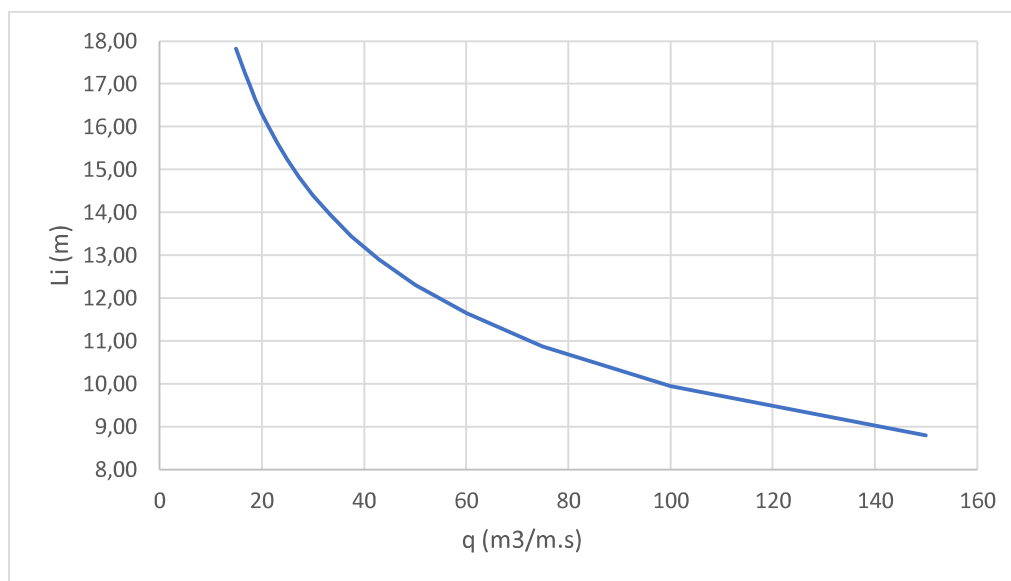
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Tabla No. 49: Cálculo de disipación de energía de la rápida escalonada que tiene una altura y longitud de peldaño de 2.0 (m) para diferentes anchos de la rápida.

Q diseño	150	m ³ /s			
h=l	2	m			
θ	45	°			
cos θ	0.707				
sen θ	0.707				
ks	1.414	m			
g	9.81	m/s ²			
Ancho de la Rápida	Caudal Unitario	Longitud al Inicio de la Autoaireación	Calado en el punto de Inicio de la Autoaireación	Calado en la Zona de Flujo Uniforme	Disipación de Energía
b (m)	q (m³/m/s)	Li (m)	Yi (m)	Yu (m)	$\Delta E/E_t$ (%)
1.00	150.00	8.79	8.77	7.21	48.83
1.50	100.00	9.95	6.34	5.78	52.57
2.00	75.00	10.87	5.04	4.94	55.40
2.50	60.00	11.64	4.21	4.38	57.69
3.00	50.00	12.31	3.64	3.96	59.64
3.50	42.86	12.91	3.22	3.64	61.34
4.00	37.50	13.45	2.89	3.39	62.85
4.50	33.33	13.94	2.63	3.18	64.21
5.00	30.00	14.40	2.42	3.00	65.45
5.50	27.27	14.83	2.24	2.85	66.60
6.00	25.00	15.23	2.09	2.72	67.66
6.50	23.08	15.61	1.96	2.60	68.65
7.00	21.43	15.97	1.85	2.50	69.58
7.50	20.00	16.31	1.75	2.40	70.46
8.00	18.75	16.64	1.66	2.32	71.30
8.50	17.65	16.95	1.58	2.25	72.09
9.00	16.67	17.25	1.51	2.18	72.84
9.50	15.79	17.54	1.45	2.11	73.56
10.00	15.00	17.82	1.39	2.06	74.25

