

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

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

JOSÉ GUALBERTO LÓPEZ PEÑAFIEL

`jlopezp78@gmail.com`

KAREN JASMÍN SOTO MORALES

`soto38_karen@hotmail.com`

DIRECTORA: ING. XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE

`ximena.hidalgob@gmail.com`

Quito, Abril 2016

DECLARACIÓN

Nosotros, José Gualberto López Peñafiel y Karen Jasmín Soto Morales, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

José Gualberto López Peñafiel

Karen Jasmín Soto Morales

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Gualberto López Peñafiel y Karen Jasmín Soto Morales, bajo mi supervisión.

Ing. Ximena Hidalgo Bustamante
Directora del Proyecto

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres Zulmira y José por darme todo el apoyo necesario, por forjar mi camino y brindarme su cariño.

A mis hermanos Bra y Emy por todas las vivencias juntos, sin ustedes mi vida no sería la misma.

A mi abuelita Elena por siempre confiar y creer en mí.

A mis tutores Ingeniera Ximena y Doctor Marco por brindarme sus conocimientos.

A todos mis compañeros del CIERHI por el empeño y dedicación.

A mis amigos por todos esos momentos de alegría.

A Dios por llenar mi vida de bendiciones.

Finalmente a mi querida Escuela Politécnica Nacional.

DEDICATORIA

A Zulmira, Bryan y Emily son el mayor tesoro que tengo en mi vida.

Jose

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Ingeniera Ximena Hidalgo y al Doctor Marco Castro por su ayuda y contribución invaluable en la dirección de este trabajo.

A todo el equipo de investigación y trabajo del CIERHI por su colaboración.

DEDICATORIA

A mi familia: Luis, Yolanda y Ricky, por su amor y apoyo incondicional.

A mis abuelos Juan y Josefina, por dejar huellas imborrables en mi corazón.

Karen

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
RESUMEN	xxiv
ABSTRACT	xxv
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES Y UBICACIÓN DEL PROYECTO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	3
1.4 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS	3
1.4.1 TÚNEL SECCIÓN BAÚL	3
1.4.2 PRIMER CUENCO DISIPADOR	3
1.4.3 PRIMERA RÁPIDA ESCALONADA	4
1.4.4 SEGUNDO CUENCO DISIPADOR	4
1.4.5 SEGUNDA RÁPIDA ESCALONADA	5
2 BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO EN RÁPIDAS DE FONDO ESCALONADO	6
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 DEFINICIONES DE TIPO DE FLUJOS EN RÁPIDAS DE FONDO ESCALONADO	7
2.2.1 FLUJO RASANTE “SKIMMING FLOW”	7
2.2.2 INGRESO DE AIRE EN FLUJOS RASANTES	9
2.3 CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DE INICIO Y PERMANENCIA DEL FLUJO RASANTE	11
2.4 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO	12
2.4.1 ALTURA DEL ESCALÓN	12
2.4.2 PROFUNDIDAD DE FLUJO EN LA SECCIÓN FINAL	13
2.5 DISIPACIÓN DE ENERGÍA	15

2.5.1	ENERGÍA DE DISIPACIÓN PARA FLUJO SALTANTE “NAP-PE FLOW”	17
2.5.2	ENERGÍA DE DISIPACIÓN PARA FLUJO RASANTE “SKIMMING FLOW”	17
3	MODELACIÓN FÍSICA	21
3.1	CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS	21
3.1.1	MODELOS FÍSICOS	22
3.2	MAGNITUDES FÍSICAS, DIMENSIONES Y UNIDADES	22
3.2.1	HOMOGENEIDAD DIMENSIONAL	23
3.3	ANÁLISIS DIMENSIONAL	23
3.3.1	MÉTODO DE REPETICIÓN DE VARIABLES Y TEOREMA PI DE BUCKINGHAM	24
3.3.2	CRITERIOS DE SIMILITUD	25
3.4	SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA	31
3.4.1	SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA DE FROUDE	31
3.5	LIMITACIONES EN LA MODELACIÓN FÍSICA	33
3.5.1	RESTRICCIÓN EXTERNA	34
3.5.2	EFFECTO DE REYNOLDS	34
3.5.3	TENSIÓN SUPERFICIAL	35
3.6	SELECCIÓN DE LA ESCALA	36
3.7	EFFECTOS DE ESCALA	39
3.8	ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	39
3.8.1	ETAPA I: VALIDACIÓN Y/O CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO EN SU CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA ASÍ COMO EN LA SIMILITUD HIDRODINÁMICA	39
3.8.2	ETAPA II: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS CON EL DISEÑO ORIGINAL	40
3.8.3	ETAPA III: PROPUESTA DE RECOMENDACIONES TÉCNICAS QUE MEJOREN Y GARANTICEN LA EFICIENCIA HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS ACTUALMENTE CONSTRUIDAS	40
3.9	PLAN DE PRUEBAS	41
4	CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO	42
4.1	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO	42

4.1.1	ZONA DE INGRESO	43
4.1.2	MODELO FÍSICO, ESCALA 1:20	45
4.2	INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO FÍSICO	54
4.2.1	VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED DELGADA CON UN ÁNGULO CENTRAL DE 90°	55
4.2.2	LIMNÍMETRO	56
4.2.3	CINTA MÉTRICA	56
4.2.4	NIVEL Y ESTACIÓN TOTAL	57
4.2.5	PROBETA	57
4.2.6	EQUIPO DE FOTOGRAFÍA Y VIDEO	58
4.3	CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO	58
4.3.1	COMPROBACIÓN DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA	58
4.3.2	COMPROBACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FLUJO PA- RA LA SIMILITUD RESTRINGIDA	60
4.4	CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS TRIANGULARES	63
5	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL	71
5.1	PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPE- RIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL	71
5.2	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO	72
5.3	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ESTRUCTURA DE INGRESO A LA RÁPIDA ESCALONADA	86
5.3.1	DERIVACIÓN DE CAUDALES POR CELDA	86
5.4	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA	89
5.4.1	TIPOS DE FLUJO	89
5.4.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y FACTOR DE FRICCIÓN	91
5.4.3	PARÁMETROS HIDRÁULICOS	94
5.5	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL SISTEMA: ESTRUCTURA DE INGRESO - RÁPIDA ESCALONADA - ESTRUCTURA DE ENTRE- GA DEL FLUJO	96
5.5.1	CAUDAL MÁXIMO DE EFICIENTE OPERACIÓN	100
6	PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ORIGINAL	102
6.1	DISIPADORES DE ENERGÍA: IMPACTADORES	102
6.1.1	DISEÑO DE IMPACTADORES	103
6.2	CONSTRUCCIÓN DE LAS PROSPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN	107
6.2.1	PROPUESTA No. 1	108
6.2.2	PROPUESTA No. 2	108

6.2.3	PROPUESTA No. 3	109
6.3	PLAN DE PRUEBAS	110
6.4	RESULTADOS OBTENIDOS	111
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
7.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES REFERENTES A LA VALIDACIÓN Y/O CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO	115
7.2	CONCLUSIONES REFERENTES AL ANÁLISIS DE DISEÑO ORIGINAL .	116
7.3	RECOMENDACIONES REFERENTES AL ANÁLISIS DE DISEÑO ORIGINAL	119
7.4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES REFERENTES A LAS PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN EN EL DISEÑO ORIGINAL	120
	REFERENCIAS	123
	ANEXOS	126
1	CONSTRUCCIÓN MODELO FÍSICO	126
2	ESQUEMAS CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA	136
3	REGISTRO DE DATOS	139
4	CÁLCULOS	156
5	PLANOS	168

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	IMPLANTACIÓN Y UBICACIÓN DE LA RÁPIDA ESCALONADA	1
1.2	ESTRUCTURA DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA	4
1.3	RÁPIDA ESCALONADA Y ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN AL PIE	5
2.1	DIMENSIONES BÁSICAS EN UN VERTEDOR CON FONDO ESCALONADO	6
2.2	ESQUEMA DE FLUJO RASANTE EN UN VERTEDOR DE FONDO ESCALONADO	8
2.3	REGIONES DE FLUJO RASANTE EN UN VERTEDOR DE FONDO ESCALONADO, AMADOR (2005)	9
2.4	CLASIFICACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO, SIMOËS (2011)	12
2.5	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO	16
2.6	FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH EN FLUJO RASANTE SOBRE UN VERTEDERO ESCALONADO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE RUGOSIDAD RELATIVA DEL ESCALÓN (IZQUIERDA) Y SU FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD (DERECHA)	19
3.1	CONDICIÓN DE SIMILITUD EN MODELO PARA ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN MODELOS FROUDIANOS, INCLUYENDO EFECTOS DE VISCOSIDAD Y DE RUGOSIDAD	35
4.1	MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA	42
4.2	ESQUEMA DE LAS ZONAS DEL MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA	43
4.3	TANQUE DE ABASTECIMIENTO, ESTRUCTURA DE SOPORTE, TUBERÍA DE INGRESO, ACCESORIOS, PANTALLA UNIFORMIZADORA Y ACCESOS AL MODELO	45
4.4	VISTA TRIDIMENSIONAL DEL TRAMO DE APROXIMACIÓN	46
4.5	TRAMO DE APROXIMACIÓN CONSTRUIDO EN ACRÍLICO	46
4.6	(A) TRANSICIÓN CONSTRUIDA EN ACRÍLICO (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DE LA TRANSICIÓN	48

4.7	(A) PRIMER CUENCO DISIPADOR CONSTRUIDO EN ACRÍLICO. (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DEL PRIMER CUENCO DISIPADOR	49
4.8	CANAL DE CONEXIÓN CONSTRUIDO EN ACRÍLICO	49
4.9	(A) RÁPIDA ESCALONADA CONSTRUIDA EN ACRÍLICO. (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA	50
4.10	(A) CUENCO DISIPADOR FINAL DE LA PRIMERA RÁPIDA CONS- TRUIDO EN ACRÍLICO. (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DEL CUEN- CO DISIPADOR AL FINAL DE LA PRIMERA RÁPIDA	52
4.11	CANAL DE CONEXIÓN HACIA LA SEGUNDA RÁPIDA CONS- TRUIDO EN ACRÍLICO	53
4.12	CANAL DE DESCARGA, VERTEDEROS Y PANTALLA UNIFOR- MIZADORA	54
4.13	ESQUEMA DEL VERTEDERO TRIANGULAR CON SUS DIMEN- SIONES	55
4.14	VERTEDERO TRIANGULAR PARA EL AFORO DEL CAUDAL DE DESCARGA. (A) MARGEN IZQUIERDA. (B) MARGEN DERECHA	55
4.15	LIMNÍMETRO INSTALADO EN EL CANAL DE DESCARGA (A). LIMNÍMETRO INSTALADO EN EL TÚNEL DE APROXIMACIÓN (B)	56
4.16	CINTA DE MEDIDA COLOCADA AL FINAL DE LA TRANSICIÓN (A). CINTA DE MEDIDA COLOCADA EN EL INICIO DEL PERFIL PARABÓLICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA (B)	57
4.17	ESTACIÓN TOTAL MARCA TRIMBLE M3 DR 2 (A). NIVEL TO- POGRÁFICO MARCA WILD HEERBRUGG SWITZERLAND (B)	57
4.18	PROBETA DE PLÁSTICO	58
4.19	COEFICIENTE DE GASTO μ DE VERTEDEROS TRIANGULARES EN LA FÓRMULA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE	66
4.20	VALORES DE K EN LA FÓRMULA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLI- CA DE CHILE PARA VERTEDEROS TRIANGULARES	66
4.21	CURVA DE DESCARGA EXPERIMENTAL Y GRÁFICOS DE LAS ECUACIONES DE TENDENCIA OBTENIDAS CON LAS ECUA- CIONES DE HEGLY Y DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHI- LE PARA VERTEDEROS TRIANGULARES	67
4.22	AFORO VOLUMÉTRICO PARA EL VERTEDERO TRIANGULAR	68
4.23	CURVA DE DESCARGA EXPERIMENTAL Y ECUACIÓN DE TEN- DENCIA OBTENIDA DEL AFORO VOLUMÉTRICO PARA LOS VERTEDEROS TRIANGULARES INSTALADOS PARA AFORAR LAS DESCARGAS DEL MODELO CONSTRUIDO	68

4.24	COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE LAS CURVAS DE DESCARGA DE LA LITERATURA TÉCNICA Y LA EXPERIMENTAL PARA LOS VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED DELGADA Y ÁNGULO CENTRAL $\theta = 90^\circ$	69
5.1	PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA EN EL TRAMO CURVO (A) E INTERNA DESDE AGUAS ARRIBA EN EL TRAMO FINAL (B) DEL TÚNEL BAÚL. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$	72
5.2	PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1 Y DE INICIO DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$	72
5.3	PRUEBA 1. VISTA FRONTAL (A), LATERAL IZQUIERDA (B) Y POSTERIOR (C) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$	73
5.4	PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$	73
5.5	PRUEBA 2. VISTA INTERNA DESDE AGUAS ABAJO LUEGO DE TRAMO CURVO DE TÚNEL BAÚL (A). VISTA SUPERIOR DE TRANSICIÓN (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	74
5.6	PRUEBA 2. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	75
5.7	PRUEBA 2. VISTA FRONTAL (A) Y LATERAL DERECHA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	75
5.8	PRUEBA 2. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	76
5.9	PRUEBA 3. VISTA LATERAL DERECHA AGUAS ARRIBA (A) Y AGUAS ABAJO (B) DEL TRAMO CURVO DEL TÚNEL BAÚL. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	77
5.10	PRUEBA 3. VISTA LATERAL IZQUIERDA (A) Y DERECHA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	77
5.11	PRUEBA 3. VISTA SUPERIOR DESDE AGUAS ARRIBA (A) Y VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL TRAMO FINAL (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	78
5.12	PRUEBA 3. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DEL CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	78

5.13 PRUEBA 4. VISTA LATERAL IZQUIERDA ANTES (A) Y LUEGO (B) DEL TRAMO CURVO DEL TÚNEL BAÚL. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$	79
5.14 PRUEBA 4. VISTA LATERAL IZQUIERDA (A) Y DERECHA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$	80
5.15 PRUEBA 4. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$	80
5.16 PRUEBA 4. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$	81
5.17 PRUEBA 5. VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL TRAMO FINAL DEL TÚNEL BAÚL (A). VISTA SUPERIOR DE TRANSICIÓN (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	82
5.18 PRUEBA 5. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	82
5.19 PRUEBA 5. VISTA FRONTAL (A) Y LATERAL DERECHA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	83
5.20 PRUEBA 5. VISTA LATERAL DERECHA (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	83
5.21 PRUEBA 6. VISTA LATERAL DERECHA DE TÚNEL BAÚL (B). TRANSICIÓN VISTA DESDE AGUAS ARRIBA (A). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$	84
5.22 PRUEBA 6. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$	85
5.23 PRUEBA 6. VISTA FRONTAL (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$	85
5.24 PRUEBA 6. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 2 Y DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$	86
5.25 CAUDAL DISTRIBUIDO POR CELDA VS EL CAUDAL TOTAL	87
5.26 PORCENTAJE DE CAUDAL DISTRIBUIDO POR CELDA VS EL CAUDAL TOTAL	88
5.27 PRUEBA 2. VISTA SUPERIOR FINAL TÚNEL BAÚL – INICIO DIVISIÓN DE LA CONDUCCIÓN EN DOS CELDAS. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	88

5.28	UBICACIÓN DE LA RELACIÓN h/y_C LÍMITE PARA QUE PRESENTE FLUJO RASANTE CON BASE EN LA CLASIFICACIÓN SEGÚN SIMÕES (2011)	89
5.29	PRUEBA DETERMINACIÓN DE FLUJO RASANTE. (A) VISTA LATERAL DE UN ESCALÓN DE CELDA IZQUIERDA RÁPIDA ESCALONADA, $Q_{PROTOTIPO} = 9.87 \text{ m}^3/\text{S}$. (B) VISTA LATERAL DE UN ESCALÓN CELDA DERECHA RÁPIDA ESCALONADA, $Q_{PROTOTIPO} = 11.45 \text{ m}^3/\text{s}$	90
5.30	ESQUEMA DE LAS SECCIONES INICIAL Y FINAL DEL VOLUMEN DE CONTROL UTILIZADO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA ESCALONADA	92
5.31	COMPARACIÓN ENTRE EL FACTOR DE FRICCIÓN DE LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH EN FLUJO RASANTE ESTABLE SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA VS LA ALTURA DE RUGOSIDAD RELATIVA DEL ESCALÓN DETERMINADA EXPERIMENTALMENTE (IZQUIERDA) Y RECOMENDADA POR LA LITERATURA (DERECHA)	94
5.32	ESQUEMA DE LAS SECCIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE ENERGÍAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURA DE INGRESO - RÁPIDA ESCALONADA - ESTRUCTURA DE ENTREGA DEL FLUJO	97
5.33	UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA IZQUIERDA CON CAUDAL MEDIO. $Q_{CELDAIZQ.PROTOTIPO} = 21.27 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	98
5.34	UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA DERECHA CON CAUDAL MEDIO. $Q_{CELDADER.PROTOTIPO} = 25.35 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	98
5.35	UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA IZQUIERDA CON CAUDAL ALTO. $Q_{CELDAIZQ.PROTOTIPO} = 46.85 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	99
5.36	UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA DERECHA CON CAUDAL ALTO. $Q_{CELDADER.PROTOTIPO} = 54.94 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	99

5.37 PRUEBA DETERMINACIÓN DE CAUDAL MÁXIMO DE EFICIENTE OPERACIÓN. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL DERECHA DE CUENCO DISIPADOR 2 (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 41.80 \text{ m}^3/\text{s}$	101
6.1 (w/d) VS NÚMERO DE FROUDE PARA CUENCOS DE SALIDA CON IMPACTADORES	103
6.2 RELACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE UN IMPACTADOR EN UN CUENCO	104
6.3 DIMENSIONES DE IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA	105
6.4 UBICACIÓN DEL IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA	106
6.5 DIMENSIONES DE IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR	106
6.6 UBICACIÓN DEL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR	107
6.7 VISTA EN 3D DEL IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA	108
6.8 IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA FABRICADO EN ACRÍLICO Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA EN EL MODELO FÍSICO	108
6.9 VISTA EN 3D DEL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA	109
6.10 IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR FABRICADO EN ACRÍLICO Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA EN EL MODELO FÍSICO	109
6.11 IMPLEMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE CONTROL A TRAVÉS DE UNA CLAPETA EN EL MODELO FÍSICO. SECCIÓN DE CONTROL UBICADA EN CELDA DERECHA (A) E IZQUIERDA (B)	110
6.12 PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	111
6.13 PRUEBA 1. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL DE IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	111
6.14 PRUEBA 2. VISTA LATERAL DERECHA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	112

6.15	PRUEBA 2. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL DE IMPACTADOR EN FORMA DE "L" INVERTIDA (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$	112
7.1	VISTA LATERAL IZQUIERDA DE LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{CELDA IZQUIERDA} = 72.42 \text{ m}^3/\text{s}$	118
7.2	VISTA LATERAL DERECHA DEL CUENCO DISIPADOR 2 SIN MODIFICACIONES (A). VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL CUENCO DISIPADOR 2 SIN MODIFICACIONES (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	121
7.3	VISTA LATERAL DERECHA DEL CUENCO DISIPADOR 2 CON MODIFICACIONES (A). VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL CUENCO DISIPADOR 2 CON MODIFICACIONES (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$	121
7.4	PRUEBA 6. VISTA LATERAL IZQUIERDA CUENCO DISIPADOR Y CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$	122

ÍNDICE DE TABLAS

3.1	DIMENSIONES PRIMARIAS Y SUS UNIDADES SI PARA HIDRÁULICA	23
3.2	TIPOS DE MODELO FÍSICO SEGÚN SU FUERZA PREDOMINANTE	31
3.3	RELACIONES DE ESCALA SEGÚN SIMILITUD RESTRINGIDA DE FROUDE PARA AGUA	33
3.4	VALORES DE LAS MAGNITUDES EN PROTOTIPO Y EN MODELO EN FUNCIÓN DE DIFERENTE ESCALA DE LONGITUDES	37
3.5	EQUIVALENCIAS NUMÉRICAS PARA LA SIMILITUD DE FROUDE ESCALA 1:20	38
3.6	PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE A LA VALIDACIÓN DEL MODELO FÍSICO	41
4.1	DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL TRAMO REPRESENTATIVO DEL TÚNEL DE APROXIMACIÓN	47
4.2	DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA TRANSICIÓN	48
4.3	DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL PRIMER CUENCO DISIPADOR	49
4.4	DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL CANAL DE CONEXIÓN	50
4.5	DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA RÁPIDA ESCALONADA	51
4.6	DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL SEGUNDO CUENCO DISIPADOR (AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA)	52
4.7	DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL CANAL DE CONEXIÓN QUE CONDUCE EL FLUJO HACIA LA SEGUNDA RÁPIDA	53
4.8	COMPARACIÓN ENTRE LAS COORDENADAS DEL MODELO CONSTRUIDO Y LAS DEL PROTOTIPO	59
4.9	COMPARACIÓN ENTRE LAS COTAS DEL MODELO CONSTRUIDO Y LAS DEL PROTOTIPO	60
4.10	COMPARACIÓN Y DESVIACIÓN PORCENTUAL ENTRE LOS NÚMEROS DE FROUDE (Fr) EN PROTOTIPO Y EN MODELO	61
4.11	COMPARACIÓN ENTRE LOS NÚMEROS DE REYNOLDS (Re) MEDIDOS EN PROTOTIPO Y EN MODELO	61
4.12	COMPARACIÓN ENTRE LOS FACTORES DE FRICCIÓN (λ) DE PROTOTIPO Y MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA	62
4.13	COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE LOS NÚMEROS ADIMENSIONALES DE WEBER (We) EN PROTOTIPO Y EN MODELO	63
4.14	LÍMITES DE APLICACIÓN DE HEGLY	65

4.15	LÍMITES DE APLICACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE	65
4.16	DATOS OBTENIDOS DEL AFORO VOLUMÉTRICO DEL VERTEDERO TRIANGULAR	68
4.17	DATOS OBTENIDOS DEL AFORO VOLUMÉTRICO DEL VERTEDERO TRIANGULAR	70
5.1	PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL	71
5.2	CAUDALES TOTALES DE APROXIMACIÓN, CAUDALES DISTRIBUIDOS POR CADA CELDA Y PORCENTAJES CORRESPONDIENTES PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS	87
5.3	PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAUDAL LÍMITE PARA QUE SE ESTABLEZCA FLUJO RASANTE ESTABLE	90
5.4	TIPOS DE FLUJO SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA CONFORME AL PLAN DE PRUEBAS DE DISEÑO ORIGINAL	91
5.5	PORCENTAJES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA ESCALONADA EN CONDICIONES DE FLUJO RASANTE ESTABLE	92
5.6	FACTOR DE FRICCIÓN EN LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH EVALUADO PARA EL FLUJO RASANTE SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA MEDIDO EN MODELO FÍSICO	93
5.7	COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE CON AQUELLOS CALCULADOS DE ACUERDO A LAS ECUACIONES TEÓRICAS PROPUESTAS POR CHANSON, PARA LOS DATOS DEL PROTOTIPO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$	95
5.8	PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO DE EFICIENTE OPERACIÓN	101
6.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES GEOMÉTRICAS PROPUESTAS EN LAS ESTRUCTURAS AL PIE DE LA RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO	107
6.2	PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS MODIFICACIONES RECOMENDADAS	110

LISTA DE SÍMBOLOS

α_c	Coeficiente de Coriolis
$\Delta\rho$	Masa en modelo
Δ_s	Diferencia Longitud rápida escalonada
γ	Peso específico del fluido
λ	Factor de fricción
μ	Factor de contracción
ϕ	Parámetro adimensional
Π	Número pi
ρ	Densidad del fluido
σ	Tensión superficial
θ	Ángulo de inclinación de la rápida
ν	Viscosidad cinemática
ε_e	Rugosidad absoluta (contrahuella)
ε_m	Rugosidad absoluta (paredes)
ε_p	Rugosidad absoluta (huella)
a, b, c	Magnitudes geométricas de una estructura hidráulica
a_m	Aceleración en modelo
a_p	Aceleración en prototipo
b	Ancho de canal escalonado
C	Concentración media de aire
C_a	Velocidad media del flujo aire-agua
Cd	Coeficiente de descarga

D	Valor dependiente del ángulo de inclinación de la rápida
D_H	Díámetro hidráulico
d_i	Calado en el punto de inicio del ingreso de aire
E	Energía
e	Constante de Napier
e_a	Factor de escala de aceleración
e_F	Factor de escala de fuerza
e_L	Factor de escala de longitudes o factor de escala geométrica
e_m	Factor de escala de masa
e_T	Factor de escala de tiempo
e_V	Factor de escala de velocidad
F	Número de Froude en términos de la altura de rugosidad equivalente
f	Factor de fricción de flujo no aireado
f_e	Factor de fricción flujo aire-agua
Fr	Número de Froude
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de la rápida
h	Altura de grada (contrahuella)
H_{max}	Altura máxima de energía
H_o	Carga de energía al inicio de la rápida
H_{pared}	Altura de paredes de la rápida escalonada
H_{res}	Energía residual
h_v	Carga de velocidad
K	Valor adimensional para vertederos triangulares
k_s	Altura de rugosidad equivalente del escalón

L	Longitud característica del contorno del flujo
l	Longitud de grada (huella)
L_i	Distancia desde la cresta del vertedero al punto de inicio del ingreso de aire
l_m	Longitud en modelo
l_p	Longitud en prototipo
m_m	Masa en modelo
m_p	Masa en prototipo
Q	Caudal
q	Caudal unitario
Re	Número de Reynolds
t_m	Tiempo en modelo
t_p	Tiempo en prototipo
U	Velocidad media del flujo aire-agua
V_m	Velocidad en modelo
V_o	Velocidad del flujo
V_p	Velocidad en prototipo
w	Altura de la cresta del vertedero
We	Número de Weber
y	Calado flujo uniforme
Y_{90}	Calado correspondiente a una concentración de aire de 90 %
$y_{character}$	Calado característico del flujo aire-agua
y_c	Calado crítico
z	Carga de posición

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto de titulación es evaluar la disipación de energía en flujo rasante sobre una rápida de fondo escalonado diseñado e implementado por la EPMAPS en la prolongación del colector Ñaquito sobre la quebrada El Batán. El análisis realizado se presenta en modelo físico a escala 1:20 de una rápida escalonada y sus obras anexas.

El estudio experimental de flujo rasante fue llevado a cabo en un canal rectangular prismático de ancho $b=50\text{cm}$ y largo $L=6.40\text{m}$ con una pendiente de 45° . El canal está compuesto por 87 escalones de acrílico de 5cm de altura y longitud, así como paredes acrílicas para la visualización del flujo.

La primera etapa de investigación es la construcción y validación del modelo físico. En la segunda etapa se analiza el funcionamiento hidráulico de las estructuras con el diseño original y se recomienda modificaciones para optimizar el diseño. En la tercera etapa se analiza cualitativamente las modificaciones propuestas.

Los resultados obtenidos permiten identificar criterios de diseño y obtener curvas experimentales de fácil aplicación que definen las características geométricas de las rápidas escalonadas. Se concluye que para el rango de caudales $[11-150\text{ m}^3/\text{s}]$ probados en la rápida escalonada, se obtiene régimen de flujo rasante y la eficiencia de disipación de energía sobrepasa el 85 %, mientras que el caudal máximo de eficiente operación de todo el sistema (estructura de ingreso-rápida escalonada-estructura de entrega del flujo) es de $42\text{m}^3/\text{s}$; cerca del 30 % aproximadamente del caudal de diseño.

Con las modificaciones recomendadas el funcionamiento de la estructura alcanza un caudal seguro y de eficiente operación hidráulica del sistema de $100\text{m}^3/\text{s}$; es decir se incrementa la eficiencia de la estructura en un 40 %.

ABSTRACT

The aim of this project is to evaluate the dissipation of energy in skimming flow on stepped spillways. It is designed and implemented by EPMAPS in the extension of Ñaquito collector on the Batán ravine. The analysis is presented making a physical model on a scale of 1:20 of one stepped and its related works.

The experimental research of skimming flow was developed in a prismatic rectangular channel of width $b = 50\text{cm}$ and length $L = 6.40\text{ m}$ with a slope of 45° . The channel has 87 acrylic steps height and length 5cm also acrylic sidewalls for flow visualization.

The first stage of the research is the construction and ratification of the physical model. In the second stage, the hydraulic operation of the original design is analyzed, and it is suggested some changes in order to optimize the design. In the third stage, the proposed changes are analyzed qualitatively.

The obtained results made possible identify designing criteria and obtain experimental curves of easy application that define the geometric characteristics of the stepped spillways. It is concluded that skimming flow regimens were obtained during the tests for the discharge range $[11-150\text{ m}^3/\text{s}]$. The efficiency of dissipation of energy exceeds 85% for the discharge range tested, while the maximum efficient operation discharge of the entire system (entrance structure-stepped spillway-structure outflow) is $42\text{ m}^3/\text{s}$; about 30% of the design discharge.

With the suggested modifications the operation of the structure reaches a safe discharge and an efficient operation of $100\text{ m}^3/\text{s}$; thus, the efficiency of the structure was increased by 40% .

CAPÍTULO 1

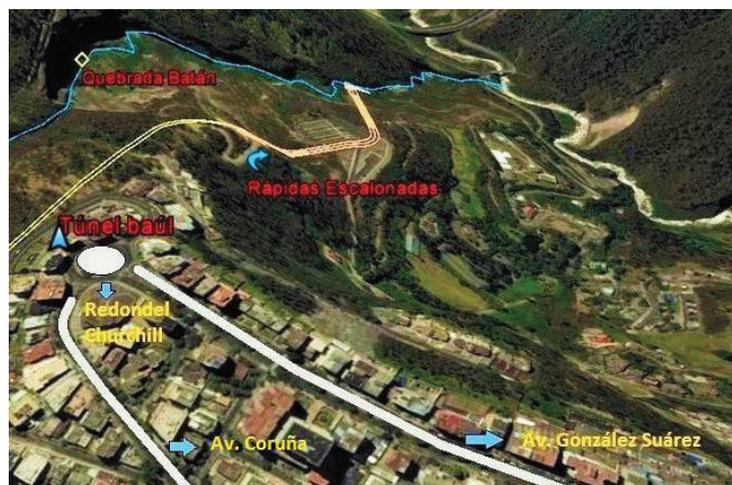
INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y UBICACIÓN DEL PROYECTO

La prolongación del Colector Ñaquito desde la Plaza Argentina hasta el Río Machángara fue construida por La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EP-MAPS) con un caudal de diseño de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, concluida en el año 2009 con fines del control de escorrentía. El objetivo de este proyecto es el desvío de la descarga del colector central de Ñaquito hacia la quebrada El Batán, con el objeto de minimizar los efectos nocivos de un caudal permanente en la cascada existente, ubicada a unos 300 metros aguas abajo del viaducto Aurelio Dávila.

Las obras construidas de acuerdo a los diseños del Proyecto antes mencionado son: (i) túnel, sección baúl de $5.0 \times 5.0 \text{ m}$ y 590 m de longitud; (ii) dos rápidas escalonadas de 100 m de altura aproximadamente cada una de ellas, con sus respectivas estructuras de disipación al pie; y (iii) la obra de descarga y restitución del agua a la Quebrada El Batán, en una sección a 400 metros antes de su confluencia en el Río Machángara. La implantación esquemática de estas estructuras se muestra en la Figura 1.1, sobre la fotografía Google.

FIGURA 1.1: IMPLANTACIÓN Y UBICACIÓN DE LA RÁPIDA ESCALONADA



FUENTE: Google earth

Una vez puesto en operación este sistema de estructuras hidráulicas, se observó que la rápida escalonada No. 1 y la estructura de disipación al pie de la misma, para caudales superiores a los $85 \text{ m}^3/\text{s}$, presentan un comportamiento del flujo diferente al esperado que se desarrolla de una forma inestable e ineficiente; siendo el caudal de diseño $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

El presente proyecto de titulación forma parte del proyecto suscrito por la EPN TECH EP, a través del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional titulado "CONTRATACIÓN DEL SERVICIO ESPECIALIZADO CENTRAL DE IÑAQUITO EN LA QUEBRADA EL BATÁN, COLECTOR, ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA, RÁPIDA LISA, VERTEDERO DE EXCESOS Y DISIPADOR DE ENERGÍA DE LA DESCARGA DEL COLECTOR". Dicho proyecto de investigación pretende representar la configuración geométrica y la similitud dinámica, que garantice el análisis y la evaluación del comportamiento de flujo, de su interacción con las estructuras hidráulicas y la definición de las posibles modificaciones y mejoras al diseño construido. ¹

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar experimentalmente la presencia del flujo rasante y la eficiencia de disipación de energía en una rápida escalonada con la ayuda de un modelo físico a escala.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el comportamiento hidrodinámico del flujo y el grado de disipación de energía en la rápida escalonada mediante ensayos experimentales.
- Evaluar la energía residual al pie de la rápida con fondo escalonado mediante ensayos en el modelo físico.
- Evaluar la comparación entre los resultados experimentales y los teóricos, identificando cuáles parámetros adimensionales son los que intervienen y los relevantes en el

¹CIERHI-EPN (2015). "Términos de Referencia". Quito

análisis de los problemas de funcionamiento y comportamiento del flujo rasante en las estructuras.

- Proponer criterios de diseño para garantizar la presencia del flujo rasante y para optimizar el funcionamiento hidráulico con respecto a la disipación de energía.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El análisis y evaluación del flujo sobre una rápida de fondo escalonado y su eficiencia respecto a la disipación de energía deben fundamentarse en resultados experimentales de un modelo físico, donde se pueda observar y medir el funcionamiento de las estructuras para un rango de caudales, hasta llegar a un valor máximo experimental de caudal para el cual el sistema muestre una eficiencia adecuada y aceptable respecto al comportamiento del flujo y de la disipación de energía.