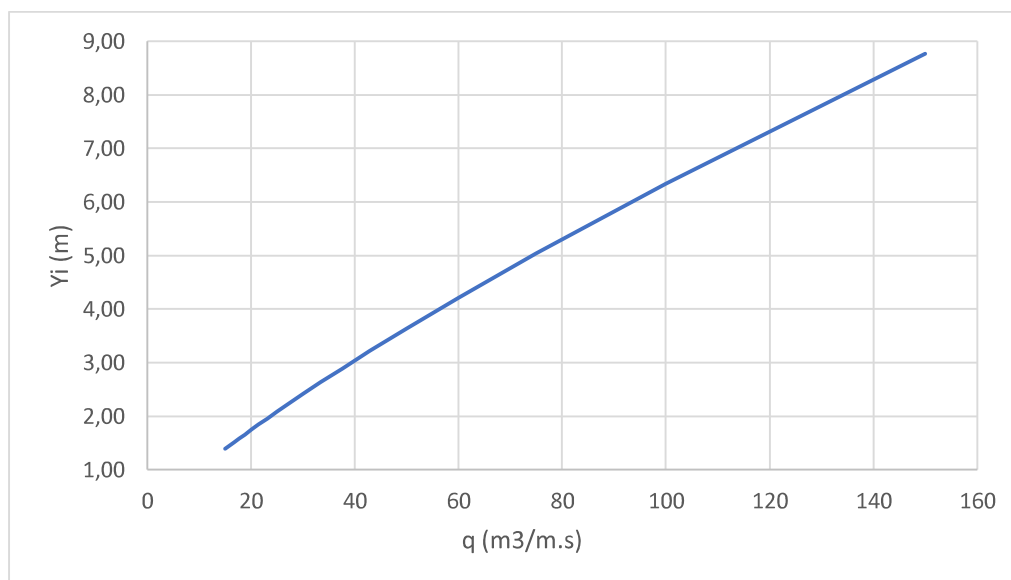
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 13: Curva de variación de la distancia al punto de inicio de aireación medido desde el umbral de la rápida en función del caudal unitario.



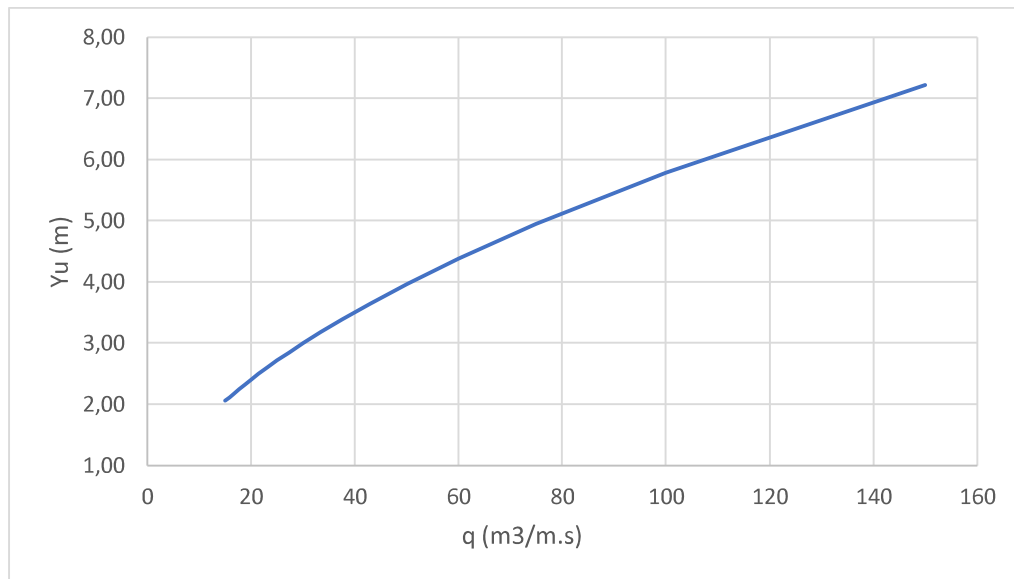
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 14: Curva de variación de la profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación (Y_i) en metros en función del caudal unitario.