1.4 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

1.4.1 TÚNEL SECCIÓN BAÚL

El túnel de sección baúl de dimensiones 5.0 x 5.0 m y 590 m de longitud, presenta dos curvas horizontales: la primera está localizada 268 m aguas abajo del inicio del mismo, es una curva compuesta por un radio de 500 m con 64 m de longitud. La segunda curva horizontal se localiza 17 m aguas arriba del final del túnel, compuesta por un radio de 100 m y 58 m de longitud.

1.4.2 PRIMER CUENCO DISIPADOR

A la salida del túnel, se presenta un cuenco disipador a fin de que el flujo de entrada disipe parte de su energía y se aproxime de una manera uniforme hacia la primera rápida, este inicia con una transición divergente de 9.58 m de longitud, en perfil, se desarrolla una curva parabólica definida por la ecuación $Y = -0,01X - 0,03X^2$, de tal manera que se impide que la lámina de agua se desprege durante la circulación con los caudales máximos.

Esta transición da lugar a dos celdas simétricas separadas por una pared central, de sección rectangular con 5 m de ancho cada una y al comienzo del cuenco propiamente dicho con 20 m de longitud. Se dispone de una grada de subida al final con inclinación de 45°, los muros laterales son de 6.87 m. En la siguiente figura 1.2 se presentan las estructuras mencionadas.

FIGURA 1.2: ESTRUCTURA DE APROXIMACIÓN HACIA LA RÁPIDA ESCALONADA



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

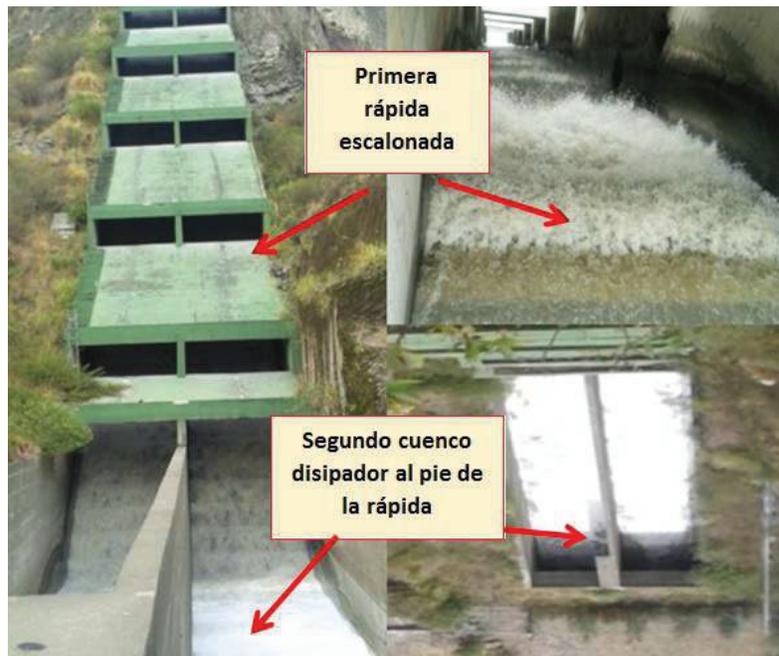
1.4.3 PRIMERA RÁPIDA ESCALONADA

Luego del primer cuenco disipador se presenta un canal que dirige el flujo hacia la primera rápida escalonada con 4.18m de longitud. Esta rápida inicia con una curva parabólica, cuya ecuación es: $Y = -0,003X - 0,102030X^2$, la misma que se acopla al perfil de los escalones, que forma una pendiente de 45°; un desnivel total de 92.97m, altura de paredes de 4m, ancho de cada celda de 5m y el dimensionamiento de los escalones con altura (contrahuella) y longitud (huella) de la grada de 1m.

1.4.4 SEGUNDO CUENCO DISIPADOR

El perfil del cuenco se inicia con una curva circular de 10m de radio al pie de la primera rápida. Al final del cuenco se dispone una grada de subida, con inclinación de 45°. El ancho del cuenco es igual al de la celda de la rápida 5m y la longitud total es de 25m con altura de paredes de 8m.

FIGURA 1.3: RÁPIDA ESCALONADA Y ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN AL PIE



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

1.4.5 SEGUNDA RÁPIDA ESCALONADA

Luego del segundo cuenco disipador se presenta un canal que dirige el flujo hacia la segunda rápida escalonada con 117.84m de longitud. Esta segunda rápida tiene el mismo dimensionamiento que la primera con la diferencia que el desnivel total es de 104.87m. El cuenco disipador al pie es idéntico al del cuenco diseñado para la primera rápida debido a sus similares condiciones y a que el desnivel a vencer también es similar. ²

²EPMAPS (2005). "Diseños definitivos para el control de la escorrentía con la prolongación del colector Iñaquito desde la plaza argentina hasta el río Machángara". Quito

CAPÍTULO 2

BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO EN RÁPIDAS DE FONDO ESCALONADO

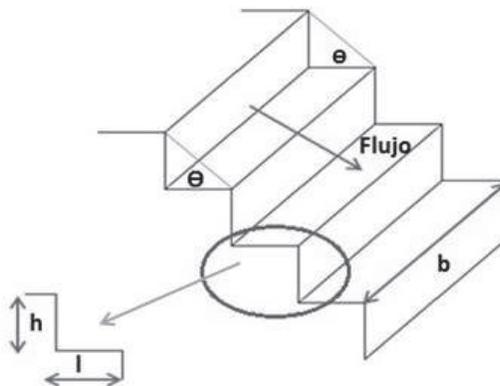
2.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de rápidas de fondo escalonado en el campo de la ingeniería ha aumentado debido al bajo costo y facilidad que representa su construcción mediante la técnica de concreto compactado con rodillo y sobre todo por el alto grado de disipación de energía generada ¹.

Al presentar el flujo sobre estas estructuras, características complejas que incluyen: turbulencia, auto aireación o “aguas blancas”, entre otros aspectos y presentando a la vez beneficios como: prevención del riesgo por cavitación y reducción del tamaño de las estructuras de disipación al pie de las mismas; ha sido tomado en cuenta como un tema de interés en el campo de la investigación.

Una rápida de fondo escalonado es un canal artificial inclinado formado por escalones, como se muestra en la figura 2.1.

FIGURA 2.1: DIMENSIONES BÁSICAS EN UN VERTEDOR CON FONDO ESCALONADO



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

¹González C. & Chanson H. (2007). “Diseño hidráulico de vertedores escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental”. México

Donde:

h : Altura de grada (contrahuella). [m]

l : Longitud de grada (huella). [m]

b : Ancho de canal escalonado. [m]

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [$^{\circ}$]

2.2 DEFINICIONES DE TIPO DE FLUJOS EN RÁPIDAS DE FONDO ESCALONADO

El comportamiento del flujo sobre rápidas escalonadas puede ser clasificado en tres tipos:

- Flujo saltante “nappe flow”
- Flujo transitorio
- Flujo rasante o “skimming flow”

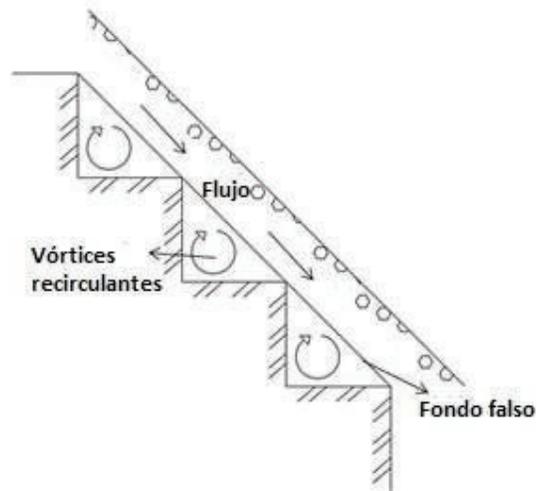
La presente investigación como proyecto de titulación gira en torno a la evaluación del desarrollo y disipación de energía en condiciones de flujo rasante, por tanto el análisis será dirigido exclusivamente a este tipo de flujo.

2.2.1 FLUJO RASANTE “SKIMMING FLOW”

El flujo rasante se presenta en canales de fondo escalonado cuando operan con caudales altos, el cual resbala en forma rasante a lo largo de un fondo falso que se forma por la superficie de la unión de los vértices de los escalones, debajo de la corriente principal del flujo formado en el espacio entre los vértices de los escalones se observan vórtices de flujo recirculante y de eje horizontal como se muestra en la figura 2.2.

Los vórtices se mantienen debido a la transmisión de esfuerzo cortante con la corriente principal de flujo, este movimiento vorticoso forma una barrera o superficie inferior límite del flujo de la mezcla homogénea de agua y aire que contribuyen de manera importante en la disipación de energía.

FIGURA 2.2: ESQUEMA DE FLUJO RASANTE EN UN VERTEDOR DE FONDO ESCALONADO



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Chanson (1997), propuso tres subdivisiones para el flujo rasante tomando en cuenta las características de formación de vórtices debajo del flujo principal que son: SK1, SK2, SK3. Las subdivisiones de flujo rasante SK1 y SK2 corresponden a pendientes moderadas ($5^\circ < \theta < 22^\circ$).

La presente rápida escalonada en estudio tiene una pendiente fuerte ($\theta = 45^\circ$), entonces le corresponde un tipo de flujo SK3.

Flujo rasante SK3

El flujo rasante SK3 se da en pendientes fuertes con un ángulo de inclinación del canal escalonado mayor a 22° en donde el flujo principal escurre de forma paralela al fondo falso, independiente a la geometría del escalón, es decir las líneas de corriente son aproximadamente paralelas al fondo falso, por lo tanto la distribución de presiones es "cuasi"-hidrostática.

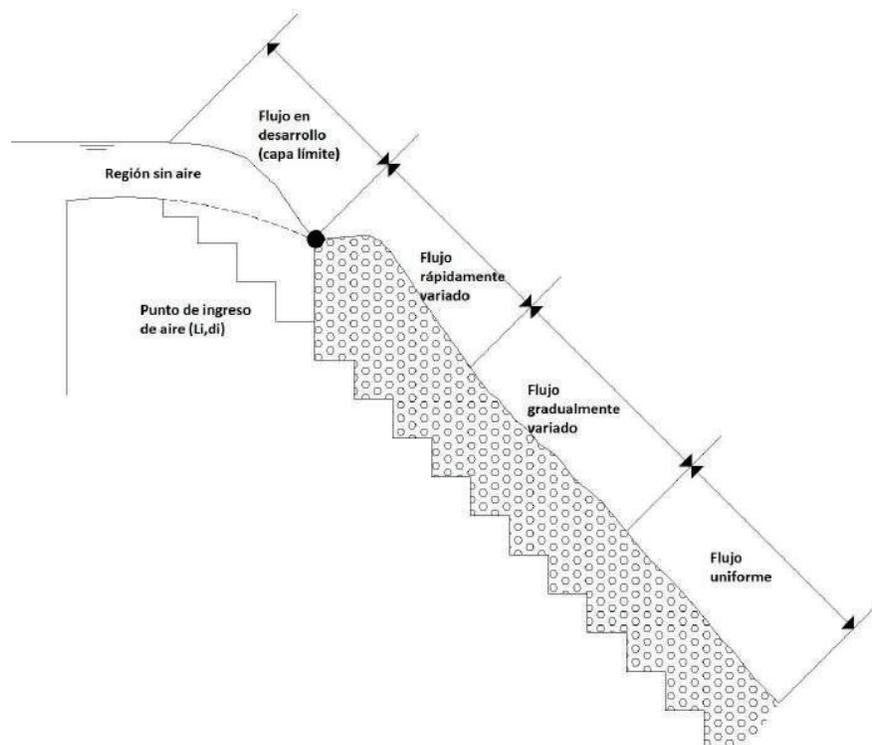
La diferencia de este tipo de flujo con respecto a los flujos SK1 y SK2, es que los vórtices recirculantes presentan un tamaño "cuasi" - estables a lo largo del canal de fondo escalonado.

2.2.2 INGRESO DE AIRE EN FLUJOS RASANTES

El flujo rasante es similar al flujo en rápidas de fondo liso, aguas arriba el flujo es transparente; sin embargo, en la cresta de la rápida escalonada se desarrolla una capa límite turbulenta principalmente por la rugosidad del escalón que cuando alcanza la superficie libre se produce una inestabilidad en la que se inicia el ingreso de aire en el flujo y el proceso de auto - aireación. A este punto se le conoce como el punto de inicio de ingreso de aire.

En las proximidades del punto de inicio de ingreso de aire, distintas regiones pueden ser identificadas a lo largo de la rápida de fondo escalonado como son: flujo rápidamente variado, flujo gradualmente variado y flujo uniforme como se muestra en la figura 2.3.

FIGURA 2.3: REGIONES DE FLUJO RASANTE EN IN VERTEDOR DE FONDO ESCALONADO, AMADOR (2005)



ELABORADO POR: José López Peaafiel, Karen Soto Morales

En la región de flujo rápidamente variado, grandes cantidades de aire son capturadas cerca de la superficie libre del flujo que queda disgregado en forma de burbujas que son transportadas dentro del fluido, la energía cinética turbulenta es capaz de vencer la tensión

superficial y la fuerza de flotación de las burbujas (efectos de la gravedad); introduciendo este aire capturado al flujo e iniciando la auto-aireación.

Luego de pasar esta región, el flujo es completamente desarrollado y presenta una región de flujo gradualmente variado donde ocurre una rápida auto-aireación hasta alcanzar una región de flujo uniforme en la cual las características del flujo permanecen “cuasi” constantes.

El mejor ajuste de datos para localizar el punto de inicio de la auto-aireación es el siguiente [Chanson, 2002]:

$$L_i = k_s * 9,719 * \text{sen}(\theta)^{0,0796} * F^{0,713} \quad (2.1)$$

$$d_i = k_s * \frac{0,4034}{\text{sen}(\theta)^{0,04}} * F^{0,592} \quad (2.2)$$

$$F = \frac{q}{\sqrt{g * \text{sen}\theta * k_s^3}} \quad (2.3)$$

$$k_s = h * \cos\theta \quad (2.4)$$

Donde:

L_i : Distancia desde la cresta del vertedero al punto de inicio del ingreso de aire. [m]

d_i : Calado en el punto de inicio del ingreso de aire. [m]

k_s : Altura de rugosidad equivalente del escalón. [m]

θ : Ángulo de inclinación de fondo falso. [°]

F : Número de Froude en términos de la altura de rugosidad equivalente.

q : Caudal unitario. [m³/s/m]

g : Aceleración de la gravedad. [m/s²]

h : Altura de la grada (contrahuella). [m]

2.3 CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DE INICIO Y PERMANENCIA DEL FLUJO RASANTE

La condición de inicio de flujo rasante se determina cuando desaparece la cavidad entre las esquinas de los escalones y la lámina vertiente de la mezcla es “cuasi homogénea” de agua y de aire. Resultados de varios estudios experimentales en modelo y prototipo indican que para valores inferiores de la relación h/y_c , según las expresiones de las curvas 1 y 2 que dependen de h/l , el flujo rasante permanece sobre el fondo falso del vertedero escalonado, estos resultados son válidos para ángulos de inclinación entre $5.7^\circ - 55^\circ$ y para una relación de las dimensiones del escalón h/l entre $0.2 - 1.25$.

En el caso del presente estudio de investigación la geometría de la rápida escalonada bajo análisis está dentro del rango tanto para el ángulo de inclinación (45°), como para la relación h/l (1).

Varios investigadores realizaron estudios teóricos y experimentales, presentando criterios para identificar el flujo rasante y el flujo saltante en una rápida de fondo escalonado. Simoës (2011) representa de una manera global todas las propuestas de la literatura técnica que pueden ser agrupadas alrededor de dos curvas principales que dividen a la figura 2.4 en cuatro áreas principales.

$$\text{Curva 1 : } \frac{h}{y_c} = 2 * \frac{h}{l} \quad (2.5)$$

$$\text{Curva 2 : } \frac{h}{y_c} = 0,233 * \frac{h}{l} + 1 \quad (2.6)$$

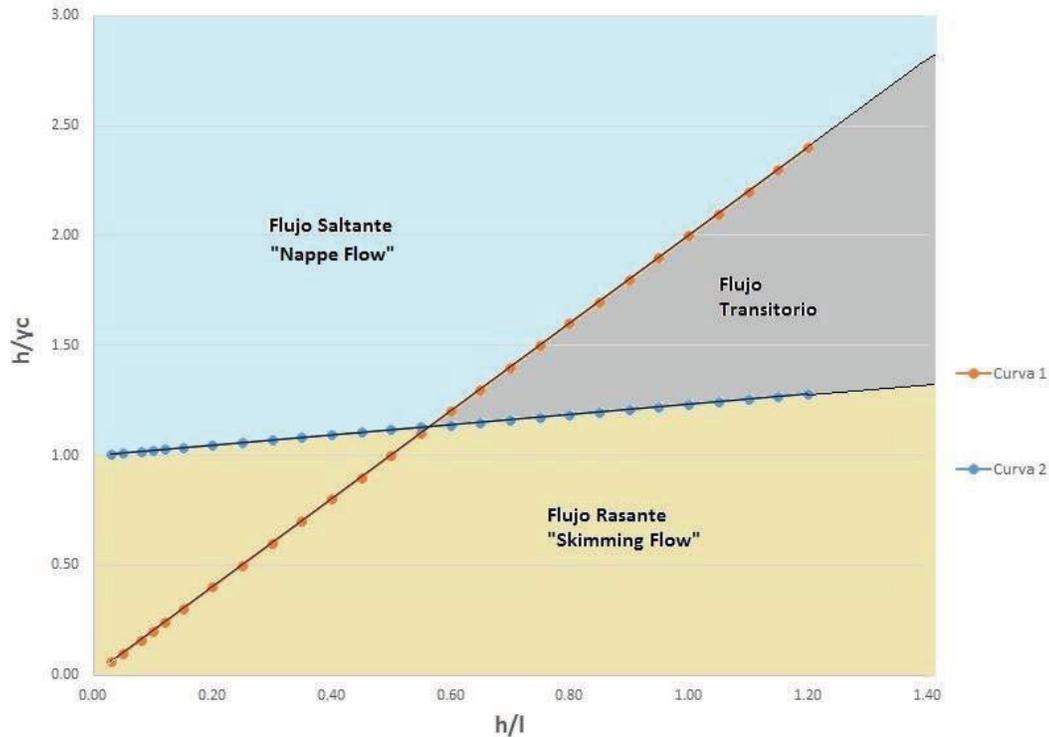
Donde:

y_c : Calado crítico. [m]

h : Altura de grada (contrahuella). [m]

l : Longitud de grada (huella). [m]

FIGURA 2.4: CLASIFICACIÓN DEL FLUJO EN UNA RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO, SIMOËS (2011)



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

2.4 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

2.4.1 ALTURA DEL ESCALÓN

El primero paso es calcular el calado crítico del flujo sobre la cresta para el caudal de diseño de la rápida de fondo escalonado.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2.7)$$

Donde:

y_c : Calado crítico. [m]

q : Caudal unitario. [$m^3/s/m$]

g : Aceleración de la gravedad. [m/s^2]

Posteriormente se escoge la altura del escalón; [Chanson,2002] propone que la relación y_c/h supere el valor mostrado en la ecuación (2.8) para que el canal de fondo escalonado

funcione en condiciones de flujo rasante.

$$\frac{y_c}{h} > 1,2 - 0,35 + \tan\theta \quad (2.8)$$

Donde:

y_c : Calado crítico. [m]

h : Altura de grada (contrahuella). [m]

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [°]

Luego de adoptar la geometría de los escalones, se debe localizar el punto de ingreso de aire (L_i, d_i); con las ecuaciones que se mostró en la sección 2.2.2. La aireación debe ocurrir en la primera mitad de la rápida para garantizar condiciones de equilibrio al pie.

2.4.2 PROFUNDIDAD DE FLUJO EN LA SECCIÓN FINAL

Si la rápida es lo suficientemente larga para que alcance condiciones de equilibrio, el calado característico equivalente al flujo sin aire se lo calcula con la ecuación 2.9.

$$y_{caract} = y_c * \sqrt[3]{\frac{f_e}{8 * \sen\theta}} \quad (2.9)$$

Donde:

y_{caract} : Calado característico del flujo aire-agua. [m]

y_c : Calado crítico. [m]

f_e : Factor de fricción flujo aire-agua. [m]

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [°]

El valor experimental del factor de fricción de Darcy correspondiente al flujo aire-agua (f_e), es inversamente proporcional a la concentración media de aire (C). Para una propuesta preliminar de diseño se puede adoptar un valor del factor de fricción sugerido en la literatura técnica como se muestra en la figura 2.6 o de las ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$\frac{f_e}{f} = 0,5 * [1 + \tanh(2,5 * \frac{0,5 - C}{C * (1 - C)})] \quad (2.10)$$

$$C = D - 0,3 * e^{(-5 \frac{h^2}{y_c^2} - 4 \frac{h}{y_c})} \quad (2.11)$$

Donde:

f_e : Factor de fricción flujo aire-agua.

f : Factor de fricción de flujo no aireado (De la ecuación de Colebrook-White).

C : Concentración media de aire.

D : Valor dependiente del ángulo de inclinación de la rápida.

e : Constante de Napier.

h : Altura de grada (contrahuella). [m]

y_c : Calado crítico. [m]

El valor de D varía según el ángulo de inclinación de la rápida. Entre $5^\circ < \theta < 19^\circ$ el valor de D es 0.3 y para ángulos $\theta > 19^\circ$ el valor de D se calcula con la siguiente ecuación:

$$D = -0,00024\theta^2 + 0,0214\theta - 0,0357 \quad (2.12)$$

Donde:

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [°]

Una vez obtenido el tirante característico del flujo se puede obtener el calado del flujo aire-agua (Y_{90}) que corresponde a una concentración de aire del 90 % así como la velocidad media del flujo como se muestra en las ecuaciones 2.13 y 2.14.

$$y_{caract} = \int_0^{Y_{90}} (1 - C_a) dy = (1 - C) * Y_{90} \quad (2.13)$$

$$U = \frac{q}{y_{caract}} \quad (2.14)$$

Donde:

y_{caract} : Calado característico del flujo aire-agua. [m]

C_a : Concentración de aire.

C : Concentración media de aire.

Y_{90} : Calado correspondiente a una concentración de aire del 90 %. [m]

U : Velocidad media del flujo aire-agua. [m/s]

q : Caudal unitario. [$m^3/s/m$]

Finalmente se puede calcular la altura de las paredes de la rápida de fondo escalonado que considera un bordo libre, como se muestra en la ecuación 2.15.

$$H_{pared} = 1,4 * Y_{90} \quad (2.15)$$

Donde:

H_{pared} : Altura de paredes de la rápida escalonada. [m]

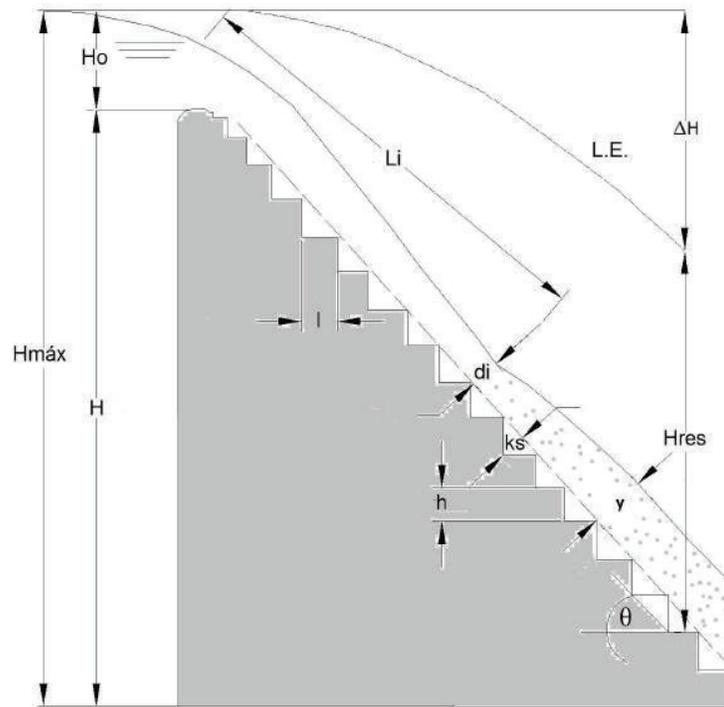
Y_{90} : Calado correspondiente a una concentración de aire de 90 %. [m]

2.5 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

La función principal de una rápida de fondo escalonado es disipar la energía, siendo mayor al compararla con una rápida de fondo liso. El aumento de la eficiencia en la disipación de energía se debe a la altura de rugosidad equivalente del escalón (k_s), el caudal específico (q) y la altura de la rápida (H).

Además de la disipación de energía, es importante conocer la energía residual al pie de la rápida, para diseñar el cuenco disipador aguas abajo. En la figura 2.5 se detalla los parámetros geométricos para el cálculo de la disipación de energía en una rápida de fondo escalonado.

FIGURA 2.5: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

$$H_{max} = H + H_o \quad (2.16)$$

$$H_o = y + \frac{V^2}{2g} \quad (2.17)$$

$$\Delta H = H_{max} - H_{res} \quad (2.18)$$

Donde:

H_{max} : Altura máxima de energía. [m]

H : Altura de la rápida. [m]

H_o : Carga de energía al inicio de la rápida. [m]

H_{res} : Energía residual. [m]

ΔH : Pérdida de energía. [m]

h : Altura de grada (contrahuella). [m]

l : Longitud de grada (huella). [m]

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [°]

L_i : Distancia desde la cresta del vertedero al punto de inicio del ingreso de aire. [m]

d_i : Calado en el punto de inicio del ingreso de aire. [m]

k_s : Altura de rugosidad equivalente del escalón. [m]

y : Calado flujo uniforme. [m]

2.5.1 ENERGÍA DE DISIPACIÓN PARA FLUJO SALTANTE “NAPPE FLOW”

En flujos escalonados, la disipación de energía ocurre por la ruptura y mezcla del flujo, además por la formación de saltos hidráulicos en cada longitud del escalón (huella). Chanson (1994a) define el rango de disipación de energía como:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{0,54 * (y_c/h)^{0,275} + 1,715 * (y_c/h)^{-0,55}}{\frac{H_{max}}{y_c}} \quad (2.19)$$

Donde:

ΔH : Pérdida de energía. [m]

H_{max} : Altura máxima de energía. [m]

h : Altura de grada (contrahuella). [m]

y_c : Calado crítico. [m]

2.5.2 ENERGÍA DE DISIPACIÓN PARA FLUJO RASANTE “SKIMMING FLOW”

En flujo rasante los escalones a lo largo de la rápida actúan como rugosidad. La mayor parte de energía disipada se debe a la formación de vórtices por debajo del fondo falso de la rápida escalonada.

La carga de energía residual es vinculada directamente al factor de fricción, Chanson (1994a) define el rango de disipación de energía como:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8 * \text{sen}\theta}\right)^{1/3} + \frac{\alpha_c}{2} * \left(\frac{f_e}{8 * \text{sen}\theta}\right)^{-2/3}}{\frac{H_{max}}{y_c}} \quad (2.20)$$

Donde:

ΔH : Pérdida de energía. [m]

H_{max} : Altura máxima de energía. [m]

f_e : Factor de fricción flujo aire-agua.

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [°]

α_c : Coeficiente de Coriolis ($1,1 < \alpha < 1,16$).

y_c : Calado crítico. [m]

Factor de fricción

La función de resistencia de Darcy–Weisbach ha sido adoptada en varias investigaciones de vertederos escalonados. El primer caso se da en base a argumentos físicos mediante el análisis dimensional y los conocimientos empíricos acerca del cambio de energía a través de flujo, el segundo caso es la combinación de información experimental con principios teóricos mediante el principio de la conservación del momento junto con la información experimental, el resultado es similar siguiendo ambos casos.

A diferencia de tuberías circulares el factor de resistencia al flujo en canales de fondo escalonado no toma en cuenta únicamente la rugosidad relativa y el número de Reynolds, es expresado en función de más parámetros adimensionales.

$$f_e = \Phi_1(Re, Fr, \theta, \frac{k_s}{L_c}, \frac{\varepsilon_p}{L_c}, \frac{\varepsilon_e}{L_c}, \frac{\varepsilon_m}{L_c}, \frac{h}{L_c}, \frac{l}{L_c}, \frac{L_c}{b}, C) \quad (2.21)$$

Donde:

f_e : Factor de fricción flujo aire-agua.

ϕ : Parámetro adimensional.

Re : Número de Reynolds, que expresa el efecto de la viscosidad.

Fr : Número de Froude, que expresa el efecto de la gravedad.

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [°]

k_s : Altura de rugosidad equivalente. [m]

L : Longitud característica del contorno del flujo. [m]

ε_p : Rugosidad absoluta (huella). [mm]

ε_e : Rugosidad absoluta (contrahuella). [mm]

ε_m : Rugosidad absoluta (paredes). [mm]

h : Altura de grada (contrahuella). [m]

l : Longitud de grada (huella). [m]

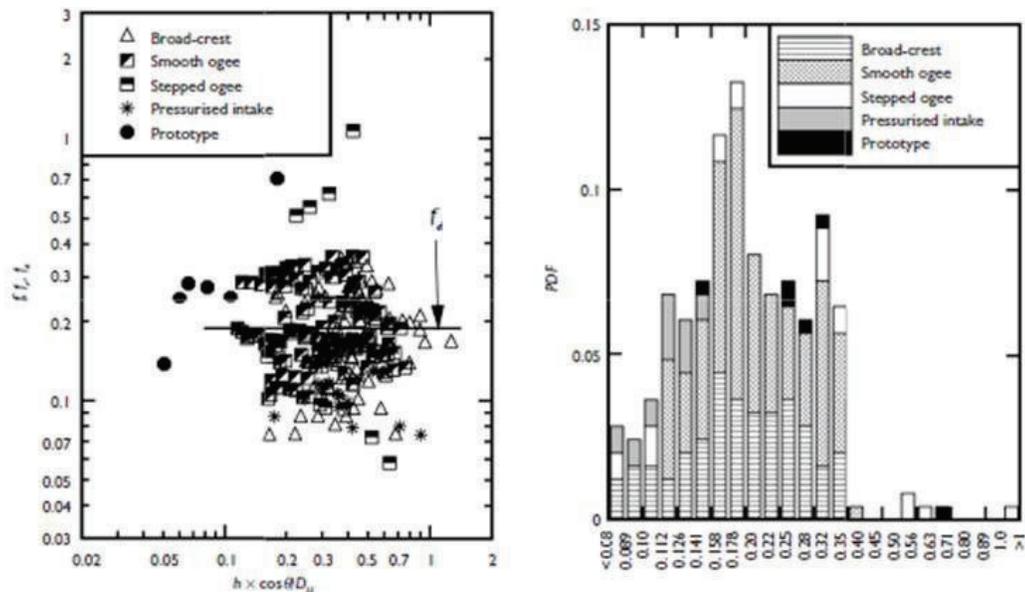
b : Ancho de canal escalonado. [m]

C : Concentración media de aire.

Muchas ecuaciones para el factor de fricción f han sido desarrolladas en las últimas décadas para canales de fondo escalonado, esto se debe a la dificultad práctica en las mediciones

de la posición exacta de la superficie libre y las regiones del flujo en la rápida de fondo escalonado, el rango existente en la literatura es de de 0.06 a 1.1.

FIGURA 2.6: FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH EN FLUJO RASANTE SOBRE UN VER-
TEDERO ESCALONADO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE RUGOSIDAD RELATIVA DEL ESCALÓN
(IZQUIERDA) Y SU FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD (DERECHA)



Description	Broad-crest	Smooth ogee	Ogee with steps	Pressurised intake	Prototype
Nb samples	86	121	19	17	6
Mean value	0.17	0.18	0.30	0.10	0.32
Range	0.07–0.35	0.10–0.36	0.06–1.1	0.07–0.13	0.14–0.70

FUENTE: Chanson, H., Bung D. and Matos, J. "Stepped spillways and cascades". The University of Queensland. Pag. 53

Esta gráfica hace un análisis entre datos de laboratorio ($\theta > 10^\circ$, $h > 0,02m$, $Re > 1 \times 10^5$) y prototipo, en donde se observa una distribución de factores de fricción en flujo rasante alrededor de tres valores dominantes: 0.11, 0.17 y 0.30.²

Para datos experimentales Chanson (1993), deduce al factor de fricción en dos casos, cuando el flujo es uniforme y cuando el flujo es gradualmente variado al pie de la rápida.

- Si las condiciones de flujo uniforme permanecen constantes a lo largo de la pendiente del canal el factor de fricción se lo puede deducir de la ecuación del momento.

²Chanson, H., Bung D. and Matos, J. "Stepped spillways and cascades". The Netherlands. Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, IST. The University of Queensland

$$f_e = \frac{8 * g * \text{sen}\theta * y_{\text{caract}}^2}{q^2} * \frac{D_H}{4} \quad (2.22)$$

- Para flujos gradualmente variados, el factor de fricción puede ser deducido de la ecuación de la energía.

$$f_e = \frac{8 * g * y_{\text{caract}}^2}{q^2} * \frac{D_H}{4} * \frac{\Delta_H}{\Delta_s} \quad (2.23)$$

Donde:

f_e : Factor de fricción flujo aire-agua.

g : Aceleración de la gravedad. [m/s^2]

y_{caract} : Calado característico del flujo aire-agua. [m]

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [$^\circ$]

q : Caudal unitario. [$m^3/s/m$]

D_H : Diámetro hidráulico. [m]

Δ_H : Pérdida de energía. [m]

Δ_s : Diferencia longitud rápida escalonada. [m]

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN FÍSICA

La necesidad de interpretar de una manera más real la complejidad del movimiento de los fluidos como el agua, requiere de una modelación física que permite ver diferentes escenarios, haciendo posible el planteamiento y análisis de alternativas que permite dar un mejor diagnóstico de las estructuras que forman parte del sistema hidráulico.

Aun cuando la base teórica de la hidromecánica ha presentado un significativo desarrollo en las últimas décadas, las aplicaciones hidráulicas no se ha desarrollado simultáneamente, es así como las ecuaciones o relaciones funcionales de la hidromecánica moderna poseen dificultades en la aplicación, es entonces que se recurre a hipótesis que simplifiquen dicha teoría limitando la solución, es necesario un proceso de investigación que respalde la teoría mediante el apoyo de modelos hidráulicos.

La modelación hidráulica es la reproducción, a escala reducida, para la simulación de los estados, los fenómenos o los procesos relacionados con el flujo del agua, y que representan problemas relacionados con estructuras hidráulicas o con la hidromecánica técnica¹.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS

Principalmente se tiene dos tipos de modelos que son:

- Modelos físicos
- Modelos matemáticos o de simulación numérica

El desarrollo de la investigación de este proyecto de titulación gira alrededor del análisis en modelo físico de la rápida de fondo escalonado, por lo cual el enfoque será en la modelación física.

¹Hidalgo, M. "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas". Quito Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional.

3.1.1 MODELOS FÍSICOS

Es la representación en forma reducida de los sistemas prototipos, en el campo de la hidráulica se puede mencionar a presas, vertederos, captaciones, disipadores de energía, etc. Los modelos físicos se pueden clasificar como:

Modelos físicos con geometría similar

Las dimensiones del modelo corresponden a la misma escala en relación al prototipo.

Modelos físicos distorsionados

Tiene diferentes relaciones de escala, es así como la relación de longitudes es diferente a la relación de profundidades entre el modelo y el prototipo.

Modelos físicos disímiles

No existe semejanza física entre el modelo y el prototipo, se ejecuta en un campo físico analógico.

3.2 MAGNITUDES FÍSICAS, DIMENSIONES Y UNIDADES

Una dimensión es una medida de una cantidad física sin valores numéricos, mientras que una unidad es una manera de asignar un número a la dimensión, la combinación de ambas da lugar a las magnitudes físicas.

Las magnitudes físicas o hidrodinámicas en la modelación hidráulica, corresponden a magnitudes existentes en la naturaleza, bajo leyes establecidas, que toman el nombre de “escalas”. La adecuada selección de las magnitudes más relevantes en la representación del fenómeno hidráulico, permitirá una aplicación inmediata de los resultados en la solución del problema.

Existen siete magnitudes primarias o magnitudes fundamentales: masa, longitud, tiempo, temperatura, corriente eléctrica, cantidad de luz y cantidad de materia, pero las que caracterizan el campo físico de la hidráulica son:

TABLA 3.1: DIMENSIONES PRIMARIAS Y SUS UNIDADES SI PARA HIDRÁULICA

Magnitud	Símbolo	Unidad
Masa	M	Kg (kilogramo)
Longitud	L	m (metro)
Tiempo	T	s (segundo)

FUENTE: Cengel, Y. Cimbala, J. (2006) "Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones". México. Editorial Mc Graw Hill. Pág. 270

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Estas magnitudes fundamentales están expresadas en el Sistema Internacional (SI), son propiedades o características de la masa de agua y de todo fenómeno afín a su movimiento. A partir de estas magnitudes fundamentales se pueden definir a las demás magnitudes derivadas.

3.2.1 HOMOGENEIDAD DIMENSIONAL

Para establecer las dimensiones de cualquier propiedad secundaria o magnitud derivada, es necesario que esta cumpla con el principio de homogeneidad dimensional que se enuncia como: **Todo término aditivo en una ecuación debe tener las mismas dimensiones.** Esto quiere decir que todos los fenómenos naturales y las magnitudes correspondientes a ellos son independientes del sistema de unidades utilizadas.

Se busca una función que describa cierto fenómeno físico, que puede ser descrita por la variable Q ; es una magnitud derivada que depende de las magnitudes fundamentales q_1, q_2, \dots, q_m , se plantea entonces la función $Q = f(q_1, q_2, \dots, q_m)$ y a su vez puede ser expresado como un monomio de potencias de las variables fundamentales q ; entonces la magnitud derivada se expresa como $Q = c * q_1^{\alpha_1} * q_2^{\alpha_2} * \dots * q_m^{\alpha_m}$. Los exponentes $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ de las magnitudes fundamentales definen la dimensión de la magnitud derivada y el factor c representa una constante numérica por lo tanto es adimensional.

3.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL

Las mayoría de veces la investigación por medio de un modelo físico dentro de un laboratorio es el único método para obtener información correcta y general, ya que se basan en

el análisis dimensional.

El estudio del análisis dimensional se relaciona con el campo del análisis matemático, cuyos parámetros generalmente son magnitudes físicas que se las pueden manejar siguiendo un orden y lógica matemática facilitando el planteamiento de la investigación con su adecuada ejecución, los objetivos principales son:

- Generar parámetros adimensionales que ayuden en el diseño de modelos físicos y numéricos, también en el reporte de los resultados experimentales.
- Obtener leyes de escalamiento de modo que se puede predecir el desempeño del prototipo a partir del desempeño del modelo.
- Predecir las tendencias en la relación de parámetros.

En la mayor parte de los estudios experimentales, los análisis y pruebas se realizan por medio de un modelo a escala geométrica con el fin de ahorrar tiempo y dinero, en lugar de en un prototipo de tamaño real. En tales casos, se debe tener cuidado de escalar adecuadamente los resultados además que el modelo cumpla los criterios de similitud seleccionados.

3.3.1 MÉTODO DE REPETICIÓN DE VARIABLES Y TEOREMA PI DE BUCKINGHAM

El método de repetición de variables² es una poderosa herramienta matemática dentro del análisis dimensional que permite plantear ecuaciones o funciones adimensionales que representen fenómenos físicos.

Se usa una letra griega mayúscula pi (Π) para denotar un parámetro adimensional, en un problema general del análisis dimensional existe un Π dependiente que se lo denota como Π_1 ; este parámetro es función de otras variables Π_n que son independientes es decir:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_k) \quad (3.1)$$

Se puede considerar a este método como un procedimiento paso a paso para generar los parámetros adimensionales pi (Π) (Anexo 4); que se describen a continuación:

²Cengel, Y. Cimbala, J. (2006) "Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones". México. Editorial Mc Graw Hill

- i) Enlistar y contar los parámetros: variables dimensionales, variables adimensionales y constantes adimensionales. Entonces n es el número total de parámetros en el problema incluyendo la variable dependiente, es de suma importancia que los parámetros independientes sean independientes; es decir no se los pueda expresar en sus términos.
- ii) Hacer una lista con las dimensiones primarias para cada uno de los n parámetros.
- iii) Suponer la reducción j ; donde j es la suposición del número de dimensiones primarias en el problema. El número esperado de $\Pi(k)$ es igual a n menos j , correspondiente al teorema Pi de Buckingham.

$$\text{Teorema Pi de Buckingham: } k = n - j \quad (3.2)$$

Si el análisis no funciona, se debe verificar que existan suficientes parámetros n . De lo contrario reducir j en uno y volver a intentar.

- iv) Elegir los j parámetros repetitivos para construir cada Π , se debe cerciorar la selección adecuada de estos parámetros.
- v) Generar las Π una vez agrupados los parámetros repetitivos j ; y fuerce a que el resultado sea adimensional.
- vi) Verificar que todas las Π sean adimensionales. Escribir la relación funcional final de la forma de la ecuación 3.1

3.3.2 CRITERIOS DE SIMILITUD

Primero se explicará el concepto subyacente del análisis dimensional que son los principios de similitud dentro de la teoría de semejanza mecánica; que considera los medios continuos y los campos físicos. El alcance de este estudio, el agua corresponde al medio continuo y la hidráulica al campo físico.

Semejanza Mecánica

Existen tres condiciones necesarias para tener similitud mecánica completa entre un modelo y un prototipo.

i) Similitud Geométrica

La similitud geométrica se puede considerar como equivalencia en escala de longitud, y es un requisito para la similitud cinemática.

El modelo tendrá las magnitudes geométricas equivalentes a aquellas del prototipo, se lo puede reducir por algún “factor de escala” constate.

Este factor de escala geométrica se define como:

$$e_L = \frac{l_p}{l_m} \quad (3.3)$$

Donde:

e_L : Factor de escala de longitudes o factor de escala geométrica.

l_p : Longitud en prototipo. [m]

l_m : Longitud en modelo. [m]

ii) Similitud Cinemática

La similitud cinemática se puede considerar como equivalencia en escala de tiempo y garantiza que el patrón de flujo que se conforma en cualquier zona del modelo sea proporcional al que se producirá en la zona correspondiente del prototipo.

El factor de escala de la velocidad define la relación proporcional entre las magnitudes correspondientes de la velocidad en el prototipo y en el modelo, además la velocidad en prototipo debe escalar en magnitud y debe apuntar en la misma dirección relativa que el modelo. La escala de tiempos está definida por:

$$e_T = \frac{t_p}{t_m} \quad (3.4)$$

Donde:

e_T : Factor de escala de tiempo.

t_p : Tiempo en prototipo. [s]

t_m : Tiempo en modelo. [s]

Conociendo las escalas de longitud (3.3) y de tiempo (3.4), podemos definir las escalas de velocidad y aceleración.

$$e_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{l_p/t_p}{l_m/t_m} = \frac{e_L}{e_T} \quad (3.5)$$

Donde:

e_V : Factor de escala de velocidad.

V_p : Velocidad en prototipo. [m/s]

V_m : Velocidad en modelo. [m/s]

$$e_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{l_p/t_p^2}{l_m/t_m^2} = \frac{e_L}{e_T^2} \quad (3.6)$$

Donde:

e_a : Factor de escala de aceleración.

a_p : Aceleración en prototipo. [m/s²]

a_m : Aceleración en modelo. [m/s²]

iii) Similitud Dinámica

La similitud dinámica es la condición más restrictiva, se logra cuando todas las fuerzas en el flujo del modelo se escalan por un factor constante a fuerzas correspondientes en el flujo del prototipo.

La similitud dinámica puede considerarse como equivalencia en escala de fuerza y está definida por la ecuación dinámica de Newton, fuerza es igual a masa por aceleración.

El factor de proporción o factor de escala difiere con cada fuerza analizada y, por lo tanto, los valores de la escala difieren según sea la fuerza analizada.

$$e_F = \frac{m_p * a_p}{m_m * a_m} = e_m * \frac{e_L}{e_T^2} \quad (3.7)$$

Donde:

e_F : Factor de escala de fuerza.

e_m : Factor de escala de masa.

m_p : Masa en prototipo. $[Kg]$

m_m : Masa en modelo. $[Kg]$

Semejanza Hidráulica

En el proceso del análisis dimensional del fenómeno hidráulico se definen las magnitudes físicas y las relaciones que existen entre las variables o escalas, a través de una función que permite explicar matemáticamente el fenómeno.

Estas variables hidrodinámicas deben ser utilizadas tanto en el sistema prototipo (V_p) como en el sistema modelo (V_m). Por ejemplo, en el análisis del flujo sobre una estructura hidráulica se postula la siguiente relación ³:

$$V = \phi\left(\frac{L}{a}, \frac{L}{b}, \frac{L}{c}, Fr, Re, We, \right) \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho}} \quad (3.8)$$

Donde:

V : Velocidad de flujo. $[m/s]$

ϕ : Parámetro adimensional.

d : Longitud característica del contorno del flujo. $[m]$

a, b, c : Magnitudes geométricas de una estructura hidráulica. $[m]$

Fr : Número de Froude, que expresa el efecto de la gravedad.

Re : Número de Reynolds, que expresa el efecto de la viscosidad.

We : Número de Weber, que expresa el efecto de la tensión superficial.

$\Delta\rho$: Masa en modelo. Kg/m^3

ρ : Densidad del fluido. Kg/m^3

De la ecuación 3.8 se obtiene la expresión adimensional que considera las escalas de fuerzas, longitud, tiempo y masa.

³Hidalgo, M. (2007). "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básica". Quito Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional

$$e_F = \frac{\phi_p}{\phi_m} = e_m * \frac{e_L}{e_T^2} \quad (3.9)$$

La condición para alcanzar la similitud mecánica es que $\phi_p = \phi_m$ (la función adimensional del prototipo debe ser idéntica a la función correspondiente al modelo); por lo tanto, se exige igualdad geométrica e igualdad en los número de Fr, Re y We. . Es decir, la semejanza hidráulica exacta se cumplirá exclusivamente cuando el modelo sea igual al prototipo. Este requerimiento de la semejanza hidráulica o similitud dinámica exacta hace normalmente imposible la aplicación de la modelación física para fines de optimizar el diseño de una estructura hidráulica.

El uso de un modelo reducido a escala en la investigación de fenómenos hidráulicos no exige el cumplimiento de la similitud dinámica exacta, sino que tiene como objetivo el alcanzar resultados experimentales que sean adecuadamente aproximados y útiles en el diseño hidráulico, que se represente el fenómeno hidráulico apropiadamente y que las diferencias en la semejanza dinámica o hidráulica sean mínimas y conocidas.

En este sentido, es necesario observar **las fuerzas que actúan en el prototipo e identificar las fuerzas predominantes que condicionan al fenómeno hidráulico** y representar su influencia en el modelo, en forma exclusiva. Esta condicionante se satisface manteniendo la identidad de uno de los siguientes parámetros adimensionales entre el prototipo y el modelo:

- **Número de Froude**

Representa la influencia relativa de la gravedad sobre el patrón de flujo del movimiento del agua. Aparece como predominante en los fenómenos donde se forma la superficie libre del flujo, en el caso del flujo inestable y cuando existe introducción natural de aire en la masa de agua.

$$Fr = \frac{V_o}{\sqrt{gL}} \quad (3.10)$$

Donde:

V_o : Velocidad de flujo. [m/s]

g : Aceleración de la gravedad. [m/s^2]

L : Longitud característica del contorno del flujo. [m]

- **Número de Reynolds**

Representa la influencia de la viscosidad, la que se hace presente sobre todo en el análisis de pérdidas continuas y locales de energía así como cuando se presentan zonas de separación del flujo.

$$Re = \frac{V_o L}{\nu} \quad (3.11)$$

Donde:

V_o : Velocidad de flujo. [m/s]

ν : Viscosidad cinemática. [m^2/s]

L : Longitud característica del contorno del flujo. [m]

- **Número de Weber**

Representa la influencia de la tensión superficial, cuyo efecto es importante en flujos con fuerte curvatura de las superficies libres.

$$We = \frac{V_o}{\sqrt{\sigma/\rho L}} \quad (3.12)$$

Donde:

V_o : Velocidad de flujo. [m/s]

σ : Tensión superficial. [Kg/m]

ρ : Densidad del fluido. [Kg/m^3]

L : Longitud característica del contorno del flujo. [m]

Para todos estos números adimensionales característicos del flujo, se puede demostrar que su efecto aumenta en forma inversamente proporcional al valor del número y tiende a desaparecer para grandes valores numéricos.

3.4 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA

Al no poder representar la semejanza dinámica o hidráulica exacta, el objetivo en la modelación física de fenómenos hidráulicos es alcanzar la **similitud dinámica restringida** o particular según sea la o las fuerzas predominantes en el fenómeno hidráulico que se investigará con la ayuda del modelo, tal como se muestra en el siguiente cuadro:

TABLA 3.2: TIPOS DE MODELO FÍSICO SEGÚN SU FUERZA PREDOMINANTE

Fuerza Predominante	Identidad	Similitud Particular	Tipo de Modelo
F_g Fuerza gravitacional	$Fr_p = Fr_m$	Froude	Froudiano
F_v Fuerza viscosa	$Re_p = Re_m$	Reynolds	Viscoso
F_σ Tensión superficial	$We_p = We_m$	Weber	-
F_g, F_v gravitacional y viscoso simultáneamente	$Fr_p = Fr_m$ $Re_p = Re_m$	Froude-Reynolds	grávico-viscoso

FUENTE: Hidalgo, M. (2007). "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básica". Quito Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Pág. 33.

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

3.4.1 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA DE FROUDE

La influencia que predomina en un modelo según el criterio de Froude es la de las fuerzas gravitacionales o de peso F_g . En esta clasificación se relacionan los movimientos o fenómenos con superficie libre que se desarrollan por acción de la gravedad y que por su estructura dinámica pueden ser categorizados como movimientos irrotacionales; es decir, aquellos en los que el mecanismo turbulento da lugar a las pérdidas de energía.

El patrón del flujo de vertido sobre una rápida, sea de fondo escalonado o de fondo liso, está gobernado por la influencia de la componente de la gravedad paralela a la pendiente de la rápida. La distribución de velocidades y su magnitud dependerán casi exclusivamente de los parámetros geométricos y dinámicos propuestos por la inclinación y forma de la sección transversal de la rápida. Es decir; el fenómeno de flujo sobre y a lo largo de la rápida es de tipo fundamentalmente Froudiano.

Adicionalmente, las características del flujo con valores del número de Froude superiores a 3, en secciones transversales rectangulares, condicionan la presencia de flujo inestable, con introducción natural de aire. Estos fenómenos también han sido estudiados convenientemente en modelos Froudianos.

Una vez que se conoce que las fuerzas gravitatorias son las preponderantes en el presente estudio de modelación, se trata de alcanzar una similitud restringida o particular de Froude, de tal manera que la función ϕ ecuación 3.8 dependa exclusivamente de la geometría de contorno del modelo y el número de Froude.

En el tipo de modelo Froudiano se debe asegurar adicionalmente que la intervención de la tensión superficial y la viscosidad en el movimiento del fluido sean mínimas; a más de que la turbulencia representativa sea equivalente entre prototipo y modelo.

Para alcanzar esta similitud se ha de verificar la igualdad del número de Froude entre prototipo y modelo $Fr_p = Fr_m$, ó que su relación sea igual a 1.

$$\frac{Fr_p}{Fr_m} = 1 \quad o \quad \frac{Fr_p^2}{Fr_m^2} = 1 \quad (3.13)$$

Desarrollando esta relación (3.13), en función de escalas se obtiene una ecuación en donde la escala de tiempo depende de los siguientes parámetros:

$$e_T = \frac{\sqrt{e_L}}{\sqrt{\frac{\gamma_p/\gamma_m}{\rho_p/\rho_m}}} \quad (3.14)$$

Donde:

e_T : Factor de escala de tiempo.

e_L : Factor de escala de longitud.

ρ : Densidad del fluido. $[Kg/m^3]$

γ : Peso específico del fluido. $[N/m^3]$

Tanto el modelo como el prototipo utilizan el mismo fluido que es el agua, por tanto la

densidad es la misma para ambos $\rho_p = \rho_m$; al mismo tiempo el campo gravitatorio rige al modelo como al prototipo, entonces el peso específico es igual $\gamma_p = \gamma_m$; la igualdad de estos parámetros simplifica la ecuación (3.14), expresando la escala de tiempo de la siguiente manera:

$$e_T = e_L^{1/2} \quad (3.15)$$

El siguiente cuadro presenta las relaciones de escalas de las magnitudes físicas que pertenecen a la similitud de Froude para el campo de la hidráulica, es decir cuando el fluido es el agua.

TABLA 3.3: RELACIONES DE ESCALA SEGÚN SIMILITUD RESTRINGIDA DE FROUDE PARA AGUA

Magnitud	Símbolo	Escala
Longitud	e_L	e_L
Tiempo	e_t	$e_L^{1/2}$
Velocidad	e_V	$e_L^{1/2}$
Aceleración	e_A	1
Caudal	e_Q	$e_L^{5/2}$
Presión	$e_{\Delta\rho}$	e_L
Energía	e_ε	e_L^4
Fuerza	e_F	e_L^3

FUENTE: Hidalgo, M. (2007). "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básica".

Quito Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Pág. 37.

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

3.5 LIMITACIONES EN LA MODELACIÓN FÍSICA

Existen ciertas restricciones dentro de la modelación física, para el presente estudio de investigación. A saber:

3.5.1 RESTRICCIÓN EXTERNA

La disponibilidad de espacio dentro del laboratorio es un limitante que condiciona la selección de la escala de longitudes. Por otro lado, un modelo no puede ser muy pequeño para alcanzar la similitud dinámica de un fenómeno hidráulico. Se recomienda, en el presente caso, que la escala de longitudes sea menor a 50; de tal manera que las profundidades de agua en el modelo sean superiores a los dos centímetros.

$$e_L < 50 \quad (3.16)$$

En este sentido, otra limitación dentro de un laboratorio es la potencia y capacidad de columna de agua del sistema de bombeo propio. El Laboratorio del CIERHI dispone de una capacidad de bombeo que garantiza caudales de hasta 800 l/s con una altura de 13 m de columna de agua.

3.5.2 EFECTO DE REYNOLDS

La influencia de la viscosidad es relativamente importante así como la rugosidad característica del contorno sobre el patrón de flujo de vertido sobre la rápida, en la medida que se busca el análisis de la disipación de energía sobre el contorno escalonado y sobre el contorno liso. El efecto combinado de las dos variables se puede analizar por medio del factor de fricción o coeficiente de pérdida λ , en la ecuación de Darcy-Weisbach.

En primer lugar, si se desea que el efecto de la viscosidad en el modelo sea de menor importancia que el efecto de la gravedad, como lo es en el prototipo, se debe garantizar un número de Reynolds mayor a 2×10^4 en el modelo; asegurando así un flujo con turbulencia totalmente desarrollada.

En segundo término, para que la diferencia del número de Reynolds entre modelo y prototipo no origine una variación apreciable entre los valores de los coeficientes de fricción, cuando el flujo se encuentra en la zona rugosa, se debe garantizar que las pendientes del nivel del agua y de la línea de energía sean similares tanto en el modelo como en el prototipo. Esto depende básicamente de la selección adecuada de la rugosidad absoluta (material) del contorno en el modelo. El modelo debe ser hidráulicamente más liso que el prototipo, como se muestra en la figura 3.1

Si el factor de fricción λ debe ser igual en modelo y prototipo, se lo puede calcular con la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{h_v}{L} \frac{8}{Fr^2} \quad (3.17)$$

Donde:

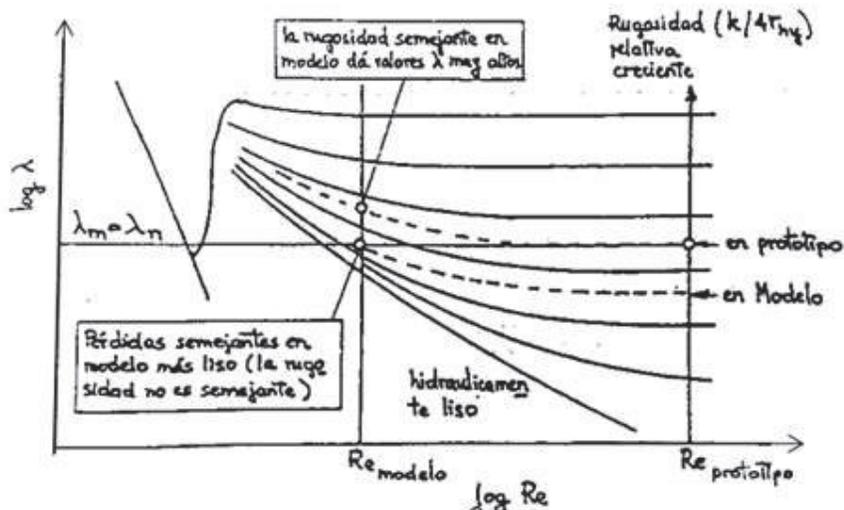
λ : Factor de fricción.

h_v : Carga de velocidad. [m]

L : Longitud característica. [m]

Fr : Número de Froude.

FIGURA 3.1: CONDICIÓN DE SIMILITUD EN MODELO PARA ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN MODELOS FROUDIANOS, INCLUYENDO EFECTOS DE VISCOSIDAD Y DE RUGOSIDAD



FUENTE: Castro, M. "Análisis dimensional y modelación física en hidráulica". Quito. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Pág. 46

3.5.3 TENSIÓN SUPERFICIAL

En problemas hidráulicos en la naturaleza, el número de Weber es tan grande que los efectos de tensión superficial son despreciables. En el caso de los modelos, el efecto de la tensión superficial puede llegar a ser no despreciable y por lo tanto, los números de Weber en modelo son relativamente bajos.

Cuando las profundidades de agua en modelo son bajas las fuerzas de atracción que ejercen las moléculas del fluido con las paredes y fondos de los canales causan alteración en el flujo debido a la adhesión, ya que las ondas superficiales se ven afectadas por la tensión superficial.

La literatura técnica brinda muchas recomendaciones que limita o elimina el efecto de la tensión superficial en el modelo. Por ejemplo, se recomienda un rango de profundidades de agua mayor a 2cm , medidas en el modelo. De igual modo, el efecto de la tensión superficial puede reducirse empleando aditivos o agua jabonosa.

3.6 SELECCIÓN DE LA ESCALA

Conociendo las restricciones que presenta el modelo físico y siguiendo las recomendaciones para superar las limitaciones en la modelación física, se ha tomado en cuenta para un análisis previo tres escalas 1 : 10, 1 : 20 y 1 : 30.

En la tabla 3.4 se presentan las dimensiones y magnitudes de las estructuras existentes en el prototipo y sus magnitudes en modelos con las tres posibles escalas seleccionadas del análisis previo.

TABLA 3.4: VALORES DE LAS MAGNITUDES EN PROTOTIPO Y EN MODELO EN FUNCIÓN DE DIFERENTE ESCALA DE LONGITUDES

Estructura	Magnitud		Unidad	Prototipo	Escala modelo		
					1:10	1:20	1:30
TÚNEL DE APROXIMACIÓN	Altura de la sección baúl	(H)	<i>m</i>	5	0.50	0.25	0.17
	Ancho de la sección baúl	(b)	<i>m</i>	5	0.50	0.25	0.17
	Longitud tramo recto 1	(L)	<i>m</i>	68	6.80	3.40	2.27
	Longitud tramo recto 2	(L)	<i>m</i>	17.42	1.74	0.87	0.58
	Longitud tramo curvo	(L)	<i>m</i>	58.49	5.85	2.92	1.95
	Radio de curvatura	(r)	<i>m</i>	100	10	5	3.33
	Caudal	(Q)	m^3/s	150.00	0.47	0.084	0.03
TRANSICIÓN	Longitud	(L)	<i>m</i>	9.58	0.96	0.48	0.32
	Desnivel	(H)	<i>m</i>	2.76	0.28	0.14	0.09
	Ancho inicial de cada celda	(b)	<i>m</i>	2.73	0.27	0.14	0.09
	Ancho final de cada celda	(b)	<i>m</i>	5	0.50	0.25	0.17
	Caudal	(Q)	m^3/s	150	0.47	0.084	0.03
PRIMER CUENCO DISIPADOR	Longitud	(L)	<i>m</i>	20	2	1	0.67
	Altura de paredes	(H)	<i>m</i>	6.87	0.69	0.34	0.23
	Ancho de cada celda	(b)	<i>m</i>	5	0.5	0.25	0.17
	Caudal	(Q)	m^3/s	150	0.47	0.084	0.03
CANAL DE CONEXIÓN	Longitud	(L)	<i>m</i>	4.18	0.42	0.21	0.14
	Altura paredes	(H)	<i>m</i>	4	0.4	0.2	0.13
	Ancho de cada celda	(b)	<i>m</i>	5	0.5	0.25	0.17
	Caudal	(Q)	m^3/s	150	0.47	0.084	0.03
RÁPIDA ESCALONADA	Longitud horizontal	(L)	<i>m</i>	91.78	9.18	4.59	3.06
	Longitud vertical	(L)	<i>m</i>	89.34	8.93	4.47	2.98
	Ancho de cada celda	(b)	<i>m</i>	5	0.5	0.25	0.17
	Altura paredes	(H)	<i>m</i>	4	0.4	0.2	0.13
	Huella de grada	(l)	<i>m</i>	1	0.1	0.05	0.03
	Contrahuella de grada	(h)	<i>m</i>	1	0.1	0.05	0.03
	Caudal	(Q)	m^3/s	150	0.47	0.084	0.03
SEGUNDO CUENCO DISIPADOR	Longitud	(L)	<i>m</i>	25	2.5	1.25	0.83
	Altura de paredes	(H)	<i>m</i>	8	0.8	0.4	0.27
	Ancho de cada celda	(b)	<i>m</i>	5	0.5	0.25	0.17
	Caudal	Q	m^3/s	150	0.47	0.084	0.03
CANAL DE CONEXIÓN	Longitud	(L)	<i>m</i>	48.8	4.88	2.44	1.63
	Altura paredes	(H)	<i>m</i>	4	0.4	0.2	0.13
	Ancho de cada celda	(b)	<i>m</i>	5	0.5	0.25	0.17
	Caudal	(Q)	m^3/s	150	0.47	0.084	0.03

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

El análisis de selección entre la escala 1:30 y 1:25 si bien conduce a que se cumple con la condición de que la escala sea menor a 50; en cambio, no cumple con la restricción externa de que las profundidades de agua para caudales menores sean mayores a los 2 cm; es decir, para que el efecto de la tensión superficial sea relativamente despreciable o que el número de Weber no sea bajo.

El análisis con la escala 1:10 y 1:15, de igual manera, conduce a reconocer que se cumple con el requerimiento de que sea menor a 50 para representar adecuadamente la introducción natural de aire en la masa de agua; sin embargo, se tiene grave restricción respecto de la capacidad real del sistema de bombeo en el rango de caudales necesario para la simulación del modelo.

Finalmente se escoge la escala de longitudes 1:20. En el anterior Tabla 3.4 se muestran los valores de la escala derivada y se detalla en forma comparativa la conveniencia de esta selección. En la tabla 3.5 se indica los valores de las magnitudes representativas para la escala de longitudes adoptada 1:20.

TABLA 3.5: EQUIVALENCIAS NUMÉRICAS PARA LA SIMILITUD DE FROUDE ESCALA 1:20

Magnitud	Símbolo	Escala	Valor
Longitud	e_L	e_L	20
Tiempo	e_t	$e_L^{1/2}$	4.47
Velocidad	e_V	$e_L^{1/2}$	4.47
Aceleración	e_A	1	20
Caudal	e_Q	$e_L^{5/2}$	1788.85
Presión	$e_{\Delta p}$	e_L	20
Energía	e_ε	e_L^4	160000
Fuerza	e_F	e_L^3	8000

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

3.7 EFECTOS DE ESCALA

Es muy frecuente designar con el término “efectos de escala” a las discrepancias sistemáticas que existen entre los valores de una misma magnitud física, medidos en los ensayos con modelos, a diferentes escalas de longitudes, de un único prototipo.

Se puede demostrar, sin embargo, con base en el análisis y en las consideraciones sobre el fenómeno físico que dan lugar a la definición de los criterios de similitud dinámica restringida, que estas discrepancias obedecen, en realidad, a que no todas las fuerzas o no todos los parámetros adimensionales de relación entre ellas, pueden ser tomados en cuenta simultánea y adecuadamente en los ensayos en modelo.

A estos efectos de escala pertenecen en especial, las divergencias que tienen su origen en la representación real y particular de cada estructura de:

- i) Influencia de las características geométricas y de la rugosidad.
- ii) Influencia de la viscosidad (de la diferencia en el número de Reynolds).
- iii) Influencia de la tensión superficial (tamaño reducido del patrón de flujo).
- iv) Influencia de las condiciones del flujo de aproximación en el modelo.
- v) Influencia de las condiciones del flujo aguas abajo.

3.8 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolla en tres etapas, a continuación se presentan los objetivos de cada una.

3.8.1 ETAPA I: VALIDACIÓN Y/O CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO EN SU CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA ASÍ COMO EN LA SIMILITUD HIDRODINÁMICA

- Verificar la similitud geométrica y la similitud restringida de Froude para garantizar el análisis y la evaluación del comportamiento del flujo, con el fin de que el modelo físico pueda ser considerado para las siguientes etapas.

- Verificar la continuidad y estanqueidad del modelo físico, obteniendo curvas experimentales de descarga, tanto en la estructura de ingreso como en los vertederos de aforo a la salida.
- Validar el comportamiento del flujo en las diferentes estructuras y verificar sobre todo la correcta representación de los diferentes tipos de escurrimiento sobre la rápida escalonada mediante ensayos con diferentes caudales.

3.8.2 ETAPA II: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS CON EL DISEÑO ORIGINAL

- Evaluar experimentalmente el comportamiento hidráulico del sistema: estructura de ingreso (túnel baúl, transición, cuenco disipador 1, canal de conexión 1), rápida escalonada y estructura de entrega del flujo (cuenco disipador 2, canal de conexión 2).
- Evaluar la calidad y el comportamiento del flujo de aproximación que se desarrolla desde el túnel baúl hacia la rápida escalonada; así también su influencia en el comportamiento hidráulico del sistema, sobre todo en la disipación de energía.
- Analizar principalmente la presencia de flujo rasante y la eficiencia de disipación de energía en la rápida escalonada, así como en la estructura de disipación ubicado al pie de ella.
- Evaluar y definir el rango de caudales seguros y de eficiente operación en el funcionamiento hidráulico del sistema entre la rápida escalonada y cuenco disipador, construidos con la geometría en base al diseño original.
- Evaluar de forma cuantitativa la derivación de caudales a través de la pared central que divide a la conducción en dos celdas simétricas.

3.8.3 ETAPA III: PROPUESTA DE RECOMENDACIONES TÉCNICAS QUE MEJOREN Y GARANTICEN LA EFICIENCIA HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS ACTUALMENTE CONSTRUIDAS

- Si la incidencia de la zona de aproximación sobre el comportamiento del flujo vertido sobre la rápida escalonada es inadmisibles, recomendar opciones de modificación en la geometría actual.