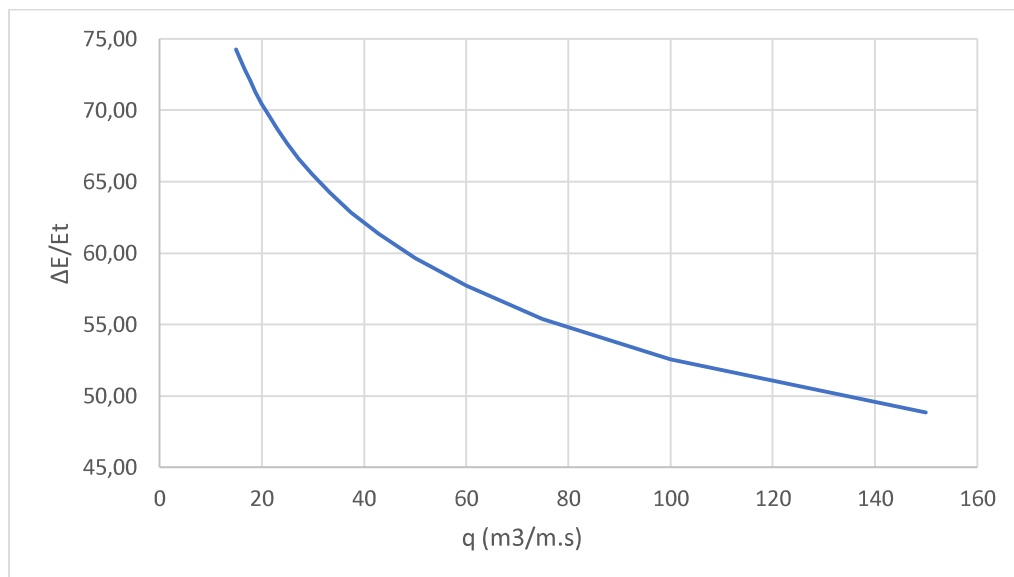
REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 15: Curva de variación de la profundidad de agua en la zona de flujo uniforme en función del caudal unitario.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

Gráfico No. 16: Curva de variación de la disipación de energía ($\Delta E/E_t$) en función del caudal unitario.



REALIZADO POR: Durán & Sánchez

CONCLUSIÓN:

A partir de los resultados obtenidos con las diferentes dimensiones de los escalones, se escogió la opción de la rápida escalonada con el escalón de 2.0 m de huella y contrahuella, y un ancho efectivo de 10.0 m, la razón por la cual se eligió esta rápida escalonada con esas dimensiones es porque ofrece un mayor porcentaje de disipación de energía, constructivamente hay que verificar que sea una opción fácilmente constructiva y además las paredes laterales requeridas en la estructura son las de menor dimensión.

A continuación, con la geometría escogida se procede a obtener los resultados obtenidos mediante el uso de los ábacos de diseño adimensionales resultantes del presente proyecto de titulación.

Con los siguientes datos:

Tabla No. 50: Datos seleccionados en el prediseño para ser validados mediante el uso de las curvas adimensionales resultantes del presente proyecto de titulación