- Recomendar posibles alternativas de modificación en la geometría de la rápida escalonada y su estructura de disipación al pie, con la finalidad de alcanzar la disipación de energía requerida para el buen funcionamiento del cuenco de disipación; y/o hacer más amplia el rango seguro y eficiente de caudales de operación.
- Analizar cualitativamente los cambios en la eficiencia de disipación según las alternativas propuestas.

3.9 PLAN DE PRUEBAS

En esta sección se describe a detalle las diferentes pruebas a ser aplicadas en cada etapa de la investigación, en la etapa I correspondiente a la validación del modelo físico, se realizan diferentes ensayos para una gama de caudales, como se presenta en la tabla 3.6

TABLA 3.6: PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE A LA VALIDACIÓN DEL MODELO FÍSICO

PRUEBA	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	FASE DE INVESTIGACIÓN	OBSERVACIONES
P-1	44.91	25.11	Validación	Caudal intermedio (30 % del caudal de diseño de la estructura)
P-2	20.76	11.61	Validación	Caudales bajos (caudales más frecuentes)
P-3	8.98	5.02	Validación	

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

En la etapa II de la investigación a fin de analizar experimentalmente el diseño original de las estructuras, se realizan de la misma manera diferentes ensayos para una serie de caudales, según un plan de pruebas presentado posteriormente en el capítulo 5.

El plan de pruebas correspondiente a la etapa III referente a la propuesta de recomendaciones técnicas que mejoren y garanticen la eficiencia hidráulica de las estructuras con el diseño original, se presentan más adelante en el capítulo 6 con base en el análisis realizado en la etapa II.

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

La construcción y montaje del modelo físico de la rápida escalonada ha sido efectuado en el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), ubicado en el campus de la Escuela Politécnica Nacional. Técnicamente, este Centro cuenta con un área experimental de $1200 m^2$ aproximadamente, un sistema de recirculación de flujo sustentado por un sistema de bombeo (cuatro bombas de impulsión de 60 HP de potencia, 200 l/s de capacidad y 13 m de columna de agua cada una), un tanque de carga de $4 m^2$ de sección y 9 m de altura. Previo al proceso de construcción y montaje, tomando en cuenta el área que ocupa el modelo y las estructuras auxiliares para su soporte ($70 m^2$) así como la disponibilidad de espacio e infraestructura existente; se presenta la ubicación del modelo y las estructuras anexas en el plano 03 ubicado en el Anexo 5. Se ha realizado el replanteo en el sitio, al interior del laboratorio, con estación total y equipo topográfico de precisión.

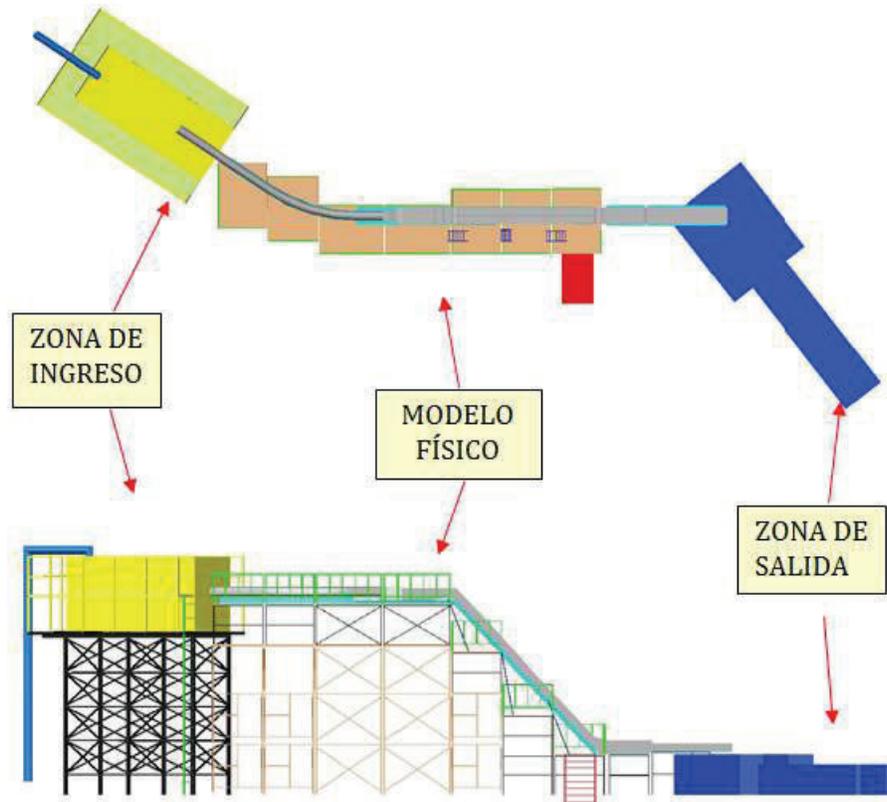
FIGURA 4.1: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

En el modelo se demarcan tres zonas: la zona de ingreso, el modelo físico propiamente dicho y la zona de salida; como se aprecia en la figura 4.2

FIGURA 4.2: ESQUEMA DE LAS ZONAS DEL MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

4.1.1 ZONA DE INGRESO

Las estructuras en esta zona de inicio del modelo tienen como objetivo la entrega en forma estable y adecuada de la serie de caudales requeridos para las diferentes pruebas así como permitir que el flujo que ingresa al modelo físico esté distribuido uniformemente en la sección de inicio del modelo. En esta zona se tienen las siguientes estructuras componentes:

- Sistema de tuberías.
- Tanque de abastecimiento y uniformización, soportado en estructura elevada de acero.
- Pantalla uniformizadora de flujo.

Sistema de tuberías

La conducción de agua hacia el tanque de entrada se realiza mediante una tubería de PVC- Presión, de 250 mm de diámetro interno, dispuesta desde una toma o derivación existente en el sistema de recirculación del laboratorio y que tiene adicionalmente una válvula de compuerta para regular el caudal de entrada.

En el punto más alto de esta línea de conducción (7.23 m con respecto al nivel de la losa de piso del CIERHI) se instala una válvula simple de aire, que elimina la acumulación de aire. Para favorecer la disipación de energía del flujo de ingreso hacia el tanque de entrada se ha dispuesto un tramo final de tubería perforada (1.20 m). Para uniformizar el flujo que circula hacia el inicio del modelo propiamente dicho, en el interior del tanque de entrada se han ubicado dos pantallas transversales, previstas con varios orificios de 3 cm de diámetro.

Tanque de ingreso y uniformización

Esta estructura es un tanque de acero, con capacidad máxima de almacenamiento de 21.12 m^3 , soportado por una torre elevada de 6 columnas, de acero laminado en frío, de 4.60 m de altura. Tiene una longitud en el sentido de flujo de 4.80 m que permite alcanzar una adecuada uniformización del flujo que ingresa hacia el modelo propiamente dicho.

Para el desagüe del tanque, se tiene una válvula de compuerta en el fondo del mismo, que regula el caudal de salida hacia el canal de recirculación, durante las operaciones de vaciado.

Pantalla uniformizadora

La pantalla está conformada por un tablero de madera triplex de 2.00 x 2.20 m, sellada y pintada con esmalte sintético. La pantalla tiene varias filas de orificios de 3 cm de diámetro, con una separación entre ellos igual a 3 cm. Se ubica a 1.20 m aguas abajo de la sección de ingreso del caudal en el tanque.

FIGURA 4.3: TANQUE DE ABASTECIMIENTO, ESTRUCTURA DE SOPORTE, TUBERÍA DE INGRESO, ACCESORIOS, PANTALLA UNIFORMIZADORA Y ACCESOS AL MODELO



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

4.1.2 MODELO FÍSICO, ESCALA 1:20

El modelo físico de la rápida escalonada es fabricado en piezas de acrílico transparente, de 6 mm de espesor. Cada una de estas piezas fue conformada sobre moldes de hormigón armado o madera. Las partes moldeadas fueron posteriormente adheridas y ensambladas con cloroformo y gel acrílico; los poros residuales en las secciones de unión fueron sellados con silicona líquida transparente

Estructura de ingreso a la rápida escalonada

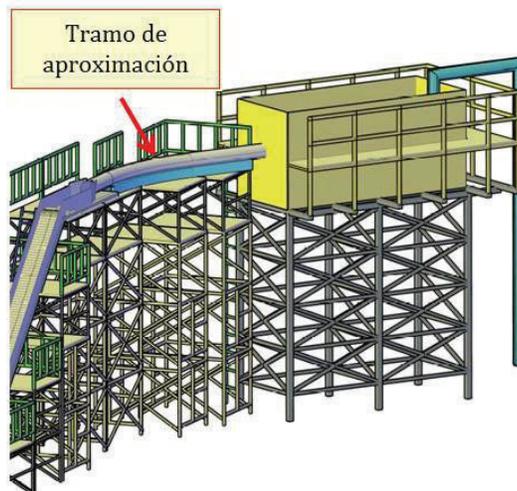
Esta estructura se compone de: (i) un tramo del túnel de aproximación, que incluye la curva de amplio radio (ii) la transición hacia el primer cuenco de disipación, (iii) el primer cuenco disipador, ubicado inmediatamente aguas arriba del inicio de la rápida escalonada y (iv) el canal que dirige el flujo hacia la rápida. Estos componentes son descritos a continuación.

i) Túnel de Aproximación

De acuerdo al diseño original, el túnel de aproximación con sección baúl tiene una longitud total de 29.5 m en modelo. De esta longitud se considera un tramo representativo de 7.19 m; conformado inicialmente por un subtramo recto, de 3.40 m de longitud y que garantiza la adecuada estabilización del flujo a la entrada. A continuación se tiene un subtramo curvo de 2.92 m de longitud y por último, un subtramo recto de 0.87 m.

Para la construcción del túnel en el laboratorio, se fabricaron piezas de acrílico independientes para cada subtramo debido a que cada uno de ellos tiene una sección transversal diferente y compleja. Para configurar las secciones transversales se elaboraron moldes de hormigón armado con acabado liso (masillado y enlucido), sobre los cuales se colocaron las piezas de acrílico previamente sometidas a 100°C de temperatura en un horno, durante un tiempo de 15 min. Las piezas de acrílico caliente se adaptan fácilmente a la forma geométrica del molde y adoptan así la geometría requerida.

FIGURA 4.4: VISTA TRIDIMENSIONAL DEL TRAMO DE APROXIMACIÓN



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 4.5: TRAMO DE APROXIMACIÓN CONSTRUIDO EN ACRÍLICO



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.1: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL TRAMO REPRESENTATIVO DEL TÚNEL DE APROXIMACIÓN

Túnel de aproximación sección baúl			
Parámetro	Unidad	Prototipo	Modelo
Altura de la sección baúl	m	5.00	0.25
Ancho de la sección baúl	m	5.00	0.25
Longitud tramo recto 1	m	68.00	3.40
Longitud tramo recto 2	m	17.42	0.87
Longitud tramo curvo	m	58.49	2.92
Radio de curvatura	m	100.00	5.00
Pendiente de fondo	%	1.00	1.00

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

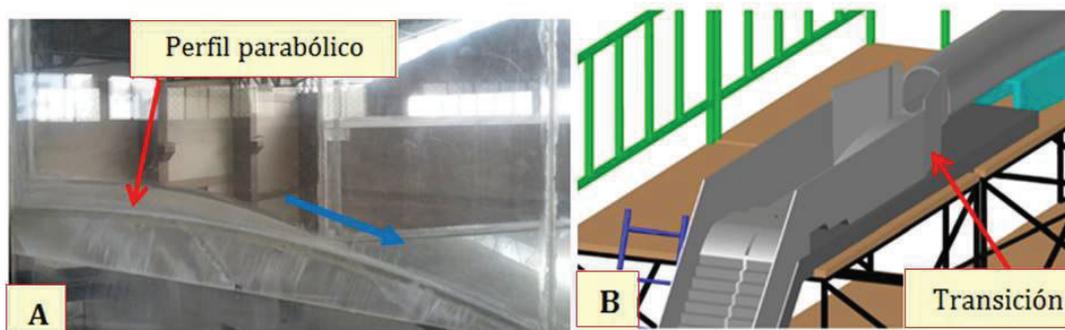
ii) Transición

A partir de la sección transversal de inicio de esta estructura, la conducción se divide en dos celdas simétricas, mediante una pared central, de 18 cm de espesor en modelo; fabricada con madera triplex de igual espesor.

En los planos de diseño original y en la memoria técnica proporcionada por la EP-MAPS, se observa que a la entrada de estas dos celdas, se ha dispuesto compuertas con el propósito de aislar cada una de ellas y viabilizar su mantenimiento. Sin embargo, en la visita técnica realizada al sitio de la obra, sólo se observaron en este sector, las ranuras dejadas para la instalación de dichas compuertas. En el modelo físico se toman en cuenta exclusivamente las ranuras y al igual que lo existente, no se instalan las compuertas.

La estructura de la transición se desarrolla sobre un perfil con curva parabólica, descendiendo un desnivel de 0.14 m en modelo. Esta forma se logra con una plancha de acrílico moldeado.

FIGURA 4.6: (A) TRANSICIÓN CONSTRUIDA EN ACRÍLICO (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DE LA TRANSICIÓN



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.2: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA TRANSICIÓN

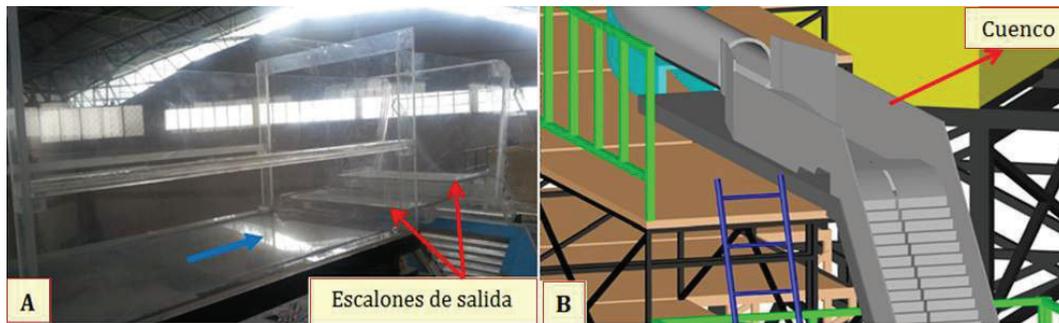
Transición			
Parámetro	Unidad	Prototipo	Modelo
Longitud	m	9.58	0.48
Desnivel	m	2.76	0.14
Ancho inicial de cada celda	m	2.73	0.14
Ancho final de cada celda	m	5.00	0.25
Ángulo de divergencia	°	13.38	13.38

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

iii) Primer cuenco disipador

Para la representación de esta estructura en modelo, es necesario mencionar que ciertas obras anexas (referidas en los planos de diseño original y en la memoria técnica proporcionada por la EPMAPS) no están implementadas en el modelo porque no se encuentran construidas en el prototipo. Tal es el caso de dos orificios ubicados en el escalón de subida, diseñados con la intención de derivar las aguas negras hacia el desarenador.

FIGURA 4.7: (A) PRIMER CUENCO DISIPADOR CONSTRUIDO EN ACRÍLICO. (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DEL PRIMER CUENCO DISIPADOR



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.3: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL PRIMER CUENCO DISIPADOR

Primer cuenco disipador			
Parámetro	Unidad	Prototipo	Modelo
Longitud	m	20.00	1.00
Altura de paredes	m	6.87	0.34
Ancho de cada celda	m	5.00	0.25

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

iv) **Canal de conexión entre el primer cuenco y la rápida escalonada**

FIGURA 4.8: CANAL DE CONEXIÓN CONSTRUIDO EN ACRÍLICO



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.4: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL CANAL DE CONEXIÓN

Canal de conexión			
Parámetro	Unidad	Prototipo	Modelo
Longitud	m	4.18	0.21
Altura de paredes	m	4.00	0.20
Ancho de cada celda	m	5.00	0.25
Pendiente de fondo	%	0.30	0.30

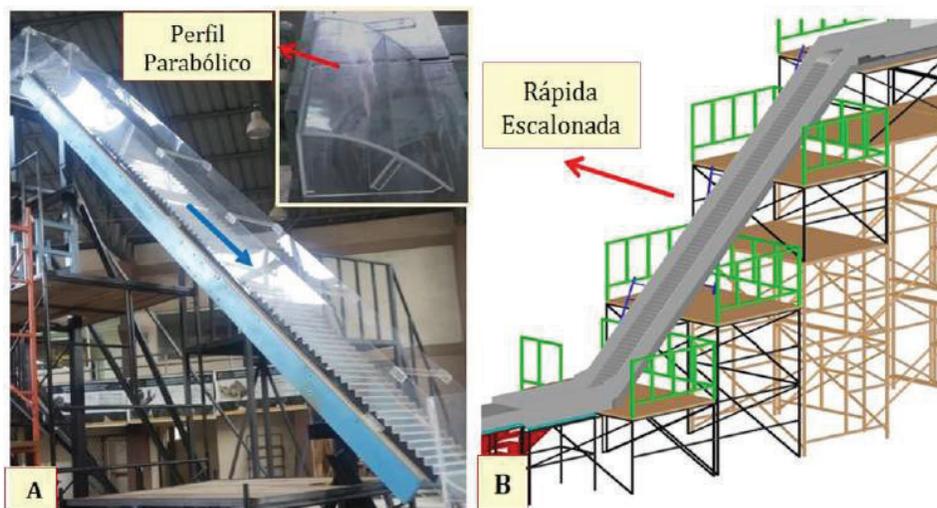
ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Rápida Escalonada

La rápida escalonada se inicia con una curva parabólica, que en el modelo fue elaborada siguiendo un similar procedimiento al de moldeo de los perfiles curvos de las estructuras antes mencionadas.

Los 87 escalones que se enlazan a este perfil, con huella y contrahuella de 0.05 m en modelo, fueron fabricados uno por uno en acrílico y dispuestos sobre un soporte de madera. Una vez terminada esta estructura, se la acopló con un ángulo de inclinación de 45° respecto a la horizontal.

FIGURA 4.9: (A) RÁPIDA ESCALONADA CONSTRUIDA EN ACRÍLICO. (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.5: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA RÁPIDA ESCALONADA

Rápida Escalonada			
Parámetro	Unidad	Prototipo	Modelo
Longitud horizontal	m	91.78	4.59
Longitud vertical	m	89.34	4.47
Ancho de cada celda	m	5.00	0.25
Altura paredes	m	4.00	0.20
Huella de grada	m	1.00	0.05
Contrahuella de grada	m	1.00	0.05
Pendiente de fondo falso	°	45.00	45.00

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Estructura de entrega del flujo

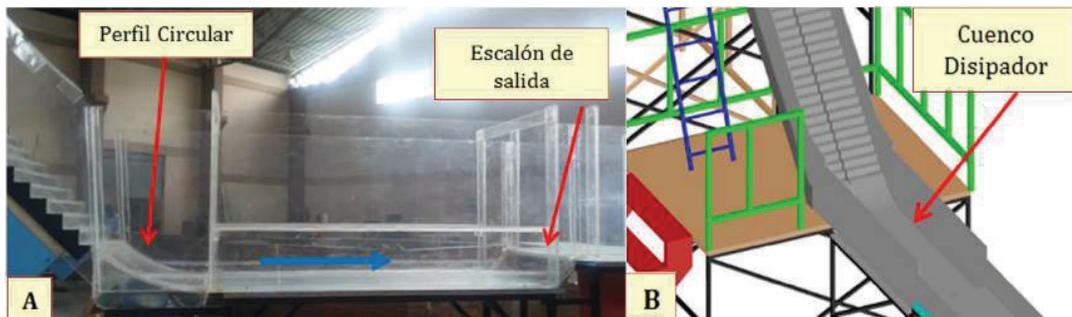
Se tienen los siguientes componentes: (i) cuenco disipador al final de la primera rápida escalonada que se inicia con un perfil circular y (ii) un tramo representativo del canal que conduce el flujo hacia la segunda rápida escalonada.

i) Cuenco disipador al final de la primera rápida escalonada

Se inicia con un perfil circular de 0.5 m de radio en modelo, y continua con los siguientes elementos: base, paredes laterales, chaflán entre base y paredes, escalón positivo de salida (con una altura de 0.10 m en modelo dispuesta al final del cuenco con una inclinación de 45°).

Como en el caso del primer cuenco disipador, según los planos de diseño original y la memoria técnica proporcionada por la EPMAPS, se previó que la limpieza de este cuenco se realice con la ayuda de un ducto ubicado en la margen izquierda, antes del escalón de salida. Sin embargo, dado que el ducto no se lo ha construido en el prototipo, de igual modo no ha sido tomado en cuenta en el modelo.

FIGURA 4.10: (A) CUENCO DISIPADOR FINAL DE LA PRIMERA RÁPIDA CONSTRUIDO EN ACRÍLICO. (B) VISTA TRIDIMENSIONAL DEL CUENCO DISIPADOR AL FINAL DE LA PRIMERA RÁPIDA



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.6: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL SEGUNDO CUENCO DISIPADOR (AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA)

Segundo cuenco disipador			
Parámetro	Unidad	Prototipo	Modelo
Longitud	m	25.00	1.25
Altura paredes	m	8.00	0.40
Ancho de cada celda	m	5.00	0.25

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

ii) **Canal de conexión entre el cuenco disipador de la primera rápida y el inicio de la segunda**

De acuerdo al diseño original, este canal de sección rectangular tiene una longitud total de 5.89 m en modelo. Se considera un tramo representativo de 2.44 m del tramo recto del canal, para su construcción en el modelo.

Es importante señalar que, debido a la presencia de la pared intermedia que divide a la conducción en dos celdas simétricas, es necesario aforar el caudal que fluye por cada una de ellas.

FIGURA 4.11: CANAL DE CONEXIÓN HACIA LA SEGUNDA RÁPIDA CONSTRUIDO EN ACRÍLICO

ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.7: DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL CANAL DE CONEXIÓN QUE CONDUCE EL FLUJO HACIA LA SEGUNDA RÁPIDA

Segundo canal de conexión			
Parámetro	Unidad	Prototipo	Modelo
Longitud margen	m	48.80	2.44
Altura paredes	m	4.00	0.20
Ancho de cada celda	m	5.00	0.25
Pendiente de fondo	%	0.30	0.30

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Zona de salida, aforo y restitución de caudales

Las estructuras ubicadas en esta zona cumplen con la finalidad de recibir el caudal descargado desde el modelo físico, disipar su energía, uniformizarlo y finalmente aforarlo para posteriormente restituirlo al sistema de recirculación del CIERHI. Las estructuras componentes son: (i) tanque de descarga y (ii) canal de descarga.

i) Tanque de descarga

Es un tanque rectangular de 3.00 x 2.50 m con una altura de 1.00 m. Sus paredes son de ladrillo enlucido y pintado y están construidas sobre una losa de cimentación de 0.10 m de espesor.

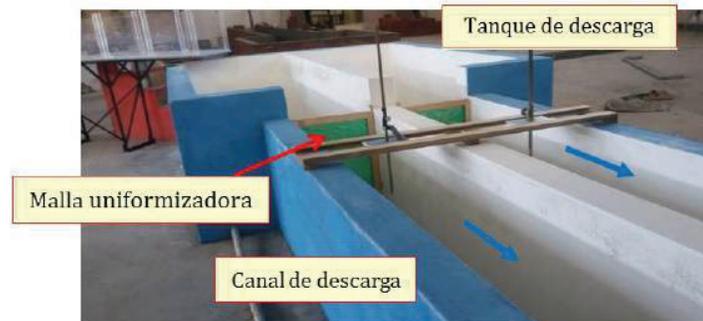
Este tanque fue dividido simétricamente por medio de una pared intermedia del mismo material; de tal modo que cada parte del tanque pueda recibir el caudal de su respectiva celda de la conducción desde la rápida escalonada. La superficie de estos elementos tiene un revestimiento de mortero impermeable; para sellar las aristas formadas por la losa y paredes se construye un chaflán con una capa de masilla. El acabado final externo tiene pintura tipo esmalte sintético y el acabado interno tiene pintura lavable.

ii) Canal de descarga

Es un canal rectangular de 4.90 x 1.40 m con una altura de 1.00 m. Su construcción se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento del tanque de descarga. Así también presenta la pared intermedia.

Este canal contiene una pantalla uniformizadora al ingreso para controlar el flujo de entrada. Al final del canal se dispone un vertedero triangular, con ángulo central de 90° y pared delgada normalizada. Este vertedero permitirá medir los caudales de salida desde el modelo físico.

FIGURA 4.12: CANAL DE DESCARGA, VERTEDEROS Y PANTALLA UNIFORMIZADORA



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

4.2 INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO FÍSICO

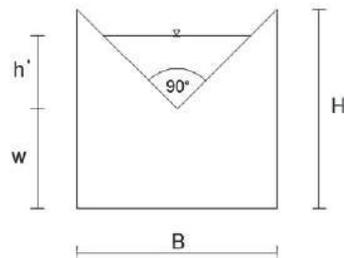
Para la ejecución de las pruebas y para la medición de las diferentes variables hidrodinámicas en el modelo, se requieren ciertos instrumentos de medida, tales como: vertederos, limnómetros, cintas métricas, nivel, estación total, probetas, tubos Pitot, sondas de presión, microhélices, etc. Para esta fase de calibración o validación del modelo se han instalado los siguientes instrumentos de medida:

4.2.1 VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED DELGADA CON UN ÁNGULO CENTRAL DE 90°

Con el propósito de aforar los caudales en cada canal de descarga, se instalaron vertederos de sección triangular, de pared delgada normalizada, simétricos con respecto al eje vertical, con un ángulo en el vértice de 90°. Las dimensiones de los vertederos están determinadas en función del ancho del canal de descarga y del caudal máximo estimado a circular a través de éste.

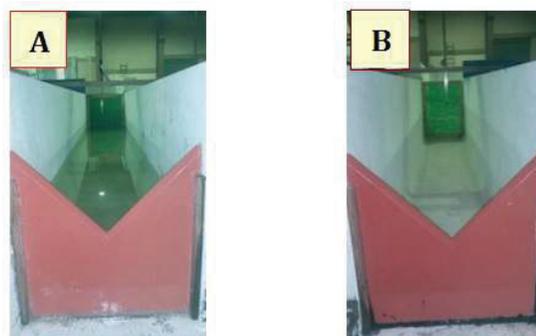
Estos dispositivos fueron fabricados en madera triplex de 18 mm de espesor sellados y pintados con laca automotriz. En toda la longitud de la cresta se tiene el bisel normalizado, garantizando así su funcionamiento como vertederos de pared delgada.

FIGURA 4.13: ESQUEMA DEL VERTEDERO TRIANGULAR CON SUS DIMENSIONES



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 4.14: VERTEDERO TRIANGULAR PARA EL AFORO DEL CAUDAL DE DESCARGA. (A) MARGEN IZQUIERDA. (B) MARGEN DERECHA



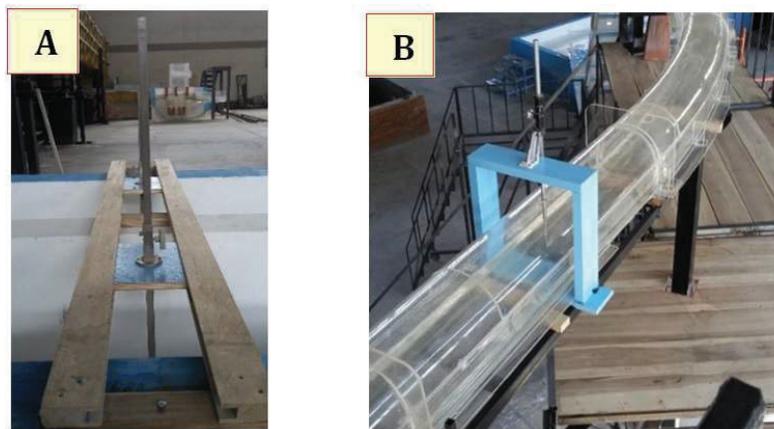
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

4.2.2 LIMNÍMETRO

Con el objetivo de medir la carga de agua sobre los vertederos en los canales de descarga, se han ubicado limnímetros cuyo rango de medición se encuentra entre 0 y 600 mm, con una precisión de 0.1 mm. Se encuentran ubicados a una distancia mínima de 4 veces la carga máxima de operación de cada vertedero, medida aguas arriba de la sección de instalación del vertedero en el tramo de flujo uniformizado.

Así también, se han instalado limnímetros de iguales características para medir el calado o altura de agua en lugares predeterminados del modelo: tramo recto antes de la curva del túnel de aproximación, aguas abajo del primer escalón del cuenco disipador 1, inicio del perfil parabólico de la rápida escalonada y en el cuenco disipador 2 al pie de la rápida escalonada.

FIGURA 4.15: LIMNÍMETRO INSTALADO EN EL CANAL DE DESCARGA (A). LIMNÍMETRO INSTALADO EN EL TÚNEL DE APROXIMACIÓN (B)

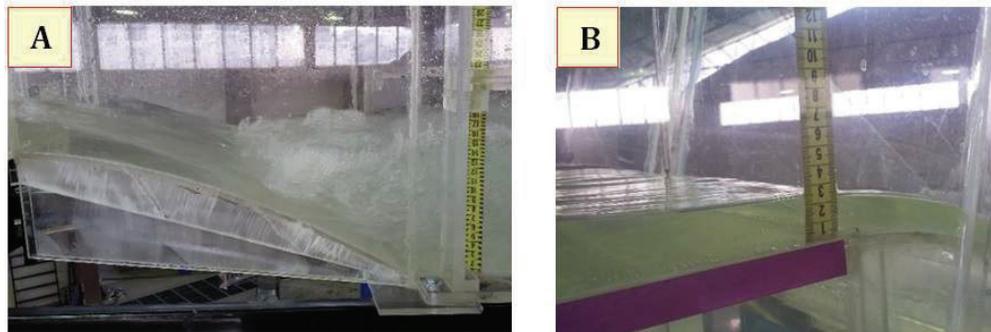


ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

4.2.3 CINTA MÉTRICA

En aquellos lugares puntuales del modelo donde se requieren mediciones referenciales, se han ubicado cintas métricas, con precisión de 1 mm. Por ejemplo, en las secciones correspondientes a: tramo curvo del túnel de aproximación, inicio y final de la transición, final del cuenco disipador 1, al inicio y a lo largo de la rápida escalonada, inicio y final del cuenco disipador 2 y canal de conexión.

FIGURA 4.16: CINTA DE MEDIDA COLOCADA AL FINAL DE LA TRANSICIÓN (A). CINTA DE MEDIDA COLOCADA EN EL INICIO DEL PERFIL PARABÓLICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA (B)

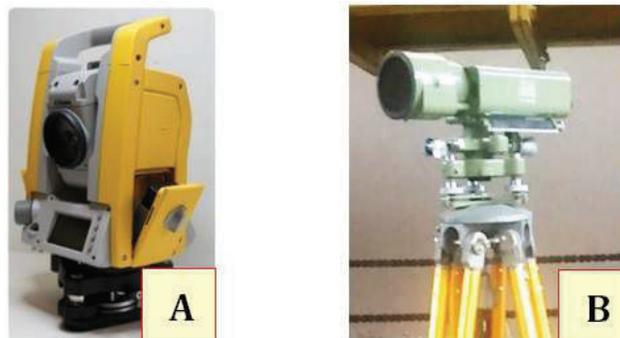


ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

4.2.4 NIVEL Y ESTACIÓN TOTAL

Los equipos de estación total (marca Trimble M3 DR 2) y nivel topográfico (marca Wild Heerbrugg Switzerland) cuya precisión es de 2 segundos con una tolerancia de 1 mm, han sido utilizados para el replanteo y montaje de las estructuras del modelo físico, así como para la verificación posterior de ejes, puntos, vértices, niveles y pendientes mediante los procedimientos de levantamiento topográfico y nivelación.

FIGURA 4.17: ESTACIÓN TOTAL MARCA TRIMBLE M3 DR 2 (A). NIVEL TOPOGRÁFICO MARCA WILD HEERBRUGG SWITZERLAND (B)



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

4.2.5 PROBETA

Las mediciones de volumen para las diferentes pruebas de aforo volumétrico, se realiza con la ayuda de recipientes plásticos graduados. Estas probetas tienen un litro de capacidad y

su precisión es de 1 mililitro.

FIGURA 4.18: PROBETA DE PLÁSTICO



4.2.6 EQUIPO DE FOTOGRAFÍA Y VIDEO

A fin de registrar en forma gráfica y visual las pruebas y la toma de resultados se tienen los siguientes equipos:

- 1) Cámara Fotográfica de 12 Megapixels con filmación HD Fujifilm.
- 2) Cámara de video JVC Optical zoom 40X.
- 3) Cámara Go Pro Gran angular de alta resolución sumergible.
- 4) Trípode metálico iMac 22 Retina Display para procesamiento audiovisual.

4.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO

Se realiza en base a la comprobación de que se cumplen la similitud geométrica y la similitud dinámica.

4.3.1 COMPROBACIÓN DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA

Para su efecto, se realiza un levantamiento topográfico a detalle del modelo construido en el laboratorio del CIERHI, con ayuda de una estación total y un nivel topográfico; el resultado del mismo se muestra en el Anexo 2.

En las Tablas 4.8 y 4.9, se presentan las coordenadas y las cotas medidas en el modelo y sus correspondientes cotas en el prototipo.

TABLA 4.8: COMPARACIÓN ENTRE LAS COORDENADAS DEL MODELO CONSTRUIDO Y LAS DEL PROTOTIPO

COMPROBACIÓN DE COORDENADAS MODELO RÁPIDA ESCALONADA									
TÚNEL DE APROXIMACIÓN									
Descripción	No	Coordenadas planos		Coordenadas modelo		Desviación		Diferencia (%)	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Eje	1	124.17	183.86	124.15	183.81	0.02	0.04	<1 %	<1 %
	4	121.15	188.65	121.15	188.65	0.01	0.00	<1 %	<1 %
TRANSICIÓN									
Eje	5	121.04	188.73	121.03	188.76	0.02	-0.02	<1 %	<1 %
	6	120.66	189.03	120.63	189.06	0.03	-0.03	<1 %	<1 %
CUENCO AGUAS ARRIBA									
Eje	7	120.21	189.38	120.22	189.39	-0.01	-0.01	<1 %	<1 %
	8	119.92	189.6	119.84	189.73	0.09	-0.13	<1 %	<1 %
RÁPIDA ESCALONADA									
Derecha	12	115.99	192.98	116.02	192.97	-0.03	0.01	<1 %	<1 %
Eje	9	119.46	189.96	119.45	189.96	0.01	0.01	<1 %	<1 %
	11	115.84	192.78	115.84	192.78	0.00	0.00	<1 %	<1 %
Izquierda	13	115.68	192.57	115.71	192.56	-0.03	0.01	<1 %	<1 %
CUENCO AGUAS ABAJO									
Derecha	15	114.73	193.97	114.74	193.97	-0.01	-0.01	<1 %	<1 %
Eje	17	114.57	193.76	114.58	193.76	-0.01	0.00	<1 %	<1 %
Izquierda	19	114.41	193.55	114.41	193.55	0.00	0.00	<1 %	<1 %
CANAL DE CONEXIÓN									
Derecha	20	114.65	194.03	114.67	194.04	-0.02	-0.01	<1 %	<1 %
Eje	22	112.56	195.32	112.58	195.33	-0.01	-0.01	<1 %	<1 %
Izquierda	23	114.33	193.62	114.35	193.61	-0.02	0.00	<1 %	<1 %
CANAL DE AFORO									
Derecha	24	112.33	198.26	112.35	198.26	-0.02	0.00	<1 %	<1 %
Eje	26	111.64	198.27	111.66	198.27	-0.01	0.00	<1 %	<1 %
Izquierda	27	110.19	194.86	110.2	194.86	-0.01	0.01	<1 %	<1 %

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

TABLA 4.9: COMPARACIÓN ENTRE LAS COTAS DEL MODELO CONSTRUIDO Y LAS DEL PROTOTIPO

COMPROBACIÓN DE COTAS MODELO RÁPIDA ESCALONADA					
Descripción	Punto	Niveles		Desviación	Diferencia (%)
		Z	Z	Z	Z (%)
Túnel	1	5.86	5.86	0	<1 %
	2	5.846	5.845	0.002	<1 %
	3	5.817	5.816	0.001	<1 %
Cuenca aguas arriba	5	5.788	5.787	0.001	<1 %
Rápida escalonada	9	5.755	5.753	0.002	<1 %
	11	1.288	1.286	0.002	<1 %
Cuenca aguas abajo	17	1.142	1.141	0.001	<1 %
Canal de conexión	22	1.228	1.227	0.001	<1 %

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Los respectivos cuadros comparativos que se reportan en este numeral, permiten concluir que las desviaciones en coordenadas x,y de la implantación y en cotas de la nivelación del modelo físico, corresponden a diferencias aceptables en el orden del 1 % o menores. De este modo, el modelo de la Rápida Escalonada construido en el Laboratorio del CIERHI cumple con la similitud geométrica.

4.3.2 COMPROBACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FLUJO PARA LA SIMILITUD RESTRINGIDA

Como se mencionó en la sección 3.5.2, con el propósito de obtener resultados experimentales válidos en el modelo de la rápida escalonada, es necesario verificar el cumplimiento de la similitud restringida según el criterio de Froude ($Fr_P = Fr_m$). Se debe entonces comprobar que los efectos de las fuerzas viscosas y de tensión superficial sean despreciables respecto de las fuerzas de gravedad y de inercia, así como ocurre en el fenómeno considerado en el prototipo.

El requerimiento para que el efecto de la viscosidad sea despreciable en el modelo consiste en mantener un flujo con turbulencia totalmente desarrollada; es decir, se debe mantener

$Re > 2 \times 10^4$. Para minimizar el efecto de la tensión superficial en el modelo, adicionalmente, la profundidad de agua medida debe ser siempre mayor a 2 cm.

En el siguiente cuadro se presentan los valores del parámetro adimensional Froude obtenido para el flujo de aproximación, en cada una de las diferentes pruebas. Los cálculos respectivos se presentan en el Anexo 4.

TABLA 4.10: COMPARACIÓN Y DESVIACIÓN PORCENTUAL ENTRE LOS NÚMEROS DE FROUDE (Fr) EN PROTOTIPO Y EN MODELO

NÚMEROS DE FROUDE (Fr)				
PRUEBA	Q (m ³ /s)	Fr _P	Fr _m	Desviación (%)
P-1	44.9	2.00	2.02	0.90 %
P-2	20.8	2.09	2.07	-1.14 %
P-3	8.9	2.05	1.97	-4.10 %

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Como se observa en la tabla 4.10, los valores del Número de Froude (Fr) están cercanos a 2, tanto en el modelo como en el correspondiente prototipo, por lo que se trata de un flujo supercrítico estable.

El cálculo del Número de Reynolds (Re) se obtiene considerando como longitud característica 4 veces el radio hidráulico ($L = 4 R_h$). A continuación se presentan los valores del Número de Reynolds y el factor de fricción para el flujo de aproximación en cada una de las diferentes pruebas. Los cálculos respectivos se presentan en el Anexo 4.

TABLA 4.11: COMPARACIÓN ENTRE LOS NÚMEROS DE REYNOLDS (Re) MEDIDOS EN PROTOTIPO Y EN MODELO

NÚMEROS DE REYNOLDS (Re)			
PRUEBA	Q (m ³ /s)	Re _P	Re _m
P-1	44.91	2.62E+07	2.93E+05
P-2	20.76	1.43E+07	1.60E+05
P-3	8.98	7.35E+06	8.14E+04

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

De la tabla 4.11 se concluye, que para cada una de las pruebas, los valores de Reynolds

superan la condición de 2×10^4 lo que indica que en todos los casos el comportamiento del flujo en el modelo se desarrolla en el rango turbulento. Por consiguiente, los efectos de viscosidad son despreciables respecto a aquellos de la inercia y de la gravedad.

En la evaluación del coeficiente de resistencia al movimiento λ para la ecuación de Darcy-Weisbach, que como se indicó en el capítulo 3 deberá ser igual o muy semejante entre modelo y prototipo, para garantizar la representación apropiada del efecto viscoso respecto de las pérdidas de energía, se obtienen los valores indicados en la tabla 4.12, en el cual se observa que en el rango de los caudales a ser ensayados en los dos modelos, las desviaciones entre los coeficientes de fricción son menores al 10%; con excepción de flujo con los caudales bajos, inferiores o iguales a $8 \text{ m}^3/\text{s}$, donde cada modelo evidentemente sobrevalora en un 12% el efecto de la viscosidad respecto de la pérdida continua de energía.

TABLA 4.12: COMPARACIÓN ENTRE LOS FACTORES DE FRICCIÓN (λ) DE PROTOTIPO Y MODELO DE LA RÁPIDA ESCALONADA

Q (m ³ /s)	Prototipo ($\varepsilon_P=1\text{mm}$)		Modelo ($\varepsilon_m=0.0015\text{mm}$)		Desv. (%)
150	$\varepsilon/4Rh$	0.00017	$\varepsilon/4Rh$	liso	9.7 %
	Re	5.56E+07	Re	6.28E+05	
	λ	0.013	λ	0.012	
75	$\varepsilon/4Rh$	0.00022	$\varepsilon/4Rh$	liso	7.0 %
	Re	3.73E+07	Re	4.19E+05	
	λ	0.014	λ	0.013	
44.91	$\varepsilon/4Rh$	0.00027	$\varepsilon/4Rh$	liso	4.4 %
	Re	2.62E+07	Re	2.93E+05	
	λ	0.015	λ	0.014	
8.98	$\varepsilon/4Rh$	0.00059	$\varepsilon/4Rh$	liso	-11.8 %
	Re	7.35E+06	Re	8.16E+04	
	λ	0.017	λ	0.019	

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

El Número de Weber se obtiene tomando en cuenta a la profundidad de flujo como longitud característica. De igual modo, la escala del modelo fue seleccionada considerando que la profundidad de agua medida en modelo debe ser siempre mayor a 2 cm.

A continuación se indican los valores para el flujo de aproximación en cada una de las diferentes pruebas. Los cálculos respectivos se presentan en el Anexo 4.

TABLA 4.13: COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE LOS NÚMEROS ADIMENSIONALES DE WEBER (We) EN PROTOTIPO Y EN MODELO

NÚMEROS DE WEBER (We)			
PRUEBA	Q (m^3/s)	We_p	We_m
P-1	44.91	3068	154
P-2	20.76	1928	96
P-3	8.98	1157	57

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

De la tabla 4.13 se concluye que el número de Weber en modelo es siempre mucho menor que el correspondiente en prototipo; sin embargo los valores obtenidos, aun para el caudal inferior en el rango seleccionado para la fase de validación del modelo, es mayor al valor del número de Weber crítico definido igual a 50, que corresponde al valor del número adimensional de Weber evaluado para una profundidad de agua igual a 2 cm en el modelo. No obstante, el Weber igual a 57 (para el caudal mínimo ensayado en las pruebas de validación) se aproxima al valor crítico existiendo así una incidencia ligera de la tensión superficial (Anexo 4). En este caso, se agregará una pequeña cantidad de jabón líquido para reducir la tensión superficial del agua en la operación del modelo, cuando se realicen las pruebas con estos caudales mínimos.

4.4 CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS TRIANGULARES

Se han determinado experimentalmente los valores del coeficiente de descarga (α) y del exponente (β) para la carga (h) que intervienen en la expresión general del caudal de vertido (Q) a través de un vertedero triangular de pared delgada, con ángulo central de 90° .

La función que se busca tiene la siguiente forma:

$$Q = \alpha * h^\beta \quad (4.1)$$

Para el presente tipo de vertedero triangular viene expresada de la forma:¹

$$Q = Cd * h^{5/2} \quad (4.2)$$

$$Cd = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} * \mu \quad (4.3)$$

Donde:

Q : Caudal. [m^3/s]

Cd : Coeficiente de descarga.

g : Aceleración de la gravedad. [m/s^2]

μ : Factor que considera el efecto de contracción de la lámina vertiente sobre el vertedero.

h : Carga sobre la cresta del vertedero. [m]

En la literatura técnica se reportan varias expresiones experimentales para determinar el coeficiente de gasto adimensional o dimensional, μ o Cd respectivamente, aplicables a la ecuación anteriormente mencionada. Tomando en consideración la gama de caudales requerida para la operación de los modelos en la investigación, se utilizan dos ecuaciones: la propuesta por Hegly (1921) y la propuesta por la Universidad Católica de Chile² para validar la curva de descarga obtenida experimentalmente en el laboratorio. A continuación se presentan las ecuaciones y los límites de aplicación de cada una de las dos ecuaciones citadas.

- Hegly:

$$\mu = \left[0,5812 + \frac{0,00375}{h}\right] * \left\{1 + \left[\frac{h^2}{B + (h + w)}\right]^2\right\} \quad (4.4)$$

¹Sotelo, G. (1997). "Hidráulica General". México. Editorial Limusa.

²Sotelo, G. (1997). "Hidráulica General". México. Editorial Limusa.

TABLA 4.14: LÍMITES DE APLICACIÓN DE HEGLY

θ (°) =	90
h (m) =	0.10 - 0.50
w (m) =	pequeño

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Donde:

μ : Factor que considera el efecto de contracción de la lámina vertiente sobre el vertedero.

h : Carga sobre la cresta del vertedero. [m]

B : Ancho del vertedero. [m]

w : Altura de la cresta del vertedero. [m]

θ : Ángulo del vertedero. [°]

- Universidad Católica de Chile

$$Cd = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} \tan(\theta/2) \mu K \quad (4.5)$$

TABLA 4.15: LÍMITES DE APLICACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

θ (°) =	15-120
w (m) =	No tiene influencia en el coeficiente de gasto

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Donde:

Cd : Coeficiente de descarga.

g : Aceleración de la gravedad. [m/s^2]

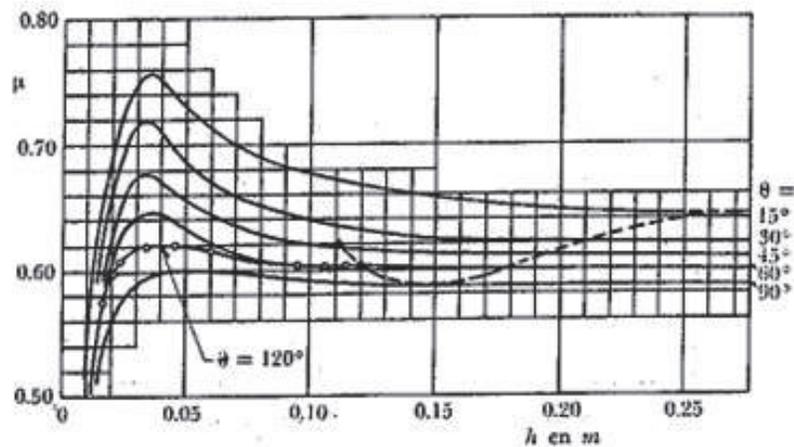
θ : Ángulo del vertedero. [°]

μ : Factor que considera el efecto de contracción de la lámina vertiente sobre el vertedero.

K : Valor adimensional para vertederos triangulares.

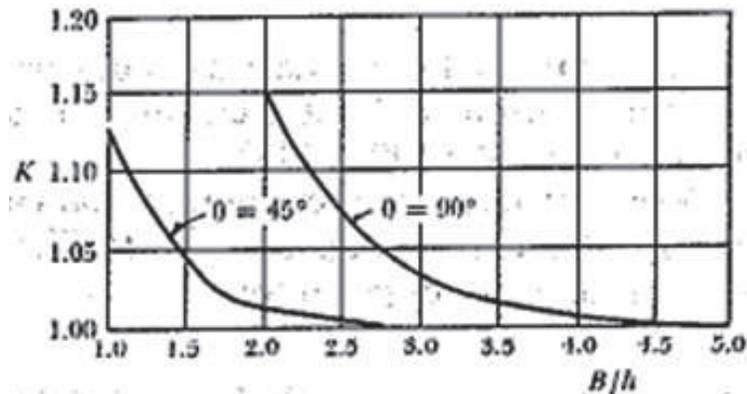
w : Altura de la cresta del vertedero. [m]

FIGURA 4.19: COEFICIENTE DE GASTO μ DE VERTEDEROS TRIANGULARES EN LA FÓRMULA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE



FUENTE: Sotelo, G. (1997). "Hidráulica General". México. Editorial Limusa

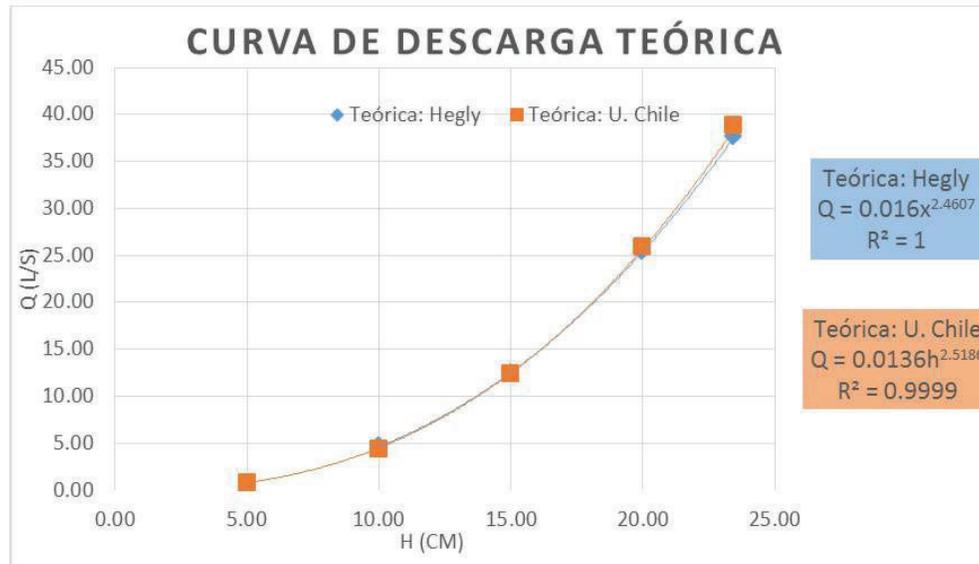
FIGURA 4.20: VALORES DE K EN LA FÓRMULA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE PARA VERTEDEROS TRIANGULARES



FUENTE: Sotelo, G. (1997). "Hidráulica General". México. Editorial Limusa

Los cálculos obtenidos con estas ecuaciones teóricas se presentan en el Anexo 4

FIGURA 4.21: CURVA DE DESCARGA EXPERIMENTAL Y GRÁFICOS DE LAS ECUACIONES DE TENDENCIA OBTENIDAS CON LAS ECUACIONES DE HEGLY Y DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE PARA VERTEDEROS TRIANGULARES



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

La determinación experimental de la curva de descarga para los vertederos triangulares de aforo se realiza midiendo simultáneamente el caudal Q descargado libremente y la carga h correspondiente, en una sección transversal suficientemente alejada de la sección de implantación de la estructura, de tal manera que no exista influencia de curvatura de la superficie libre que resulta de la aceleración del flujo provocada por el vertedero. El valor medido de la carga se obtiene mediante la diferencia entre la altura de la superficie libre del agua en la sección de aforo y la altura de la cresta del vertedero (h). El caudal se lo obtiene a través de aforos volumétricos. Este procedimiento se repite por 3 ocasiones para cada uno de los 5 caudales ensayados. El registro de los datos obtenidos en el laboratorio se señala en el Anexo 4.

El aforo volumétrico se realiza recogiendo el caudal descargado por el vertedero en un depósito plástico de volumen conocido y tomando simultáneamente el tiempo que demora en llenarse. El volumen (V) descargado en los ensayos de pequeño caudal, se determina en forma precisa con la ayuda de la probeta graduada de 1 litro; mientras que el tiempo (t) se mide con un cronómetro. El caudal se obtiene al dividir el volumen de agua por el tiempo ($Q = V/t$).

FIGURA 4.22: AFORO VOLUMÉTRICO PARA EL VERTEDERO TRIANGULAR

ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

TABLA 4.16: DATOS OBTENIDOS DEL AFORO VOLUMÉTRICO DEL VERTEDERO TRIANGULAR

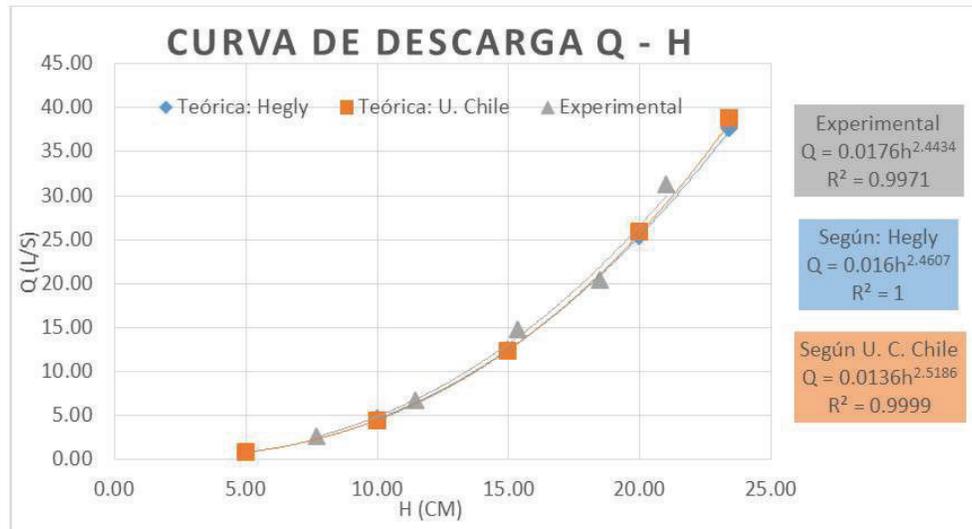
No	$h_{promedio}$ (cm)	$Q_{promedio}$ (l/s)
1	7.69	2.60
2	11.46	6.65
3	15.38	14.73
4	18.51	20.36
5	21.01	31.27

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 4.23: CURVA DE DESCARGA EXPERIMENTAL Y ECUACIÓN DE TENDENCIA OBTENIDA DEL AFORO VOLUMÉTRICO PARA LOS VERTEDEROS TRIANGULARES INSTALADOS PARA AFORAR LAS DESCARGAS DEL MODELO CONSTRUIDO

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 4.24: COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE LAS CURVAS DE DESCARGA DE LA LITERATURA TÉCNICA Y LA EXPERIMENTAL PARA LOS VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED DELGADA Y ÁNGULO CENTRAL $\theta = 90^\circ$



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

En la figura 4.24 se observa que los valores experimentales obtenidos tienen un buen ajuste con los valores calculados con las ecuaciones de Hégly y de la Universidad Católica de Chile. La ecuación de ajuste a los valores experimentales corresponde a $Q = 0,0176h^{2,4434}$ con un coeficiente $R^2 = 0,9971$.

En adelante, se utilizará esta ecuación para la determinación de los valores de caudal (Q) en función de los valores medidos de la carga (h) sobre el vertedero triangular de pared delgada con ángulo central $\theta = 90^\circ$. En el Cuadro 4.17 se muestra la variación porcentual entre los caudales evaluados con la ecuación experimental y aquellos que se obtienen con las relaciones de la literatura técnica.

TABLA 4.17: DATOS OBTENIDOS DEL AFORO VOLUMÉTRICO DEL VERTEDERO TRIANGULAR

h(cm)	Hegly	U.Chile	Aforo volumétri- co	Respecto a Hegly	Respecto a U.Chile
	Qteórico (l/s)	Qteórico (l/s)	Qexperimental (l/s)	Desviación (%)	Desviación (%)
5	-	0.79	0.90	-	13.36 %
10	4.62	4.42	4.89	5.69 %	10.47 %
15	12.49	12.31	13.16	5.39 %	6.91 %
20	25.39	25.86	26.57	4.67 %	2.75 %
23.43	37.57	38.74	39.12	4.11 %	0.96 %

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Como se observa en el cuadro anterior, existe una desviación menor al 6 % cuando se comparan los valores de la curva experimental con aquellos obtenidos con la ecuación de Hégly. Es evidente que la ecuación de la Universidad Católica de Chile tiene un ajuste con menor aproximación, justamente en las cargas pequeñas sobre el vertedero, dado que no considera la incidencia importante del valor de altura de paramento w (ubicación del vértice del vertedero triangular respecto del fondo del canal) sobre el patrón de flujo para cargas pequeñas. Se concluye que la curva experimental obtenida es por consiguiente, adecuada para la determinación de los caudales en función de las cargas medidas sobre los vertederos triangulares de pared delgada con ángulo central $\theta = 90^\circ$ utilizados como aforadores en el modelo de la rápida escalonada.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL

5.1 PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL

El modelo físico de la Rápida Escalonada con el diseño original es analizado conforme al plan de pruebas propuesto en el Cuadro 5.1. Se considera un apropiado rango de caudales correspondiente a valores bajos (los más frecuentes como caudales de operación de la estructura), caudales intermedios y caudales altos respecto del caudal de diseño de las obras en prototipo.

TABLA 5.1: PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL

PRUEBA	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	FASE DE INVESTIGACIÓN	OBSERVACIONES
P-1	10	5.59	Análisis experimental diseño original	Caudal bajo (caudales más frecuentes)
P-2	40	22.36	Análisis experimental diseño original	Caudales intermedios (≈30 % del caudal de diseño de la estructura)
P-3	60	33.54	Análisis experimental diseño original	Caudales intermedios (≈40 % del caudal de diseño de la estructura)
P-4	80	44.72	Análisis experimental diseño original	Caudal intermedio (50 % del caudal de diseño de la estructura)
P-5	100	55.90	Análisis experimental diseño original	Caudal alto (70 % del caudal de diseño de la estructura)
P-6	150	83.85	Análisis experimental diseño original	Caudal alto (caudal de diseño de la estructura)

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

5.2 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO

En las siguientes imágenes se observan las principales características del comportamiento del flujo para cada una de las pruebas descritas anteriormente.

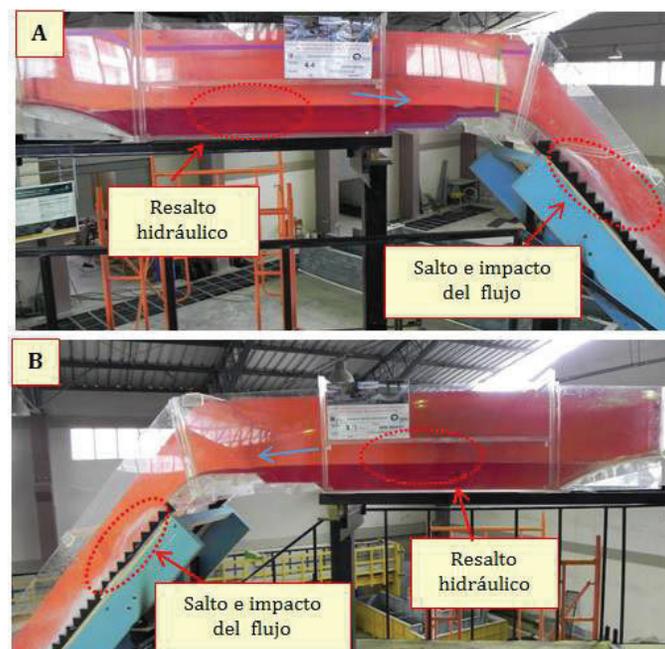
i) **PRUEBA P-1** $Q_T(\text{Prototipo}) = 8.09 \text{ (m}^3/\text{s)}$; $Q_T(\text{Modelo}) = 4.52 \text{ (l/s)}$

FIGURA 5.1: PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA EN EL TRAMO CURVO (A) E INTERNA DESDE AGUAS ARRIBA EN EL TRAMO FINAL (B) DEL TÚNEL BAÚL. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$



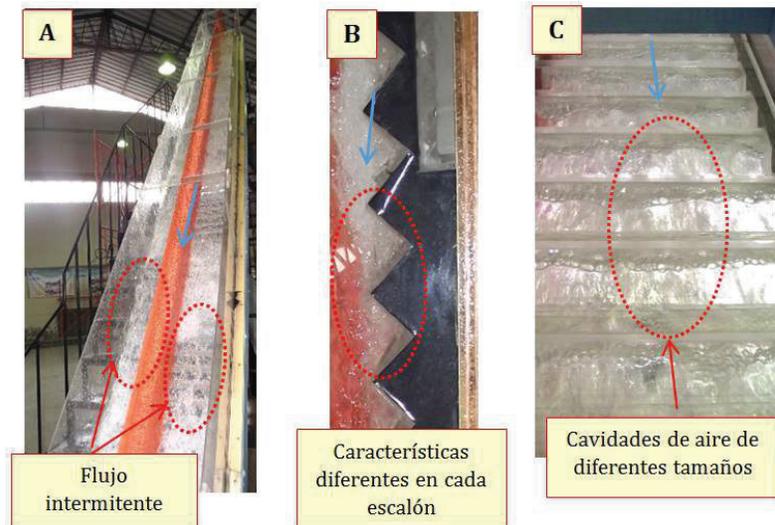
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.2: PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1 Y DE INICIO DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$



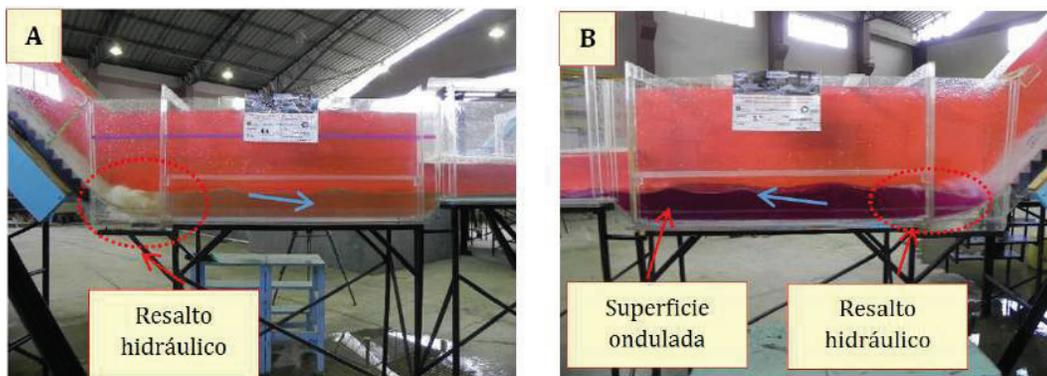
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.3: PRUEBA 1. VISTA FRONTAL (A), LATERAL IZQUIERDA (B) Y POSTERIOR (C) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.4: PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

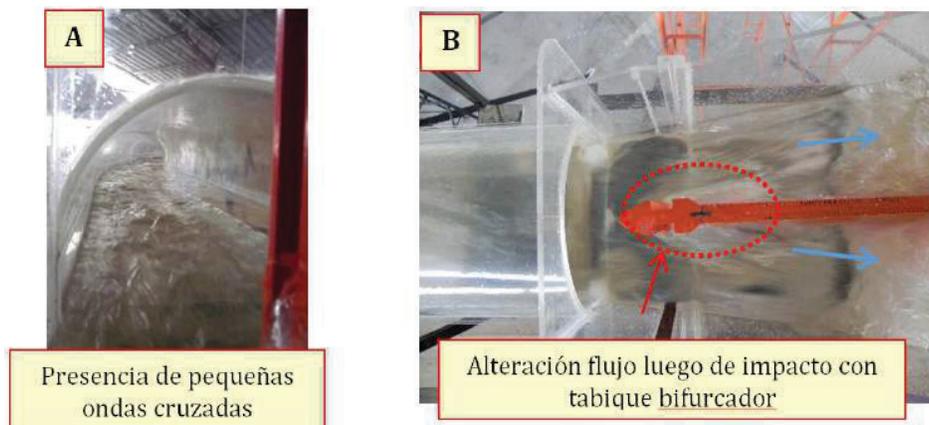
Observaciones:

- Presencia de pequeñas ondas cruzadas y sobre elevación de la superficie del agua en la pared externa del túnel baúl por efecto de la curvatura en el trazado en planta.
- Impacto frontal del flujo con el tabique bifurcador ubicado en el inicio de la transición, que provoca formación de ondas y alteración en el flujo.

- Formación de resalto sumergido en el dissipador 1, tanto en la celda izquierda como en la derecha.
- Aguas abajo del tramo inicial de la rápida escalonada que presenta un desarrollo con perfil parabólico, el flujo impacta en el 1er escalón y salta hasta llegar a impactar nuevamente desde el quinto escalón hasta el noveno.
- Flujo intermitente a lo largo de la rápida escalonada en las dos celdas. Presencia de cavidades de aire de diversos tamaños en el flujo, que llena parcialmente los espacios bajo el pseudo-fondo. No se observa la formación de flujo rasante. (Figura 5.3)
- Formación de resalto sumergido en el dissipador 2, tanto en la celda izquierda como en la derecha.
- Ondas superficiales relativamente importantes y flujo con fluctuaciones hacia aguas abajo del resalto hidráulico formado en el cuenco dissipador 2.