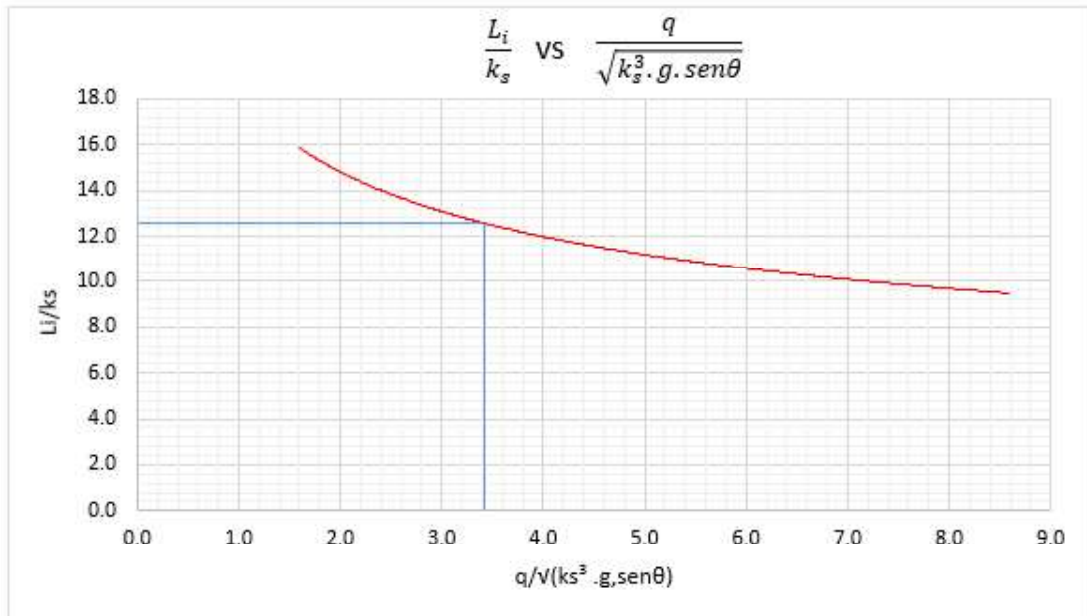
Q	150	m ³ /s
h	2	M
b	10	M
θ	45	°
ks	1.414	M
g	9.81	m/s ²
q	15	m ³ /m.s

Se obtiene la siguiente relación.

$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g * \text{sen}\theta}}$	3.4
---	-----

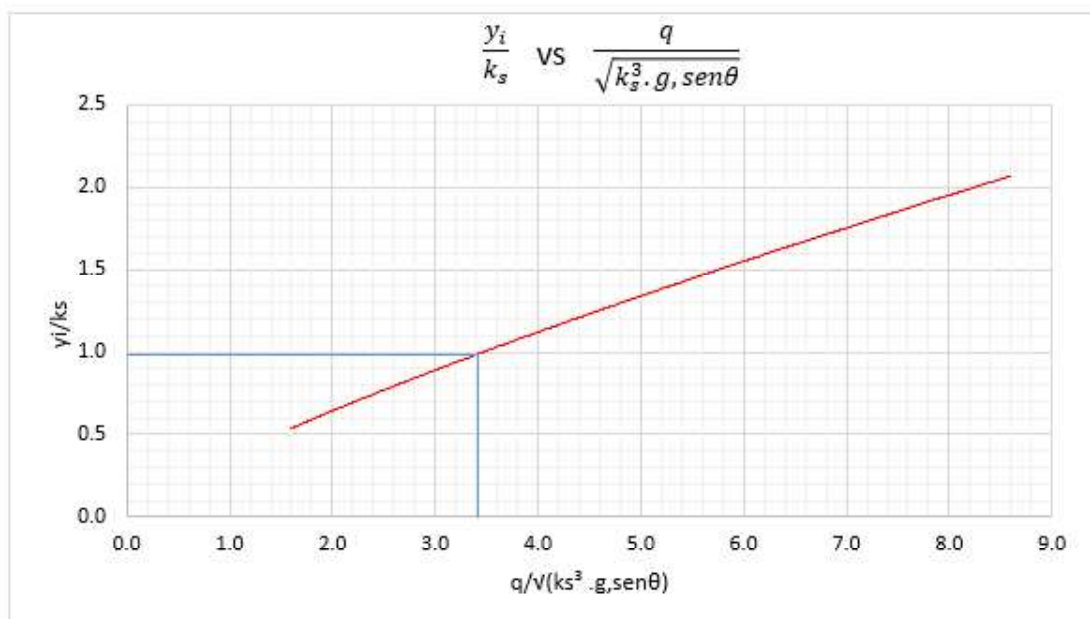
El valor de la relación se ubica en el eje de las abscisas en las curvas adimensionales obtenidas en el presente estudio, se pretende obtener nuevas relaciones que permitan conseguir y verificar las características en la rápida escalonada, estas relaciones obtenidas gráficamente se muestran a continuación:

Gráfico No. 17: Ubicación, en la gráfica adimensional resultante del presente proyecto de titulación, de la longitud al punto inicial de autoaireación para (h) y $(l) = 2$ (m) y $B = 10$ (m)



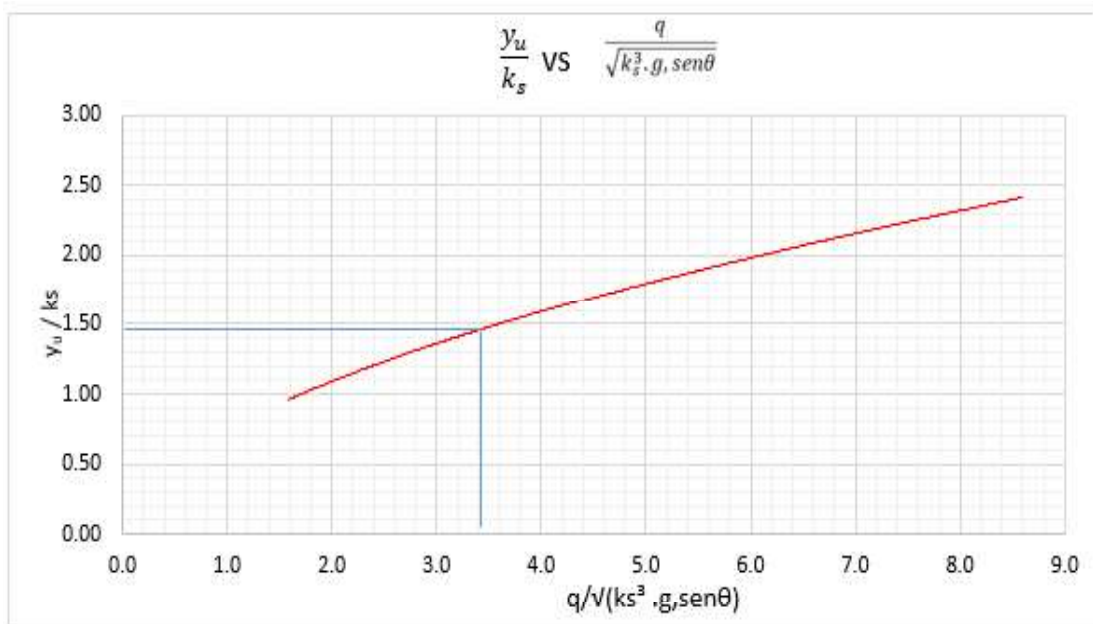
L_i/k_s	12.3	-----
L_i	17.39	M

Gráfico No. 18: Ubicación, en la gráfica adimensional resultante del presente proyecto de titulación, del calado en el punto inicial de autoaireación para (h) y $(l) = 2$ (m) y $B = 10$ (m)