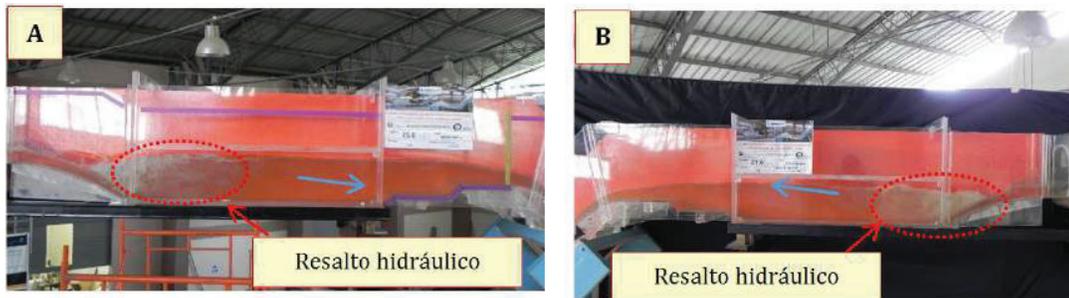
ii) PRUEBA P-2 $Q_T(\text{Prototipo}) = 46.51(\text{m}^3/\text{s})$; $Q_T(\text{Modelo}) = 26.05 (\text{l/s})$

FIGURA 5.5: PRUEBA 2. VISTA INTERNA DESDE AGUAS ABAJO LUEGO DE TRAMO CURVO DE TÚNEL BAÚL (A). VISTA SUPERIOR DE TRANSICIÓN (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$



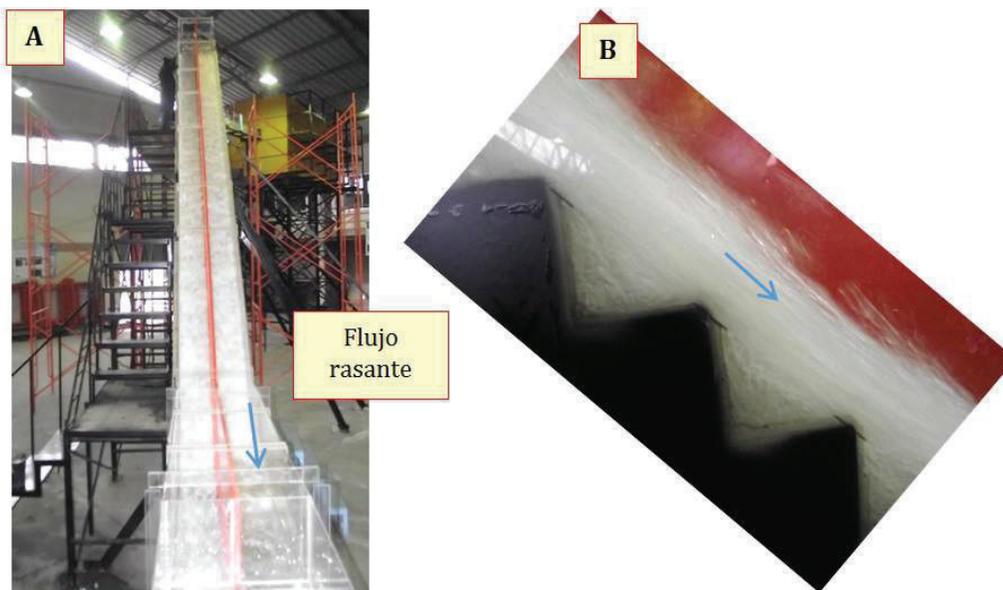
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.6: PRUEBA 2. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR
1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$



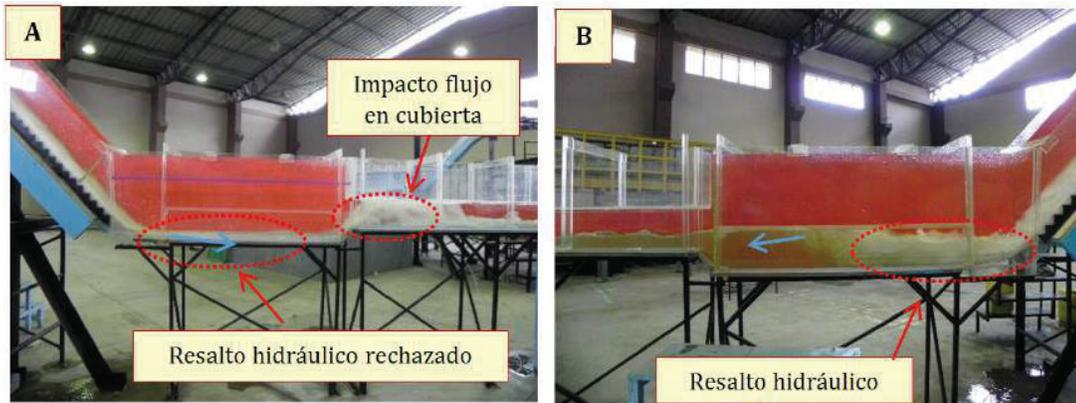
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.7: PRUEBA 2. VISTA FRONTAL (A) Y LATERAL DERECHA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA.
DA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.8: PRUEBA 2. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$



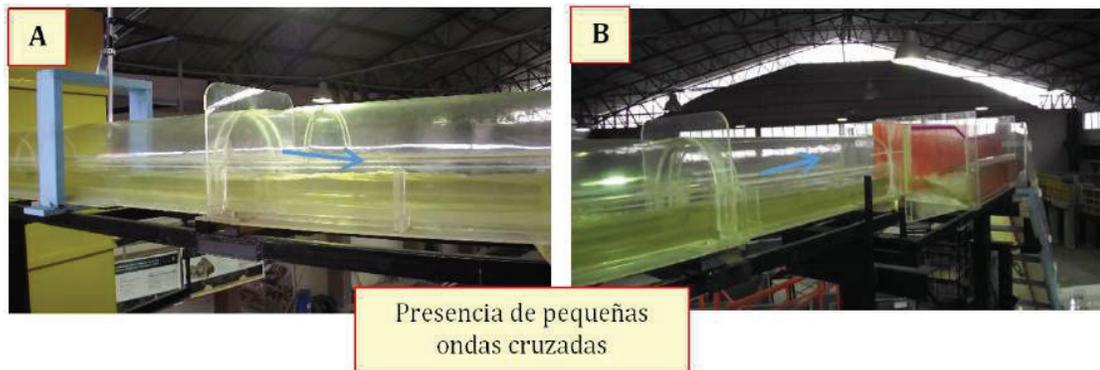
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

Observaciones:

- Presencia de pequeñas ondas cruzadas y sobre elevación de la superficie del agua en la pared externa del túnel baúl por efecto de la curvatura.
- Impacto frontal del flujo con el tabique bifurcador ubicado en el inicio de la transición, que provoca formación de ondas y alteración del flujo en la transición.
- Formación de resalto sumergido en el dissipador 1, tanto en la celda izquierda como en la derecha.
- Aguas abajo del perfil parabólico de la rápida escalonada, se observa el inicio de ingreso de aire en el tercer escalón. Se observa la formación de flujo rasante estable a lo largo de la rápida escalonada en las dos celdas.
- Formación de resalto sumergido solamente en la celda izquierda del cuenco dissipador 2, aguas abajo del mismo se aprecian ondas superficiales y fluctuación en el flujo de salida.
- Se rechaza el resalto en la celda derecha del cuenco dissipador 2. El flujo con alta velocidad impacta en la tapa superior del canal de salida, produciendo un comportamiento de flujo inaceptable hacia aguas abajo.

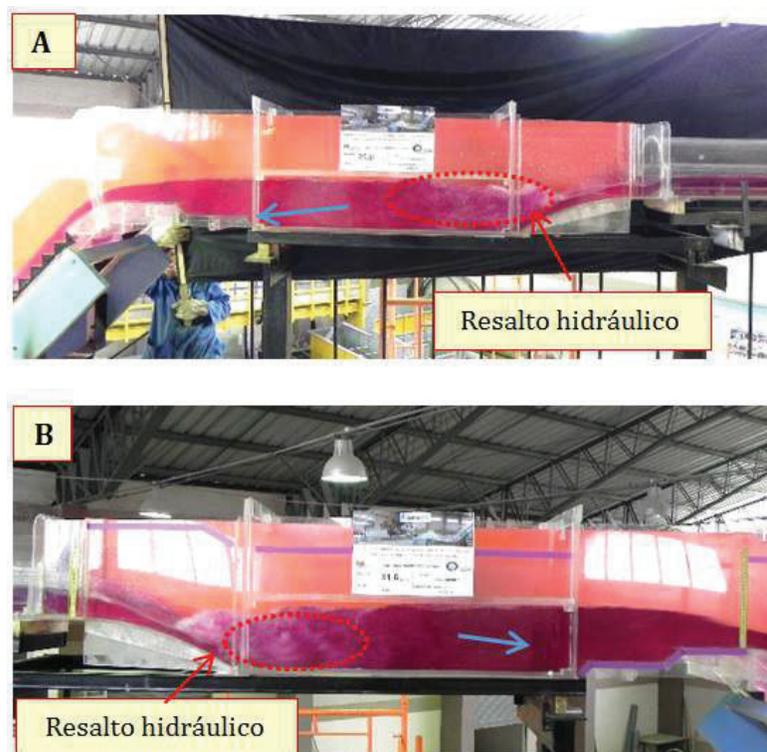
iii) PRUEBA P-3 $Q_T(\text{Prototipo}) = 56.55 \text{ (m}^3/\text{s)}$; $Q_T(\text{Modelo}) = 31.61 \text{ (l/s)}$

FIGURA 5.9: PRUEBA 3. VISTA LATERAL DERECHA AGUAS ARRIBA (A) Y AGUAS ABAJO (B) DEL TRAMO CURVO DEL TÚNEL BAÚL. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$



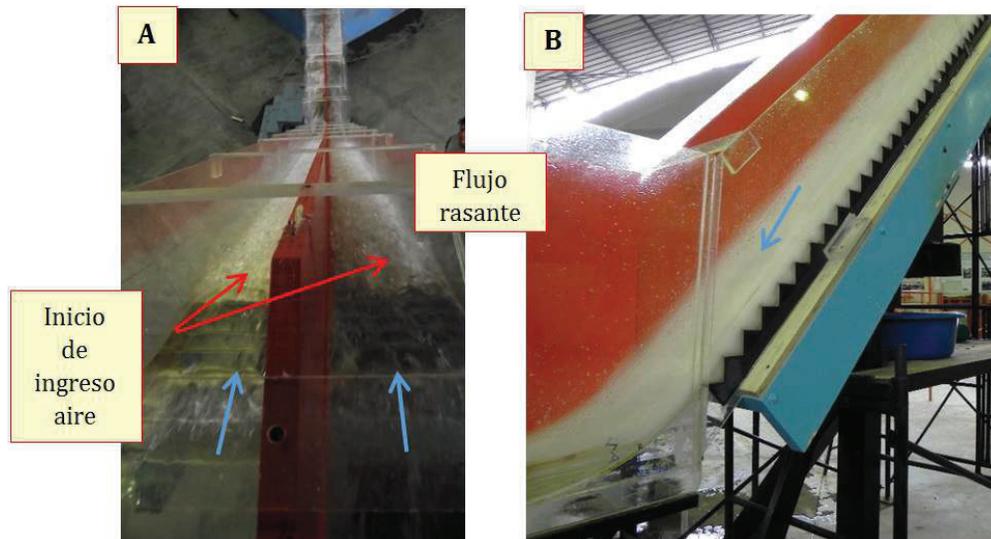
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.10: PRUEBA 3. VISTA LATERAL IZQUIERDA (A) Y DERECHA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$



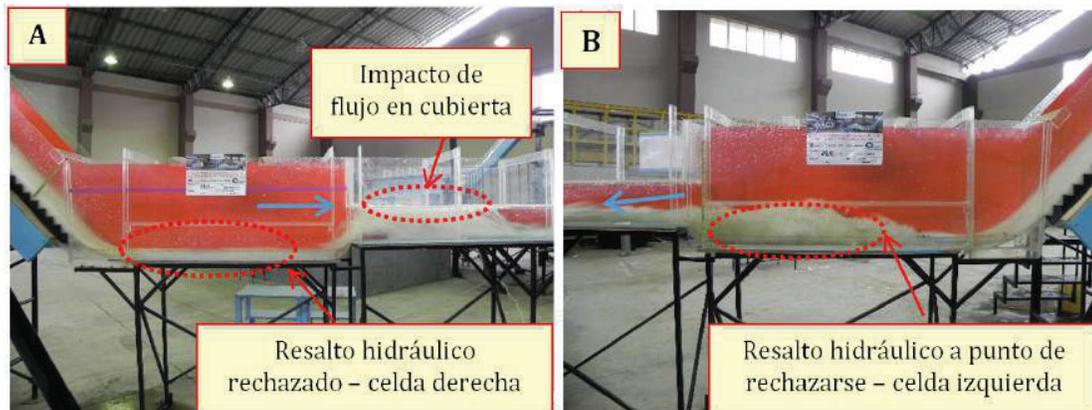
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.11: PRUEBA 3. VISTA SUPERIOR DESDE AGUAS ARRIBA (A) Y VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL TRAMO FINAL (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.12: PRUEBA 3. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DEL CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

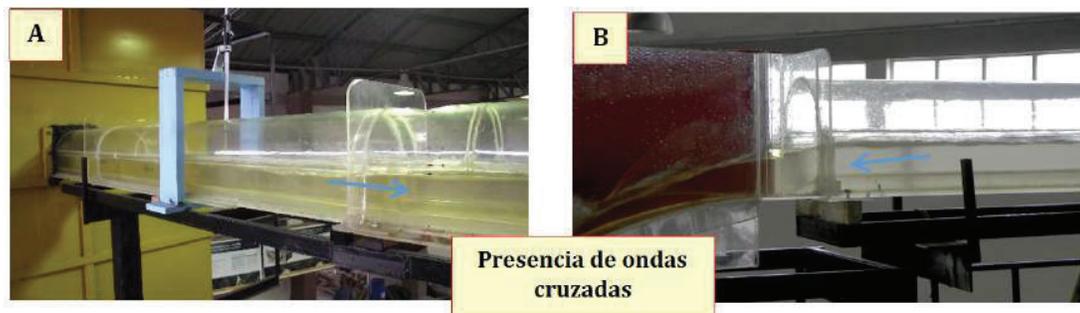
Observaciones:

- Presencia de ondas cruzadas y sobreelevación de la superficie del agua en la pared externa del túnel baúl por efecto de la curvatura.
- Impacto frontal del flujo con el tabique bifurcador ubicado en el inicio de la transición, que provoca formación de ondas y alteración en el flujo.

- Formación de resalto sumergido en el dissipador 1, tanto en la celda izquierda como en la derecha.
- Aguas abajo del perfil parabólico de la rápida escalonada, se observa el inicio de ingreso de aire en el tercer escalón para la celda izquierda y cuarto escalón para la derecha. Se observa la formación de flujo rasante estable a lo largo de la rápida escalonada en las dos celdas.
- Se observa un resalto hidráulico al límite del rechazo en la celda izquierda del dissipador 2, hacia aguas abajo se aprecia la formación de ondas superficiales y una fuerte fluctuación del flujo que continúa por el canal de salida.
- Se rechaza el resalto en la celda derecha del dissipador 2. El flujo con alta velocidad impacta en la tapa superior del canal de salida, produciendo un comportamiento de flujo inaceptable hacia aguas abajo.

iv) **PRUEBA P-4** $Q_T(\text{Prototipo}) = 80.19 \text{ (m}^3/\text{s)}$; $Q_T(\text{Modelo}) = 44.83 \text{ (l/s)}$

FIGURA 5.13: PRUEBA 4. VISTA LATERAL IZQUIERDA ANTES (A) Y LUEGO (B) DEL TRAMO CURVO DEL TÚNEL BAÚL. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$



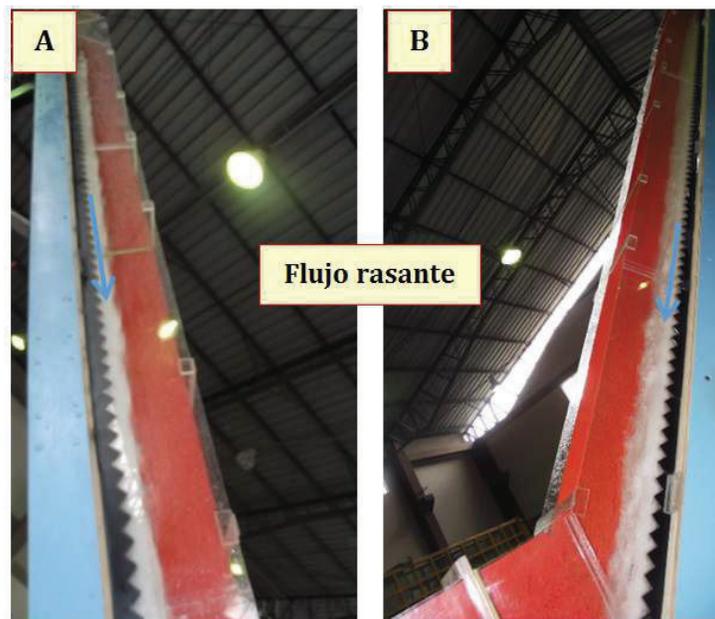
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.14: PRUEBA 4. VISTA LATERAL IZQUIERDA (A) Y DERECHA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$



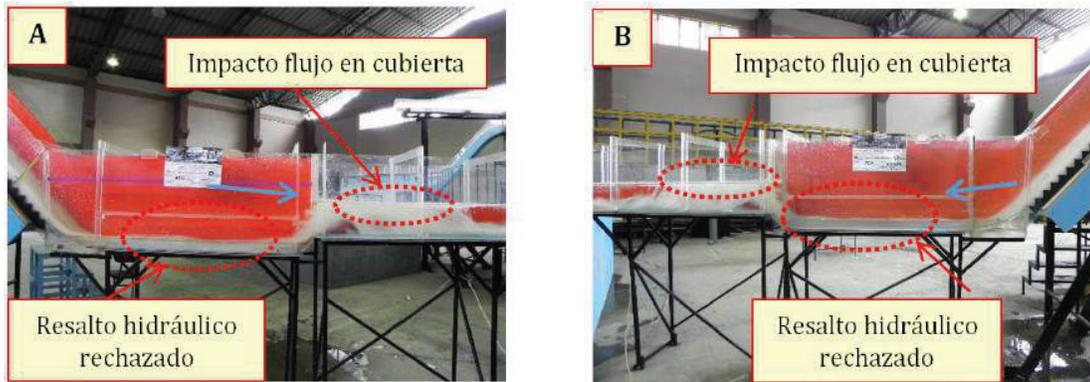
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.15: PRUEBA 4. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.16: PRUEBA 4. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 80.19 \text{ m}^3/\text{s}$



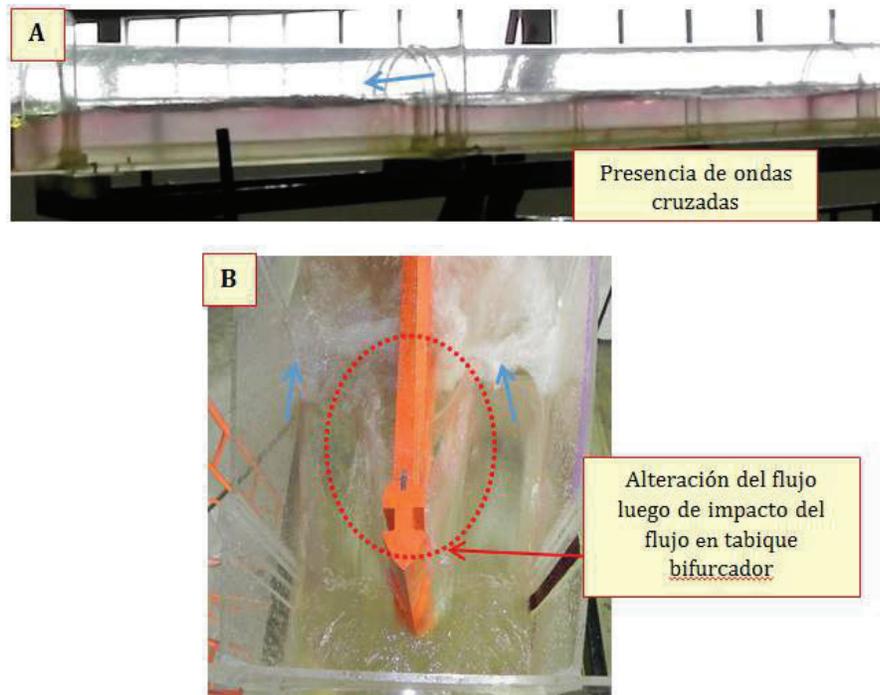
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

Observaciones:

- Presencia de ondas cruzadas y sobreelevación de la superficie del agua en la pared externa del túnel baúl por efecto de la curvatura.
- Impacto frontal del flujo con el tabique bifurcador que provoca formación de ondas importantes y fuerte alteración en el flujo de ingreso hacia la transición.
- Formación de resalto sumergido en el dissipador 1, tanto en la celda izquierda como en la derecha.
- Aguas abajo del perfil parabólico de la rápida escalonada, se observa el inicio de ingreso de aire en el cuarto escalón para la celda izquierda y quinto escalón para la derecha. Se observa la formación del flujo rasante estable a lo largo de la rápida escalonada en las dos celdas.
- Se rechaza el resalto en las dos celdas del dissipador 2. El flujo de alta velocidad sale del cuenco dissipador 2 deflectado por el chaflán e impacta en la tapa superior del canal de salida. Luego del choque se produce una fuerte fluctuación aguas abajo.

v) PRUEBA P-5 $Q_T(\text{Prototipo}) = 101.78 \text{ (m}^3/\text{s)}$; $Q_T(\text{Modelo}) = 56.90 \text{ (l/s)}$

FIGURA 5.17: PRUEBA 5. VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL TRAMO FINAL DEL TÚNEL BAÚL (A). VISTA SUPERIOR DE TRANSICIÓN (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



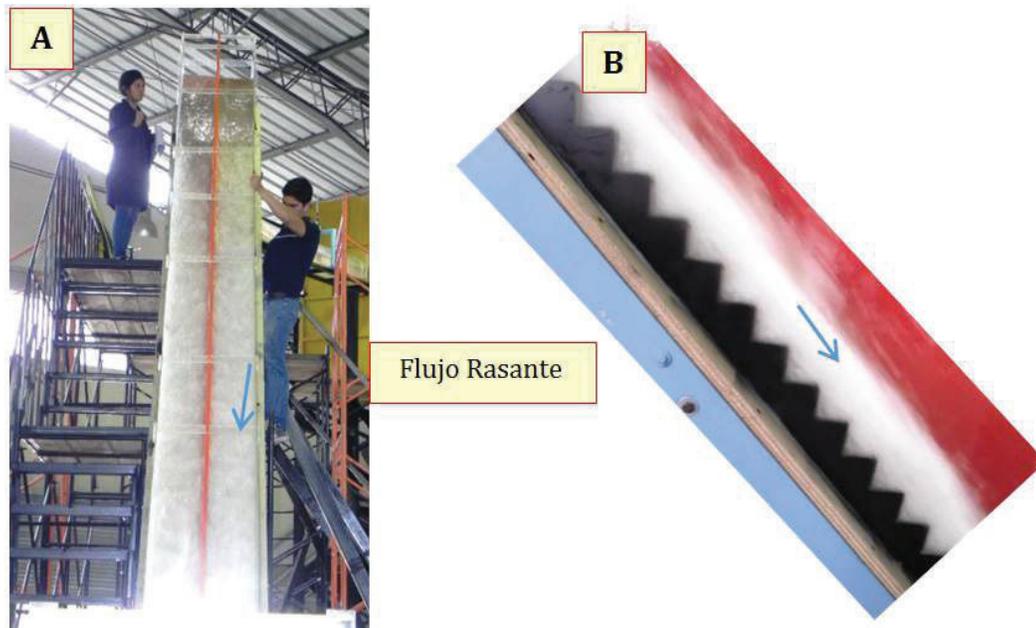
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.18: PRUEBA 5. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



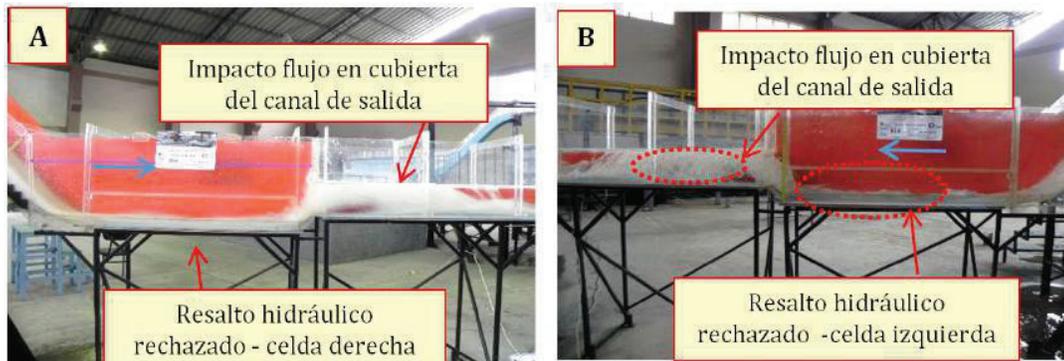
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.19: PRUEBA 5. VISTA FRONTAL (A) Y LATERAL DERECHA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.20: PRUEBA 5. VISTA LATERAL DERECHA (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 2 Y DE INICIO DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

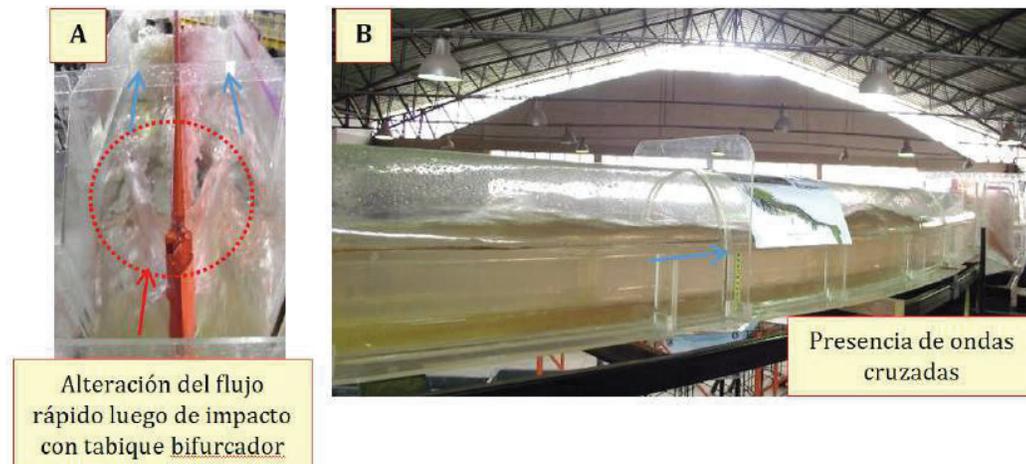
Observaciones:

- Presencia de ondas cruzadas y sobreelevación de la superficie del agua en la pared externa del túnel baúl por efecto de la curvatura.
- Impacto frontal del flujo con el tabique bifurcador que provoca formación de ondas y alteración en el flujo que ingresa a la transición.

- Formación de resalto en la celda izquierda del dissipador 1. Se observa un flujo de aproximación con alta energía cinética y fuertes ondulaciones en la superficie libre que se dirige a la rápida escalonada.
- Formación de resalto en la celda derecha del dissipador 1. Se observa un flujo de aproximación con alta energía cinética y fuertes ondulaciones en la superficie libre que se dirige a la rápida escalonada.
- Aguas abajo del perfil parabólico de la rápida escalonada, se observa el inicio de ingreso de aire en el octavo escalón para la celda izquierda y del décimo escalón para la celda derecha. Se observa la formación de flujo rasante estable a lo largo de las dos celdas de la rápida escalonada.
- Se rechaza el resalto en las dos celdas del dissipador 2. El flujo de alta velocidad impacta en la tapa del canal produciendo un comportamiento hidráulico inaceptable. Luego del choque se genera una fuerte fluctuación aguas abajo.

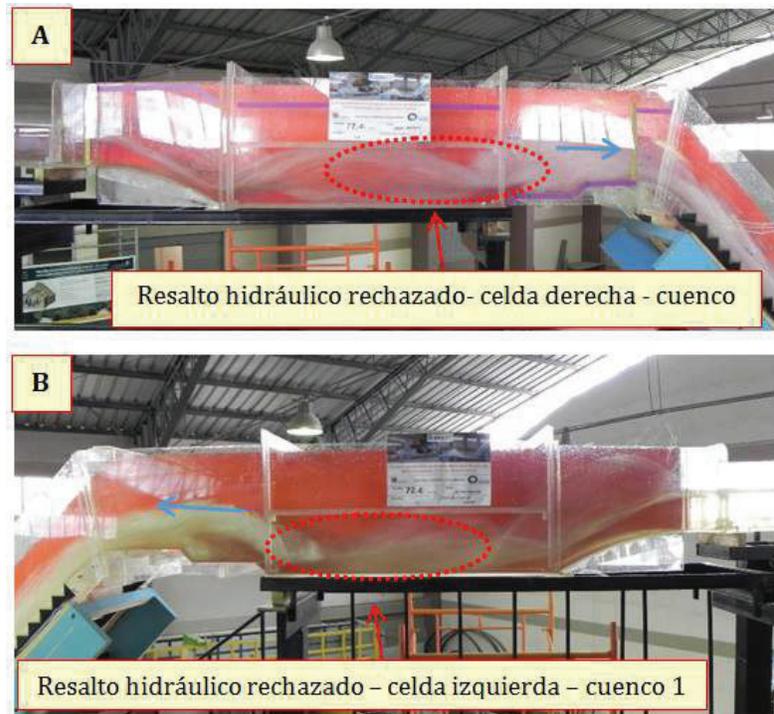
vi) PRUEBA P-6 $Q_T(\text{Prototipo}) = 149.07 \text{ (m}^3/\text{s)}$; $Q_T(\text{Modelo}) = 83.33 \text{ (l/s)}$

FIGURA 5.21: PRUEBA 6. VISTA LATERAL DERECHA DE TÚNEL BAÚL (B). TRANSICIÓN VISTA DESDE AGUAS ARRIBA (A). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.22: PRUEBA 6. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 1. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$



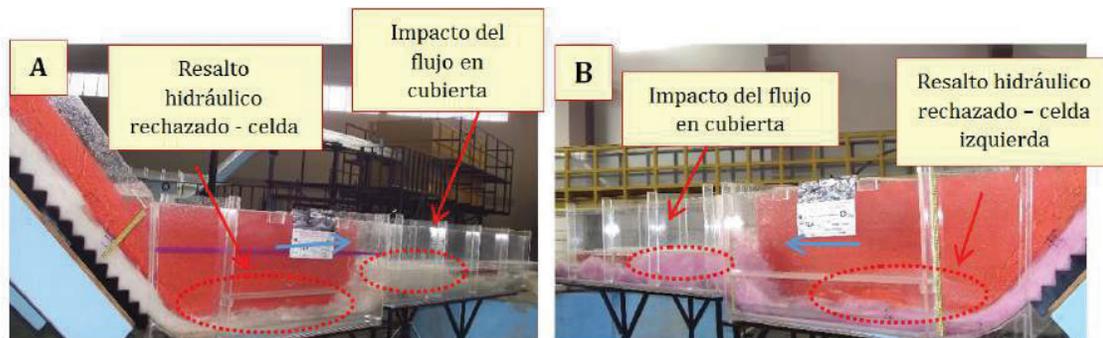
ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.23: PRUEBA 6. VISTA FRONTAL (A) Y LATERAL IZQUIERDA (B) DE RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 5.24: PRUEBA 6. VISTA LATERAL DERECHA (A) E IZQUIERDA (B) DEL CUENCO DISIPADOR 2 Y DE CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

Observaciones:

- Presencia de ondas cruzadas y sobreelevación de la superficie del agua en la pared externa del túnel baúl por efecto de la curvatura.
- Impacto frontal del flujo con el tabique bifurcador que provoca formación de ondas y fuerte alteración en el flujo que ingresa hacia la transición.
- Se rechaza el resalto en las dos celdas del dissipador 1.
- El flujo de entrada a la rápida escalonada tiene un comportamiento desordenado. Se observa la presencia de flujo rasante a lo largo de la rápida escalonada en las dos celdas, lográndose estabilizar en el tercio inferior de esta estructura.
- Se rechaza el resalto en las dos celdas del dissipador 2. El flujo de alta velocidad impacta en la tapa del canal produciendo un comportamiento hidráulico inaceptable. Luego del choque se genera una fuerte fluctuación aguas abajo.

5.3 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ESTRUCTURA DE INGRESO A LA RÁPIDA ESCALONADA

5.3.1 DERIVACIÓN DE CAUDALES POR CELDA

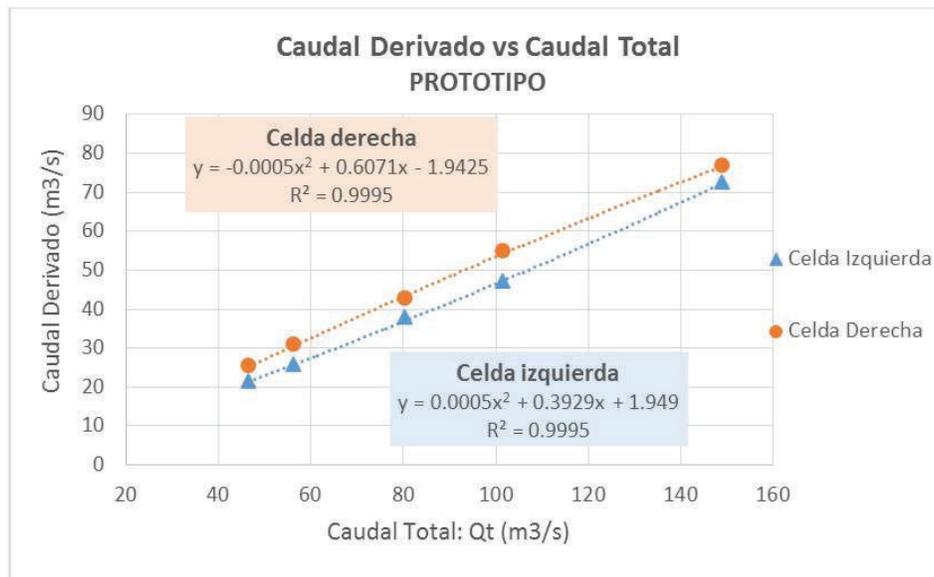
En el siguiente Cuadro 5.2, se indica el caudal total ensayado en las diferentes pruebas y el caudal conducido en cada una de las dos celdas existentes a partir de la transición; se presenta también el porcentaje correspondiente.

TABLA 5.2: CAUDALES TOTALES DE APROXIMACIÓN, CAUDALES DISTRIBUIDOS POR CADA CELDA Y PORCENTAJES CORRESPONDIENTES PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS

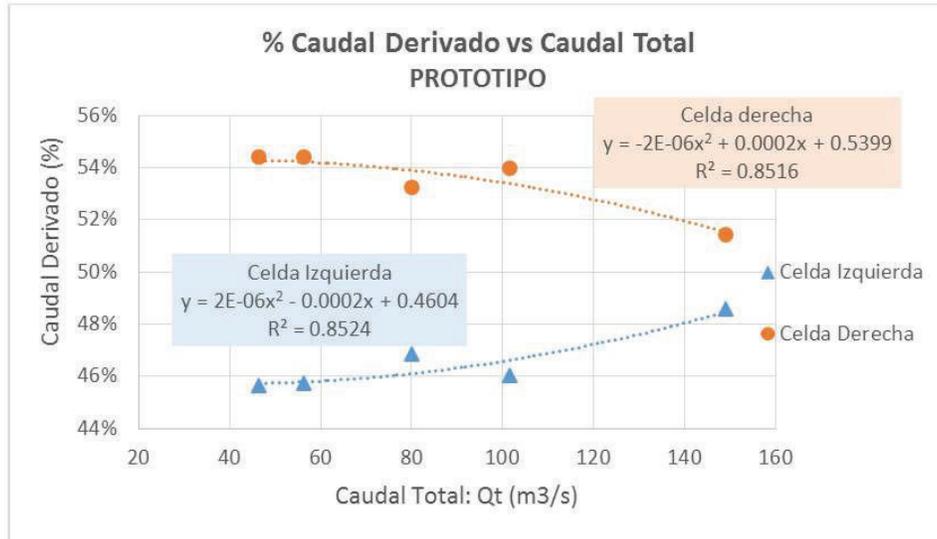
P-No.	CAUDAL TOTAL		CAUDAL DERIVADOS					
	PROT.	MOD.	CELDA IZQUIERDA			CELDA DERECHA		
	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	% DERIV.	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	% DERIV.
1	8.09	4.52	3.73	2.09	46.16 %	4.36	2.44	53.86 %
2	46.61	26.05	21.27	11.89	45.63 %	25.35	14.17	54.39 %
3	56.55	31.61	25.82	14.44	45.66 %	30.73	17.18	54.34 %
4	80.19	44.83	37.55	20.99	46.83 %	42.64	23.84	53.17 %
5	101.78	56.90	46.85	26.19	46.03 %	54.94	30.71	53.98 %
6	149.07	83.33	72.41	40.48	48.58 %	76.66	42.85	51.42 %

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 5.25: CAUDAL DISTRIBUIDO POR CELDA VS EL CAUDAL TOTAL



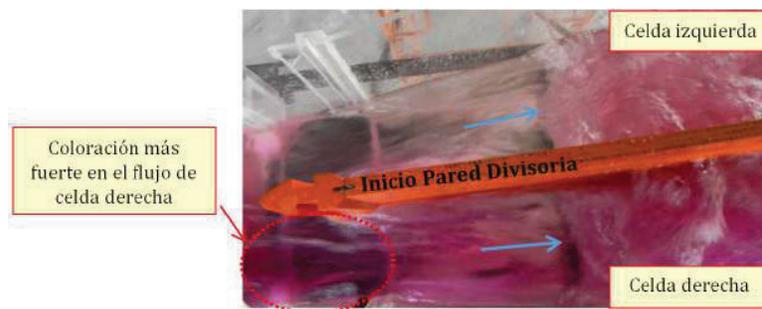
ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 5.26: PORCENTAJE DE CAUDAL DISTRIBUIDO POR CELDA VS EL CAUDAL TOTAL

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Según el Cuadro 5.2 y Figuras 5.25 y 5.26, se demuestra que existe una mayor derivación de caudal hacia la celda derecha para todo el rango de caudales ensayados, con un porcentaje del 51 % al 54 % del caudal total. Se observa que a medida que se va incrementando el caudal, el porcentaje de derivación disminuye relativamente en esta celda; contrario a lo que sucede en la celda izquierda.

Estos resultados registrados experimentalmente en cuanto a la distribución de caudales en cada celda, manifiestan que no existe una completa uniformización del flujo en el túnel de sección baúl, debido esencialmente a la presencia de las ondas cruzadas y al efecto de la curvatura. Como se muestra en la siguiente figura:

FIGURA 5.27: PRUEBA 2. VISTA SUPERIOR FINAL TÚNEL BAÚL – INICIO DIVISIÓN DE LA CONDUCCIÓN EN DOS CELDAS. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$ 

ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

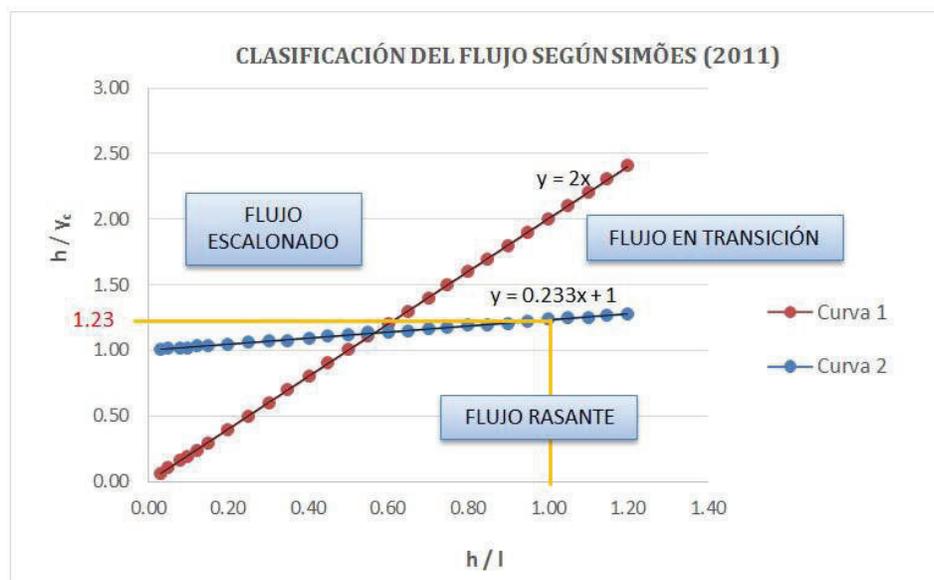
Se aprecia en la figura que existe una coloración más fuerte del permanganato de potasio en el flujo que ingresa hacia la celda derecha, lo cual indica que hay un mayor volumen de agua que se dirige a esta celda por efecto de la curvatura del túnel. Cabe hacer mención que el colorante fue colocado en el eje central del túnel aguas arriba del tramo curvo.

5.4 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA

5.4.1 TIPOS DE FLUJO

Según las recomendaciones de (Simões, 2011), aplicadas al presente caso según las características de la rápida escalonada: ángulo de inclinación de 45° y relación $h/l = 1$; el límite para que se desarrolle el flujo rasante es $h/y_c < 1.23$, Esto corresponde a un caudal en prototipo igual a $11.72 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada celda. A partir de este caudal; teóricamente, se deben presentar las condiciones de flujo rasante estable.

FIGURA 5.28: UBICACIÓN DE LA RELACIÓN h/y_c LÍMITE PARA QUE PRESENTE FLUJO RASANTE CON BASE EN LA CLASIFICACIÓN SEGÚN SIMÕES (2011)



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Mediante la investigación experimental, se determinó cualitativamente el caudal límite para que se produzcan las condiciones de Flujo Rasante Estable, obteniendo como resultado un caudal de $11.45 \text{ m}^3/\text{s}$; muy cercano al valor determinado teóricamente ($11.72 \text{ m}^3/\text{s}$).

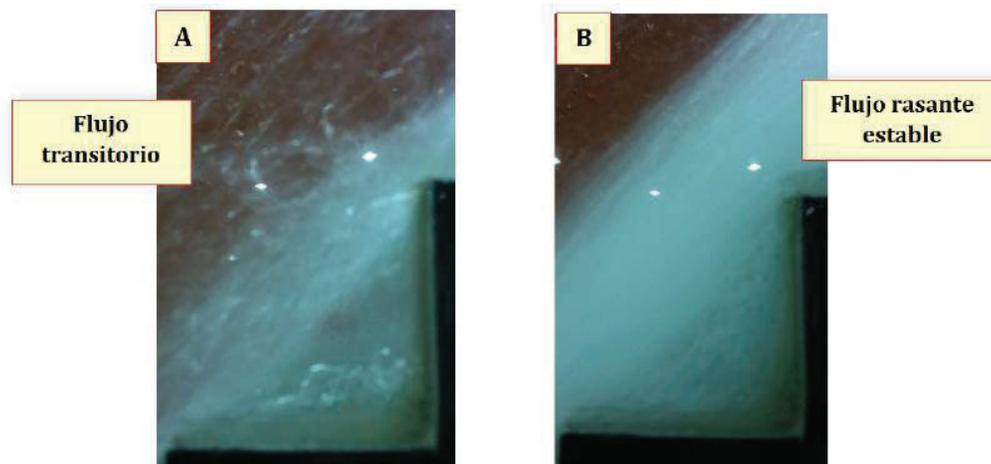
El caudal de $11.45 \text{ m}^3/\text{s}$ es el derivado hacia la celda derecha de un caudal total ensayado de $21.32 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que por la celda izquierda se conduce un caudal menor $9.87 \text{ m}^3/\text{s}$. Con este caudal el flujo se comporta de manera distinta, presenta cambios en sus propiedades de un escalón a otro: cavidades bajo el pseudo-fondo parcialmente llenas, presencia de burbujas de aire de diferentes tamaños debajo de la corriente principal del flujo y vórtices recirculantes en algunos escalones, que son características del estado de flujo transitorio.

TABLA 5.3: PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAUDAL LÍMITE PARA QUE SE ESTABLEZCA FLUJO RASANTE ESTABLE

CAUDAL TOTAL		CAUDAL EN RÁPIDA ESCALONADA			
PROTIPO	MODELO	CELDA IZQUIERDA		CELDA DERECHA	
Q_p (m^3/s)	Q_m (l/s)	Q_p (m^3/s)	Q_m (l/s)	Q_p (m^3/s)	Q_m (l/s)
21.32	11.92	9.87	5.52	11.45	6.40

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 5.29: PRUEBA DETERMINACIÓN DE FLUJO RASANTE. (A) VISTA LATERAL DE UN ESCALÓN DE CELDA IZQUIERDA RÁPIDA ESCALONADA, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 9.87 \text{ m}^3/\text{s}$. (B) VISTA LATERAL DE UN ESCALÓN CELDA DERECHA RÁPIDA ESCALONADA, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 11.45 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

Los tipos de flujo que se distinguieron conforme al plan de pruebas del diseño original son los siguientes:

TABLA 5.4: TIPOS DE FLUJO SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA CONFORME AL PLAN DE PRUEBAS DE DISEÑO ORIGINAL

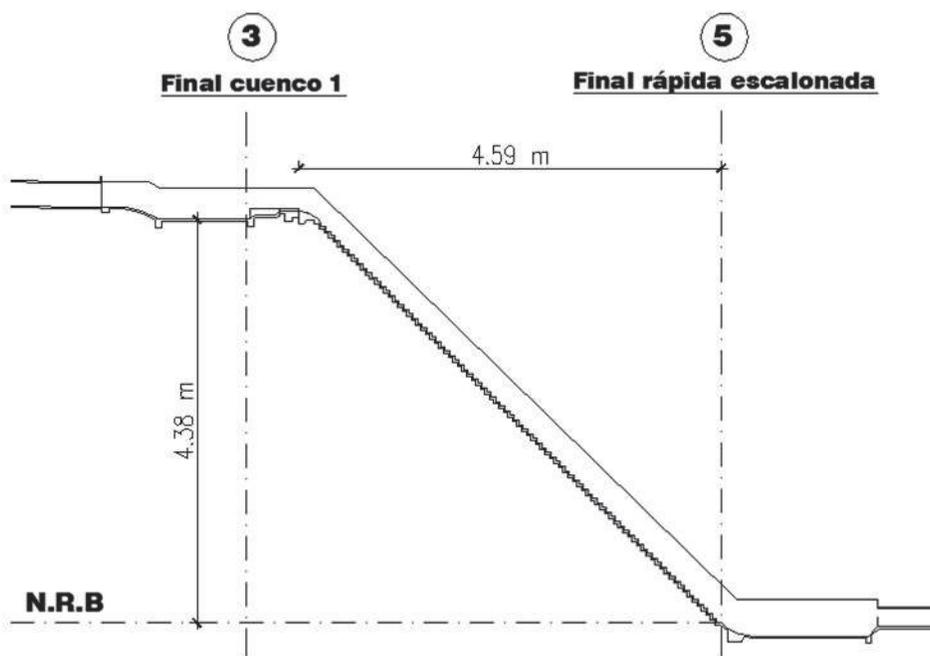
TIPOS DE FLUJO EN RÁPIDA ESCALONADA			
CELDA IZQUIERDA			
No. Prueba	Qp (m³/s)	Qm (m³/s)	Tipo de Flujo
1	3.73	0.002	Flujo transitorio
2	21.27	0.012	Flujo rasante
3	25.82	0.014	Flujo rasante
4	37.55	0.021	Flujo rasante
5	46.85	0.026	Flujo rasante
6	72.41	0.040	Flujo rasante
CELDA DERECHA			
No. Prueba	Qp (m³/s)	Qm (m³/s)	Tipo de Flujo
1	4.36	0.002	Flujo transitorio
2	25.35	0.014	Flujo rasante
3	30.73	0.017	Flujo rasante
4	42.64	0.024	Flujo rasante
5	54.94	0.031	Flujo rasante
6	76.66	0.043	Flujo rasante

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

5.4.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y FACTOR DE FRICCIÓN

Uno de los objetivos principales de la presente investigación es el análisis de la disipación de energía a través de la rápida escalonada en condiciones de flujo rasante estable, motivo por el cual se realiza el cálculo relacionando la energía máxima aguas arriba en la estructura de aproximación (sección 3) y la energía al final de la rápida (sección 5) mediante el Principio de Conservación de Energía.

FIGURA 5.30: ESQUEMA DE LAS SECCIONES INICIAL Y FINAL DEL VOLUMEN DE CONTROL UTILIZADO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA ESCALONADA



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

TABLA 5.5: PORCENTAJES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN LA RÁPIDA ESCALONADA EN CONDICIONES DE FLUJO RASANTE ESTABLE

P-No.	CAUDAL TOTAL		MODELO - Cargas y Disipación de Energía					
	PROT.	MOD.	CELDA IZQUIERDA			CELDA DERECHA		
	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	E ₃ (m)	E ₅ (m)	ΔE/E ₃ %	E ₃ (m)	E ₅ (m)	ΔE/E ₃ %
2	46.61	26.05	4.56	0.31	93.26 %	4.57	0.35	92.23 %
3	56.55	31.61	4.58	0.33	92.79 %	4.59	0.42	90.84 %
4	80.19	44.83	4.61	0.44	90.54 %	4.62	0.57	87.67 %
5	101.78	56.90	4.63	0.51	89.08 %	4.66	0.55	88.19 %
6	149.07	83.33	4.84	0.53	89.05 %	4.78	0.72	84.98 %

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Según el Cuadro 5.5, la rápida escalonada genera una disipación entre el 84 % y 93 % de la energía máxima del flujo de aproximación, considerando un rango entre caudales intermedios y altos. Se observa que a medida que se incrementa el caudal, la disipación de energía

es relativamente menor.

Como se mencionó en el apartado 2.5.2, existen diversas ecuaciones para la determinación del factor de fricción f_e en una rápida escalonada. En el presente análisis del modelo se toma en cuenta las recomendaciones de la literatura según Chanson (1993) conforme a la ecuación:

$$f_e = \frac{8 * g * \text{sen}\theta * y_{\text{caract}}^2}{q^2} * \frac{D_H}{4} \quad (5.1)$$

f_e : Factor de fricción flujo aire-agua.

g : Aceleración de la gravedad. [m/s^2]

y_{caract} : Calado característico del flujo aire-agua. [m]

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. [$^\circ$]

q : Caudal unitario. [$m^3/s/m$]

D_H : Diámetro hidráulico. [m]

La expresión anterior es válida para el caso de que se alcance el régimen rasante estable y uniforme al pie de la estructura, condición que ha sido constatada durante los ensayos realizados con caudales totales mayores a los 46 m^3/s .

TABLA 5.6: FACTOR DE FRICCIÓN EN LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH EVALUADO PARA EL FLUJO RASANTE SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA MEDIDO EN MODELO FÍSICO

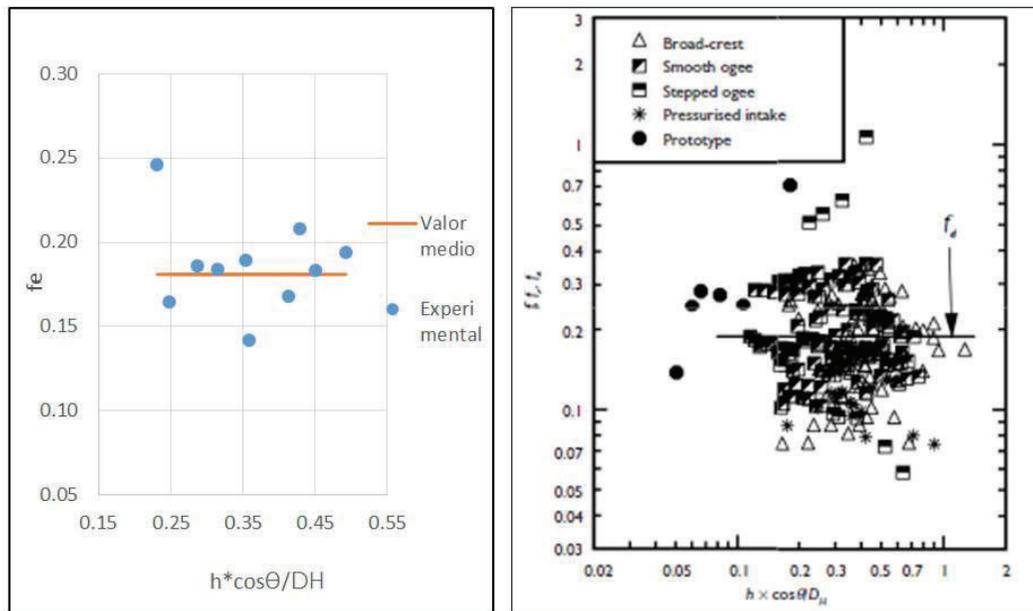
P-No.	CAUDAL TOTAL		MODELO - Factor de fricción	
	PROT.	MOD.	C. IZQ.	C. DER.
	Qp	Qm	f	f
2	46.61	26.05	0.19	0.18
3	56.55	31.61	0.21	0.17
4	80.19	44.83	0.19	0.14
5	101.78	56.90	0.18	0.19
6	149.07	83.33	0.25	0.16

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Del Cuadro 5.6, se deduce un rango del factor de fricción entre 0.14 y 0.25 para la gama de caudales experimentados, representado por un valor medio de 0.18.

Se representa el factor de fricción (f_e) en función de la altura de la rugosidad relativa del escalón ($h \cdot \cos\theta / DH$), a fin de compararla con la gráfica disponible en la literatura técnica (presentada en la sección 2.5); como se indica en la siguiente figura:

FIGURA 5.31: COMPARACIÓN ENTRE EL FACTOR DE FRICCIÓN DE LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH EN FLUJO RASANTE ESTABLE SOBRE LA RÁPIDA ESCALONADA VS LA ALTURA DE RUGOSIDAD RELATIVA DEL ESCALÓN DETERMINADA EXPERIMENTALMENTE (IZQUIERDA) Y RECOMENDADA POR LA LITERATURA (DERECHA)



FUENTE: Chanson, H., Bung D. and Matos, J. "Stepped spillways and cascade". The Netherlands. Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources. The University of Queensland. Pag. 53

De acuerdo a la figura No. 5.31 evidentemente el valor medio $f_e=0.18$ determinado de manera experimental en la presente investigación, para la geometría de la rápida escalonada en estudio; resulta muy cercano a uno de los valores más frecuentemente recomendados en la literatura técnica, $f_e=0.17$.¹

5.4.3 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

En esta ocasión se presentan los parámetros hidráulicos de la rápida escalonada para un caudal de prueba, por ejemplo para el caudal total en prototipo $46.51 \text{ m}^3/\text{s}$. Se realiza una comparación entre los valores de datos obtenidos experimentalmente con aquellos calculados de acuerdo a las ecuaciones teóricas propuestas por Chanson, para los datos del prototipo.

¹Chanson, H., Bung D. and Matos, J. "Stepped spillways and cascades". The Netherlands. Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, IST. The University of Queensland

En el siguiente cuadro se resume el resultado de este análisis comparativo de los parámetros indicados, para el flujo distribuido en cada una de las celdas.

TABLA 5.7: COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE CON AQUELLOS CALCULADOS DE ACUERDO A LAS ECUACIONES TEÓRICAS PROPUESTAS POR CHANSON, PARA LOS DATOS DEL PROTOTIPO EN LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$

Dimensión	Unidad	Celda izquierda			Celda derecha		
		MOD.	PROT.	DESV.	MOD.	PROT.	DESV.
		Valor			Valor		
Q	m^3/s	21.27	21.27	-	25.35	25.35	-
b	m	5.00	5.00	-	5.00	5.00	-
h	m	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-
l	m	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-
θ	°	45.00	45.00	-	45.00	45.00	-
q	$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	4.25	4.25	-	5.07	5.07	-
y_c	m	1.23	1.23	-	1.38	1.38	-
H_{dam}	m	89.34	89.34	-	89.34	89.34	-
k_s	m	0.71	0.71	-	0.71	0.71	-
F	-	2.72	2.72	-	3.24	3.24	-
L_i	m	9.64	13.63	41.41 %	11.27	15.45	37.09 %
d_i	m	0.58	0.52	-9.91 %	0.65	0.58	-10.80 %
C	-	0.44	0.44	-	0.44	0.44	-
f_e	-	0.19	0.19	-	0.18	0.18	-
y_c/h	-	1.23	1.23	-	1.38	1.38	-
$y_{character.}$	m	0.42	0.40	-5.04 %	0.46	0.44	-5.52 %
U	m/s	10.14	10.68	5.30 %	10.91	11.55	5.85 %
Fr	-	5.00	5.40	8.06 %	5.11	5.56	8.90 %
Y_{90}	m	0.75	0.71	-5.04 %	0.83	0.78	-5.52 %
α	-	1.12	1.12	-	1.12	1.12	-
z_3	m	87.60	87.60	-	87.60	87.60	-
H_{max}	m	91.18	91.18	-	91.41	91.41	-
H_{res}	m	6.15	6.77	10.12 %	7.10	7.90	11.22 %
% ΔH	%	93.26	92.57	-0.73 %	92.23	91.36	-0.95 %

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Conforme al Cuadro No 5.7, se observa que existe un porcentaje de desviación alrededor del 6 % entre parámetros característicos del flujo rasante, tales como:

- calado correspondiente a una concentración de aire del 90 % (Y_{90}),
- calado característico del flujo aire-agua (y_{caract}),
- velocidad media del flujo aire-agua (U).

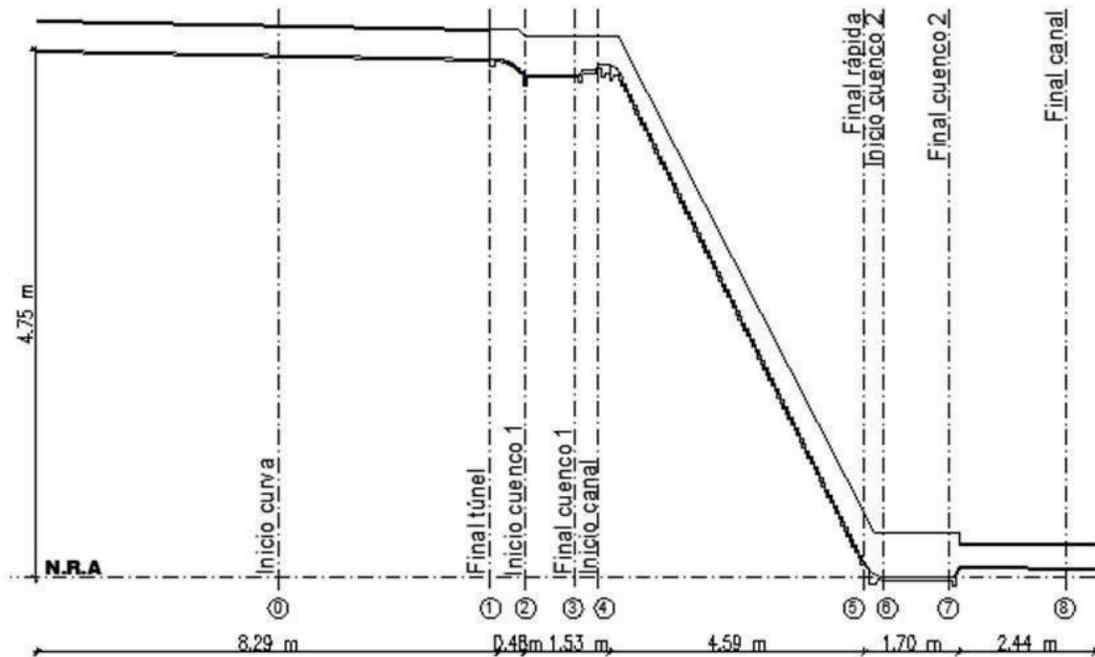
En cuanto a los parámetros sobre las características del punto de inicio de ingreso de aire como: la distancia medida desde la cresta de la rápida (L_i) y el calado del flujo (d_i), se tiene una diferencia del 40 % y del 10 % respectivamente. Esto se justifica por las diferentes condiciones del flujo en el ingreso hacia la rápida escalonada, respecto de las condiciones totalmente uniformes que se adoptan en el análisis teórico.

En relación con la eficiencia en la disipación de energía se analizan como parámetros representativos a la carga de energía residual al pie de la rápida (E_{res}), y la disipación de energía a través de esta estructura (ΔE). Se observa una diferencia entre parámetros experimentales y teóricos de alrededor del 10 % para la energía residual y del 1 % para la carga de energía disipada. La disipación determinada experimentalmente es mayor que la calculada teóricamente.

5.5 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL SISTEMA: ESTRUCTURA DE INGRESO - RÁPIDA ESCALONADA - ESTRUCTURA DE ENTREGA DEL FLUJO

La evaluación experimental del comportamiento del sistema estructura de ingreso - rápida escalonada - estructura de entrega del flujo, se realiza de la misma forma mediante el Principio de Conservación de Energía.

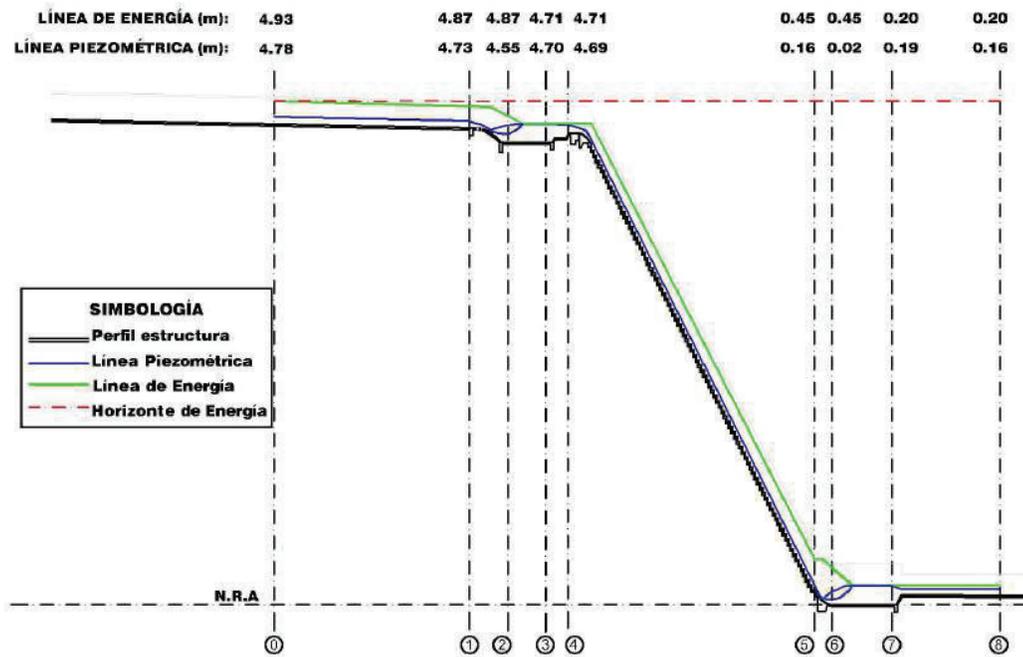
FIGURA 5.32: ESQUEMA DE LAS SECCIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE ENERGÍAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURA DE INGRESO - RÁPIDA ESCALONADA - ESTRUCTURA DE ENTREGA DEL FLUJO



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

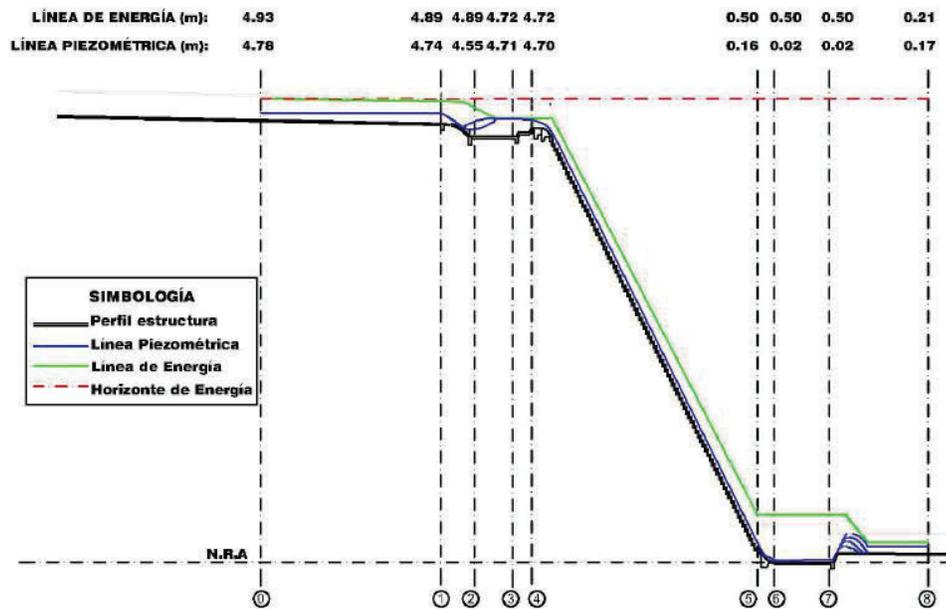
El análisis se realiza tanto para un caudal intermedio como para un caudal alto, seleccionados del plan de pruebas correspondiente a la evaluación del diseño original, puesto que las condiciones del flujo en las cuales se desarrolla el caudal bajo ($Q_{TOTALPROTOTIPO} = 8.09 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo) en la rápida escalonada, corresponde al flujo transitorio.

FIGURA 5.33: UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA IZQUIERDA CON CAUDAL MEDIO. $Q_{CELDAIZQ.PROTOTIPO} = 21.27 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$



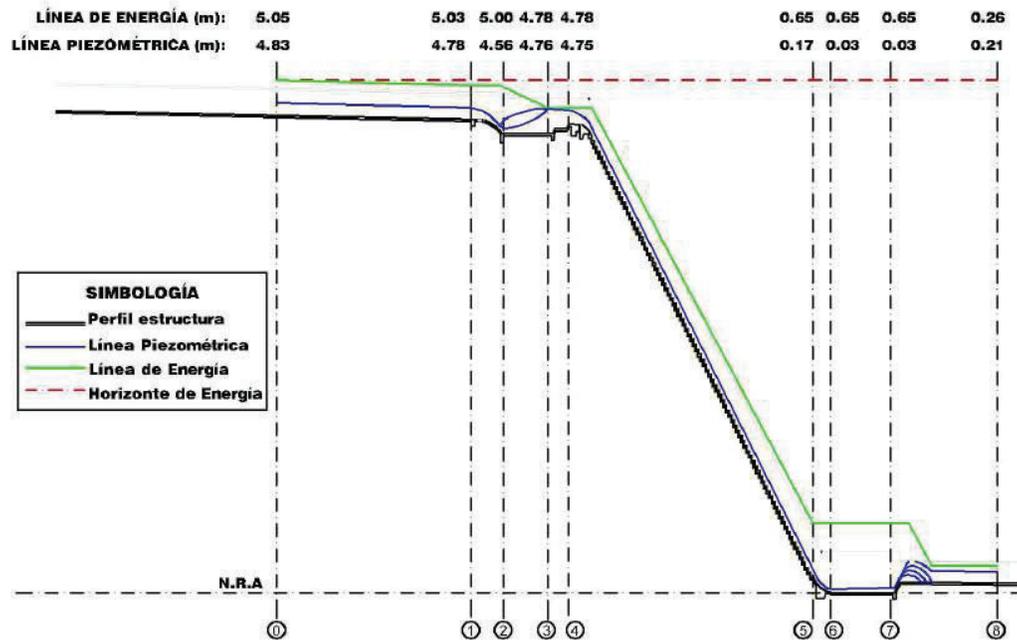
ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 5.34: UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA DERECHA CON CAUDAL MEDIO. $Q_{CELDADER.PROTOTIPO} = 25.35 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$



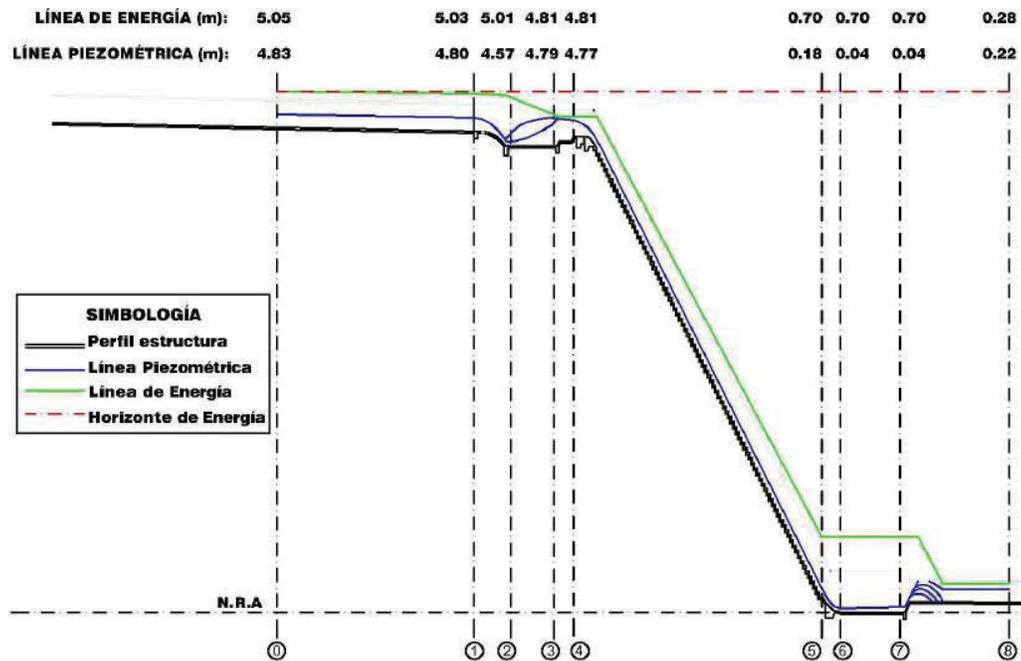
ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 5.35: UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA IZQUIERDA CON CAUDAL ALTO. $Q_{CELDAIZQ.PROTOTIPO} = 46.85 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 5.36: UBICACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA PARA EL FLUJO EN LA CELDA DERECHA CON CAUDAL ALTO. $Q_{CELDADER.PROTOTIPO} = 54.94 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

De acuerdo a las figuras 5.34, 5.35 y 5.36; se puede destacar que en la estructura de entrega del flujo, específicamente en el canal de conexión 2, se observa una pérdida de energía originada por el impacto del flujo en la tapa superior de esta estructura; siendo este comportamiento inaceptable.