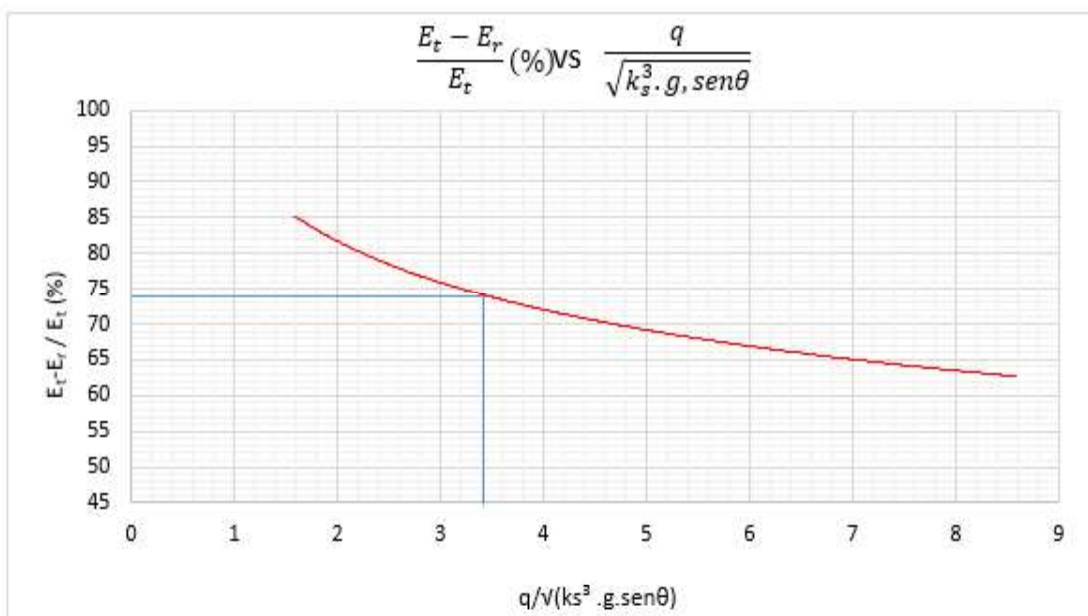
y_i/k_s	1	-----
y_i	1.41	M

Gráfico No. 19: Ubicación, en la gráfica adimensional resultante del presente proyecto de titulación, del calado en flujo uniforme para (h) y (l) = 2 (m) y B = 10 (m)



y_u/k_s	1.46	-----
y_u	2.06	M

Gráfico No. 20: Ubicación, en la gráfica adimensional resultante del presente proyecto de titulación, del porcentaje de disipación de la energía para (h) y (l) = 2 (m) y B = 10 (m)



$\Delta E/E_t$	74%
----------------	-----

Los valores obtenidos con las ecuaciones experimentales y los ábacos adimensionales para la geometría escogida son los mismos ya que la manera de obtener tanto la ecuación como el ábaco adimensional fueron realizados con la misma metodología.

ANEXO 8
PLANOS DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

PROYECTO 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.

CONTENIDO:
PLANOS AS BUILT, PLANTA PERFIL Y CORTES TRANSVERSALES DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON GEOMETRÍA ORIGINAL PARA FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO

NOTAS GENERALES:
1. LOS DISEÑOS DEBEN SER REALIZADOS EN UN SOLO PLANO Y EN UN ÚNICO SISTEMA DE COORDENADAS.
2. TODAS LAS DIMENSIONES SE ENTIENDEN EN MILÍMETROS A MENOS QUE SE INDIQUE OTRO VALOR.
3. LAS MEDIDAS DEBEN TOMARSE EN EL PUNTO DE LA INSTALACIÓN QUE SE INDICA EN EL DISEÑO.

FECHA:	29-08-2018
REGISTRO / DISEÑO:	
APROBADO:	
DIBUJO:	
NUMERO:	PIMI_1606-INF-01-PLA_03 1 de 1
ESCALA:	
INDICADAS:	
FORMATO:	A1
CODIGO DE PROYECTO:	PIMI 16-06
ARCHIVO CAD:	PIMI_1606-INF-01-PLA_03

COORDENADAS DE REFERENCIA	
Punto	Este
301	200.036 97.625
302	186.798 132.404
303	186.587 97.632

DATOS TÉCNICOS	
Numero de Escalones	92
Huella Todos los Escalones (cm)	5.0
Contrahuella Escalón Típico (cm)	5.0
Contrahuella primeros escalones	Detalle 2
Ancho de la Rápida (cm)	51.8
Pendiente Aproximación (%)	2.00
Pendiente Canal de Salida (%)	4.05