5.5.1 CAUDAL MÁXIMO DE EFICIENTE OPERACIÓN

Con base en las observaciones realizadas sobre el comportamiento del flujo en cada una de las pruebas experimentales descritas en la sección 5.2, se define el caudal máximo seguro y de eficiente operación en el funcionamiento hidráulico del sistema construido con la geometría del diseño original.

La Prueba P-2 ejecutada con un caudal total de $46.51 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo (26.05 l en modelo), permite observar un flujo de aproximación hacia la transición relativamente calmado y ordenado. El efecto de la curvatura en la alineación del túnel baúl repercute ligeramente ocasionando pequeñas ondas cruzadas que son suprimidas en el cuenco disipador 1. Consecuentemente el flujo que ingresa a la sección inicial de la rápida escalonada se observa uniformemente distribuido en cada una de las celdas. A lo largo de la rápida escalonada se evidencia la presencia de flujo rasante estable; y al pie de la misma, se contempla únicamente en la celda izquierda la disipación de energía excedente a través de la formación de un resalto estabilizado dentro del cuenco amortiguador. En la celda derecha, debido al exceso de caudal con respecto al que circula por la celda izquierda, se observa que se rechaza el resalto.

A partir del comportamiento del flujo observado en esta prueba, se investigó el caudal máximo de eficiente operación para todas las estructuras del sistema, obteniéndose como resultado un caudal total en prototipo de $41.80 \text{ m}^3/\text{s}$.

TABLA 5.8: PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO DE EFICIENTE OPERACIÓN

CAUDAL TOTAL		CAUDAL EN RÁPIDA ESCALONADA			
PROTIPO	MODELO	CELDA IZQUIERDA		CELDA DERECHA	
Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)
41.80	23.37	19.75	11.04	22.03	12.32

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 5.37: PRUEBA DETERMINACIÓN DE CAUDAL MÁXIMO DE EFICIENTE OPERACIÓN. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL DERECHA DE CUENCO DISIPADOR 2 (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 41.80 \text{ m}^3/\text{s}$



Como se observa en la figura 5.37, en ambas celdas del cuenco disipador 2, se visualiza la formación de un resalto hidráulico estable, razón por la cual se selecciona al caudal de $41.80 \text{ m}^3/\text{s}$, como el caudal de segura y eficiente operación, para la geometría del diseño original de las estructuras.

CAPÍTULO 6

PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ORIGINAL

Luego del análisis experimental con respecto al funcionamiento hidráulico en forma global de las estructuras construidas con la geometría del diseño original, se determinó como caudal óptimo de eficiente operación el valor de $42\text{m}^3/\text{s}$. A partir de este caudal no se produce la disipación de la energía residual procedente de la rápida escalonada; lo que conlleva a la presencia de altas velocidades en el cuenco disipador al pie de la misma. En vista de que esta estructura es la principal zona que presenta deficiencias en su funcionamiento hidráulico y que limita evidentemente el rango de caudales de operación al 28 % del caudal de diseño del sistema, es necesario recomendar modificaciones que permitan alcanzar un funcionamiento aceptable en este componente, a la vez hacer más amplio el rango seguro y eficiente de caudales de operación, y sobre todo garantizar la correcta disipación de energía.

Por lo tanto se requiere incrementar la fuerza viva de tal manera que se garantice la estabilización del resalto en la longitud disponible del cuenco existente. Una de las posibilidades para alcanzar este objetivo es implementar estructuras adicionales dentro de la masa de agua, colocadas a una altura que garantice la formación del resalto.

En esta fase de investigación se analiza cualitativamente el comportamiento del flujo y la eficiencia de impactadores ubicados en el extremo final del cuenco disipador 2 en el modelo físico.

6.1 DISIPADORES DE ENERGÍA: IMPACTADORES

En general los disipadores de energía sirven para eliminar el exceso de energía cinética que posee la masa de agua, previniendo daños por erosión o impactos violentos en las estructuras.

Uno de los tipos especiales de disipadores de energía son los impactadores. Son estructuras en forma de bloque; compuestos por una pantalla suspendida verticalmente y un travesaño

al final (como la sección de una viga en “L”) o pantallas de forma rectangular; colocados a una altura que permita la formación del resalto hidráulico. Normalmente estos elementos son pequeños y económicos.

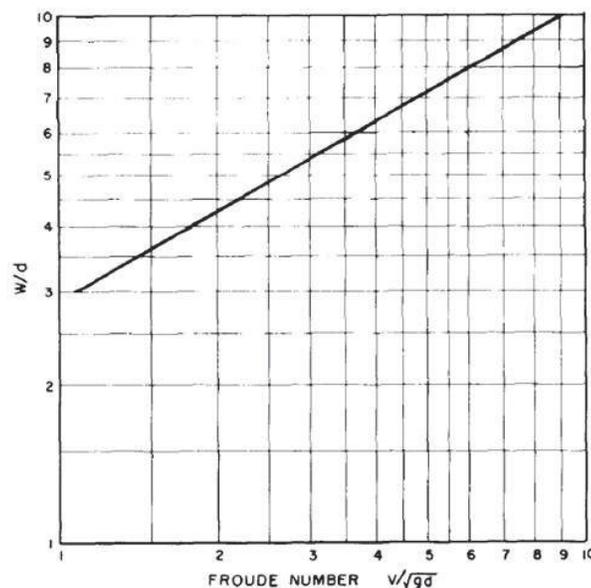
El exceso de energía del flujo de ingreso es disipado por la macroturbulencia que se forma en el colchón de aguas, incrementada por el choque de la masa de agua en la pantalla sumergida dentro de éste.¹.

6.1.1 DISEÑO DE IMPACTADORES

Impactador en forma de “L” invertida:

El dimensionamiento de este tipo de impactador y su ubicación en un cuenco, se puede realizar en base a curvas adimensionales y relaciones disponibles en la literatura técnica, como se indica a continuación:

FIGURA 6.1: (w/d) VS NÚMERO DE FROUDE PARA CUENCOS DE SALIDA CON IMPACTADORES



FUENTE: Aisenbrey A. J., Hayes R. B. Warren H. J., Winsett D. and, Young R. “Desing of Small Canal Structure”. United States Department of the Interior Bureau Reclamation. Denver, Colorado. Pag. 310

¹Aisenbrey A. J., Hayes R. B. Warren H. J., Winsett D. L. and, Young R. B. “Desing of Small Canal Structures”. United States Department of the Interior Bureau Reclamation. Denver, Colorado. Pag. 299

Donde:

w : Ancho interior del cuenco. m

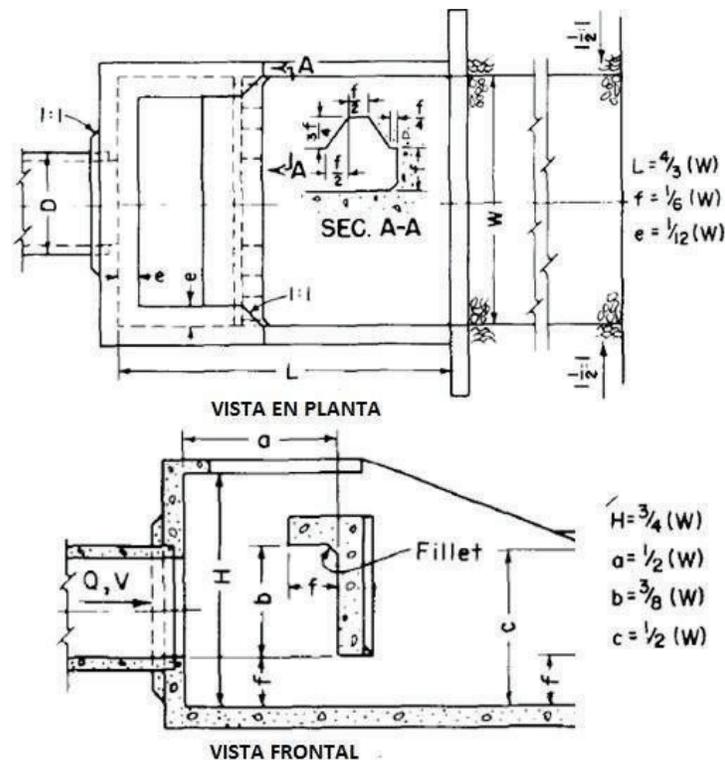
v : Velocidad teórica del flujo de ingreso. $[m/s]$

d : Profundidad del flujo de ingreso al cuenco. $[m]$

g : Aceleración de la gravedad. $[m/s^2]$

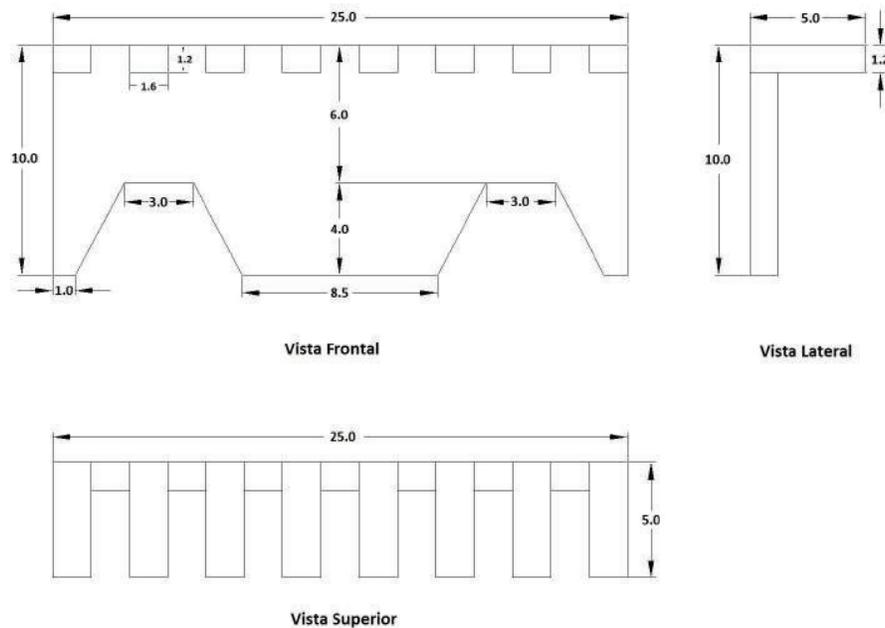
A partir de los datos de esta curva de diseño, se determina el ancho interior del cuenco (w). Sin embargo, al ser éste un dato conocido en el presente estudio; siendo $w = 0.25$ m, que corresponde al ancho del cuenco en el modelo por celda; se procede a dimensionar y ubicar el impactador con ayuda de las relaciones indicadas en el siguiente esquema:

FIGURA 6.2: RELACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE UN IMPACTADOR EN UN CUENCO



FUENTE: Aisenbrey A. J., Hayes R. B. Warren H. J., Winsett D. and, Young R. "Desing of Small Canal Structure". United States Department of the Interior Bureau Reclamation. Denver, Colorado. Pag. 310

En la siguiente figura se indica el dimensionamiento obtenido del impactador en forma de "L" invertida:

FIGURA 6.3: DIMENSIONES DE IMPACTADOR EN FORMA DE "L" INVERTIDA

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

El diseño del elemento de disipación observado en la Figura 6.3 tiene una particularidad respecto de la constitución de la estructura en forma de "L" recomendada en la Figura 6.2.

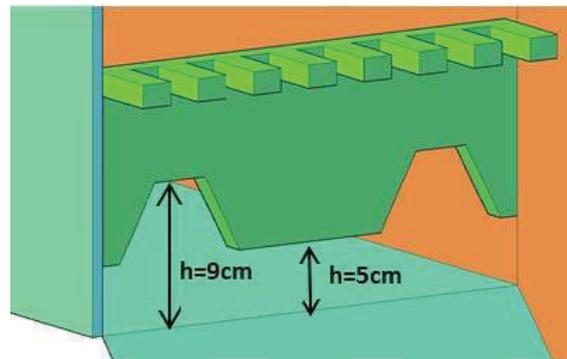
En la parte superior, el elemento presenta unas discontinuidades con la finalidad de obtener una distribución uniforme de velocidad tanto en la dirección horizontal como en la vertical y para contrarrestar la formación de ondas.²

En la parte inferior presenta dos destajes cuyos extremos superiores se encuentran ubicados a una altura de 9cm medidos desde el fondo del inicio del canal (sobre la grada en el extremo final del cuenco disipador 2), como se observa en la Figura 6.4; su función es disminuir la turbulencia originada por el efecto de vórtices.

El extremo inferior del impactador se encuentra ubicado a 5cm del fondo del inicio del canal (Figura 6.4), que corresponde a la altura f , determinada con las recomendaciones técnicas antes indicadas.

²Aisenbrey A. J., Hayes R. B. Warren H. J., Winsett D. L. and, Young R. B. "Desing of Small Canal Structures". United States Department of the Interior Bureau Reclamation. Denver, Colorado. Pag. 299

FIGURA 6.4: UBICACIÓN DEL IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA

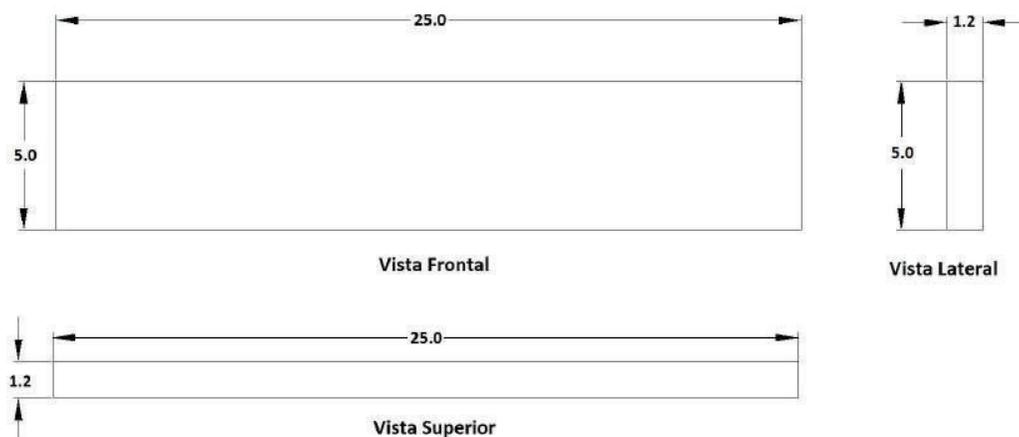


ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

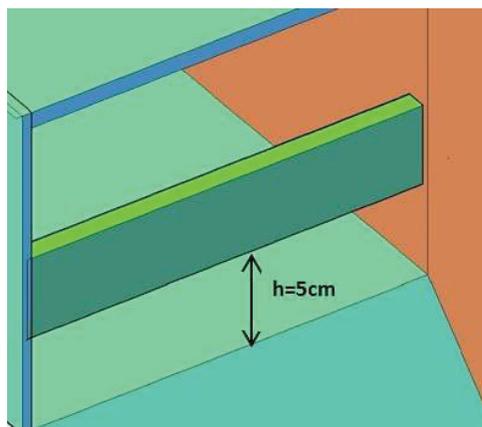
Impactador de forma rectangular

Se diseña un impactador de forma rectangular de dimensiones 25x5x1.2 cm (Figura 6.5), que se ubica asimismo a una altura de 5cm medidos desde el fondo del canal, Como se observa en la Figura 6.6

FIGURA 6.5: DIMENSIONES DE IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 6.6: UBICACIÓN DEL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

6.2 CONSTRUCCIÓN DE LAS PROSPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN

Se resume en el cuadro 6.1, las modificaciones que se proponen implementar aguas abajo de la rápida escalonada también se describe los objetivos técnicos que se pretenden alcanzar.

TABLA 6.1: DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES GEOMÉTRICAS PROPUESTAS EN LAS ESTRUCTURAS AL PIE DE LA RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO

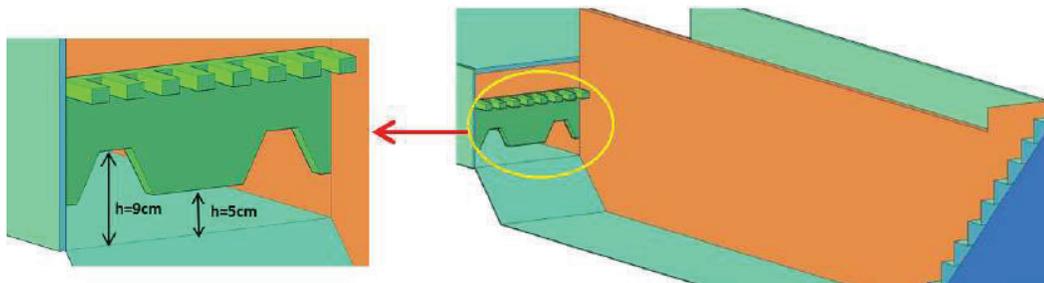
No	Propuesta	Objetivo Principal	Observaciones
1	Impactador en forma de "L" invertida, ubicado en el extremo final del cuenco disipador 2	Generar la formación del resalto hidráulico en el cuenco 2 ($Q_{TOTAL} > 42 \text{ m}^3/\text{s}$)	Debe operar totalmente sumergido para garantizar su eficiencia en la estabilización del resalto
2	Impactador de forma rectangular, ubicado en el extremo final del cuenco disipador 2	Generar la formación del resalto hidráulico en el cuenco 2 ($Q_{TOTAL} > 42 \text{ m}^3/\text{s}$)	Debe operar totalmente sumergido para garantizar su eficiencia en la estabilización del resalto
3	Sección de control, ubicada en el extremo final del canal de conexión 2	Proporcionar un régimen subcrítico y contribuir con la estabilización del resalto hidráulico en el cuenco disipador 2 ($Q_{TOTAL} > 42 \text{ m}^3/\text{s}$)	En el prototipo representa el incremento de cota de la cresta de la segunda rápida. En el modelo físico se encuentra representada a través de una clapeta.

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

6.2.1 PROPUESTA No. 1

Se indica en las siguientes figuras 6.7 y 6.8, la implantación del impactador en forma de “L” invertida, ubicado en el extremo final del cuenco de disipación al pie de la rápida en el modelo físico.

FIGURA 6.7: VISTA EN 3D DEL IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 6.8: IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA FABRICADO EN ACRÍLICO Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA EN EL MODELO FÍSICO

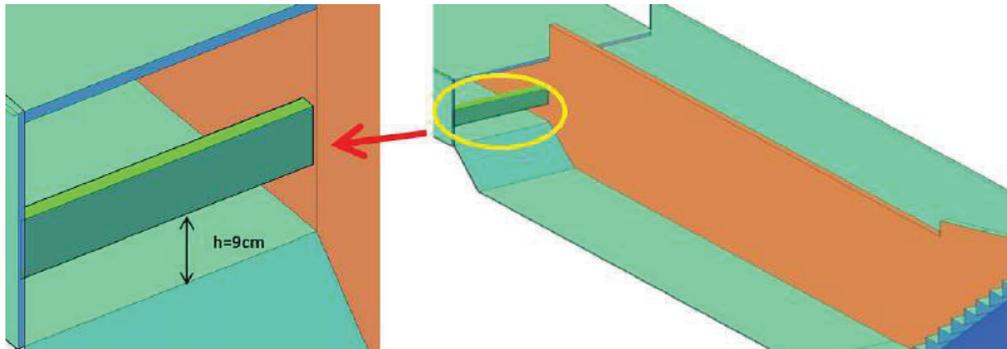


ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

6.2.2 PROPUESTA No. 2

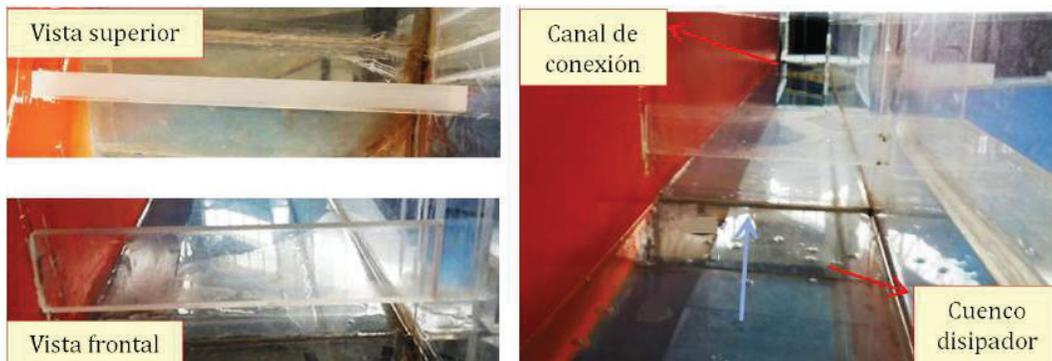
Se indica en las siguientes figuras 6.9 y 6.10, la implantación del impactador de forma rectangular, ubicado en el extremo final del cuenco de disipación al pie de la rápida en el modelo físico.

FIGURA 6.9: VISTA EN 3D DEL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA



ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

FIGURA 6.10: IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR FABRICADO EN ACRÍLICO Y SU IMPLANTACIÓN EN EL CUENCO DE DISIPACIÓN AL PIE DE LA RÁPIDA ESCALONADA EN EL MODELO FÍSICO

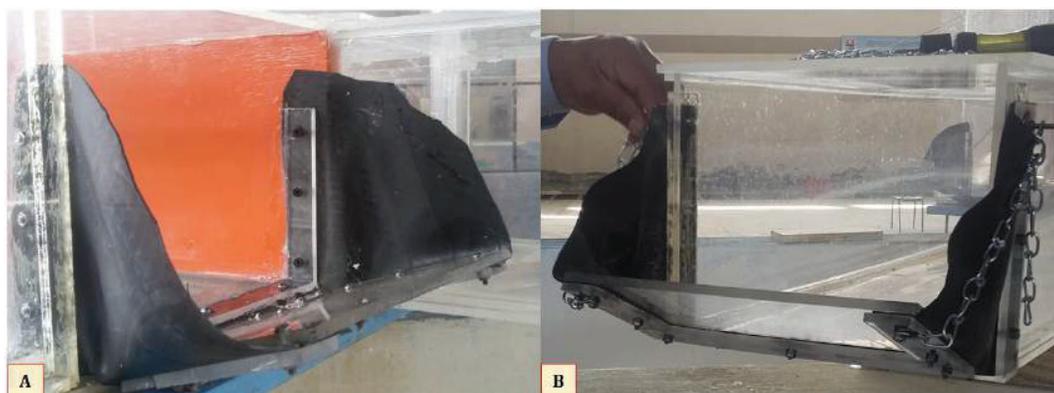


ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

6.2.3 PROPUESTA No. 3

Se indica en la siguiente figura 6.11, la implementación de la sección de control, ubicada en el extremo final de canal de conexión 2 en cada una de las celdas. Las clapetas consisten en piezas rectangulares de acrílico de 25x20 cm, cuyo ángulo de inclinación es determinado mediante un sistema de regulación.

FIGURA 6.11: IMPLEMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE CONTROL A TRAVÉS DE UNA CLAPETA EN EL MODELO FÍSICO. SECCIÓN DE CONTROL UBICADA EN CELDA DERECHA (A) E IZQUIERDA (B)



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

6.3 PLAN DE PRUEBAS

Las propuestas de optimización son analizadas conforme al plan de pruebas presentado en el Cuadro 6.2, que considera un rango de caudales correspondiente a valores mayores a los 42 m³/s, por ser el caudal máximo de eficiente operación del sistema con diseño original. Hasta los 100 m³/s, por ser el caudal máximo con el que el flujo ingresa de manera apropiada a la rápida escalonada.

TABLA 6.2: PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS MODIFICACIONES RECOMENDADAS

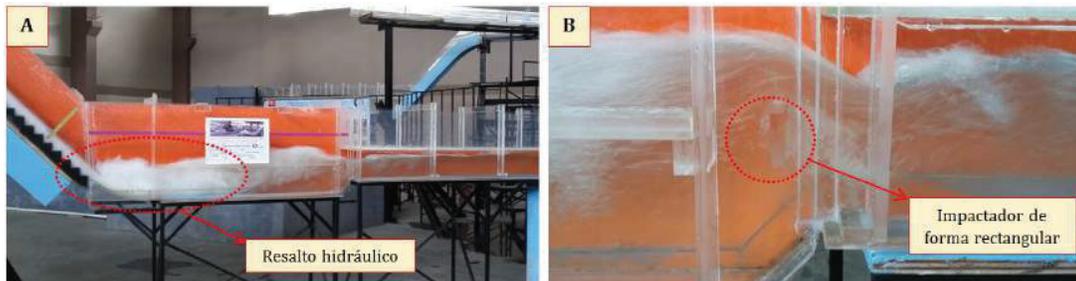
PRUEBA	Qp (m ³ /s)	Qm (l/s)	FASE DE INVESTIGACIÓN	OBSERVACIONES
P-1	60	33.54	Análisis experimental de las modificaciones	Caudal intermedio (30 % del caudal de diseño de la estructura)
P-2	100	55.90	Análisis experimental de las modificaciones	Caudal alto (70 % del caudal de diseño de la estructura)

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

6.4 RESULTADOS OBTENIDOS

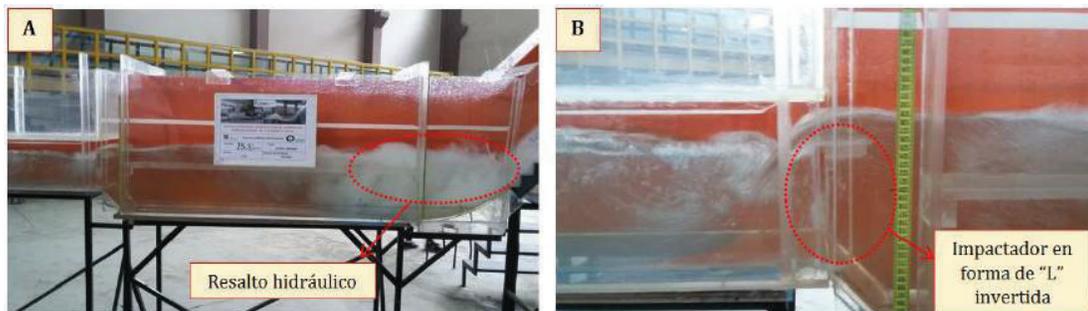
i) PRUEBA P-1 $Q_T(\text{Prototipo}) = 56.55 \text{ (m}^3/\text{s)}$; $Q_T(\text{Modelo}) = 31.61 \text{ (l/s)}$

FIGURA 6.12: PRUEBA 1. VISTA LATERAL DERECHA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 6.13: PRUEBA 1. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL DE IMPACTADOR EN FORMA DE "L" INVERTIDA (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

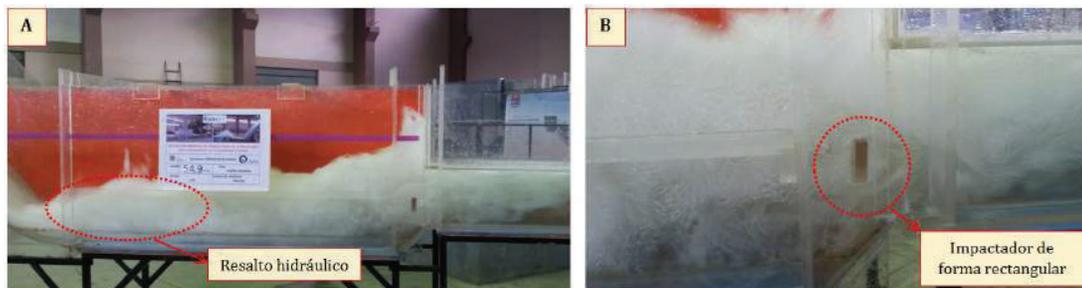
Observaciones:

- Formación de un resalto hidráulico estable a lo largo de toda la longitud del cuenco disipador 2 en la celda derecha, debido a la influencia del impactador de forma rectangular y de la sección de control aguas abajo.
- Se observa gran turbulencia y contenido de aire en la zona de choque con el impactador de forma rectangular. Hacia aguas abajo de la pantalla, en el canal de conexión existe todavía la influencia del arrastre de aire hacia el interior de la masa de agua, generado por el resalto.

- Flujo con pequeñas fluctuaciones y ondas superficiales hacia aguas abajo del resalto hidráulico formado en la celda derecha del cuenco disipador 2, que se transmite hacia el canal de salida.
- Formación de un resalto hidráulico estable que cubre aproximadamente el 50 % de la longitud del cuenco disipador 2 en la celda izquierda, debido a la influencia del impactador en forma del “L” invertida y de la sección de control aguas abajo.
- Se observa poca turbulencia y contenido de aire en la zona de choque con el impactador en forma de “L”. El comportamiento del flujo hacia aguas abajo de esta pantalla se presenta uniformizado en el canal de salida.

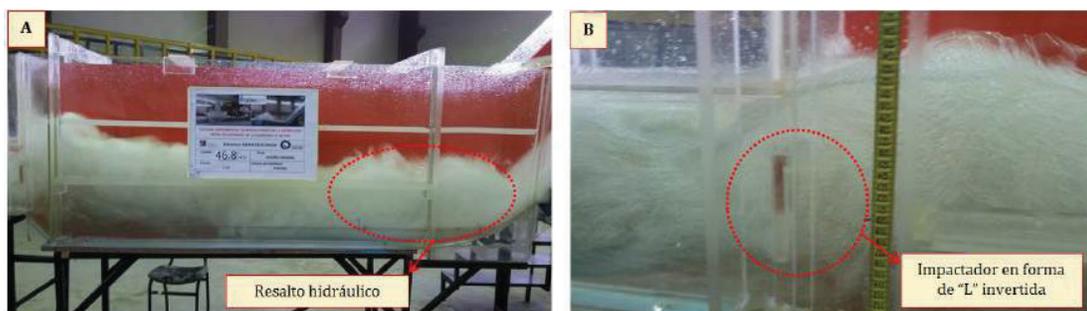
ii) PRUEBA P-2 $Q_T(\text{Prototipo}) = 101.78 \text{ (m}^3/\text{s)}$; $Q_T(\text{Modelo}) = 56.89 \text{ (l/s)}$

FIGURA 6.14: PRUEBA 2. VISTA LATERAL DERECHA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL IMPACTADOR DE FORMA RECTANGULAR (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 6.15: PRUEBA 2. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE CUENCO DISIPADOR 2 (A). VISTA LATERAL DE IMPACTADOR EN FORMA DE “L” INVERTIDA (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 101.78 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

Observaciones:

- Formación de un resalto hidráulico cuya longitud sobrepasa el lecho del cuenco disipador 2 en ambas celdas, por la influencia de los impactadores y de la sección de control aguas abajo.
- Se observa gran turbulencia y contenido de aire en la zona de choque con los impactadores. Hacia aguas abajo de la pantalla, en ambas celdas del canal de conexión existe gran influencia del arrastre de aire hacia el interior de la masa de agua, generado por el resalto.
- En ambas celdas, la altura del resalto sobrepasa la altura de la sección de ingreso al canal de salida, alcanzando la parte inferior de la pared frontal sobre este componente.
- El flujo en ambas celdas del canal de conexión aguas abajo de los impactadores, presenta fluctuación y ondas superficiales. Este canal de salida presenta un porcentaje de llenado alrededor del 95 %.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las obras construidas con el objetivo de desviar la descarga del colector Central de Ñaquito hacia la quebrada El Batán y controlar la escorrentía desde su prolongación en la Plaza Argentina hasta el Río Machángara, deben cumplir adicionalmente con la función de disipar la energía al evacuar caudales de creciente antes de ser restituidos a la quebrada. Por tanto se ha hecho énfasis en el análisis de caudales mayores al sanitario, siendo los menos frecuentes así como del los caudales que condicionan la funcionalidad de la estructura para la cual fue diseñada.

El estudio experimental, con el modelo físico que incluye estructura de aproximación, primera rápida escalonada y estructura de disipación al pie; ha permitido observar el comportamiento complejo y tridimensional del flujo que ingresa en régimen supercrítico a las estructuras, presentando un comportamiento diferente al esperado, con la presencia de ondas e impactos fuertes que ponen en riesgo la perdurabilidad y estabilidad de aquellas. Sobre todo se evidencia el desarrollo del flujo de una forma ineficiente e inestable en ciertos componentes para la disipación de energía quebrantando los principios para los cuales fueron diseñados.

En vista de que las obras fueron diseñadas y dimensionadas sin el soporte de un modelo hidráulico que verifique las condiciones de diseño, la Memoria de Cálculo proporcionada por la EPMAPS se basa en fundamentos de la hidráulica básica y unidimensional que toma en cuenta varias simplificaciones que no permiten interpretar de una manera apropiada en especial la conducta del flujo sobre una rápida escalonada y la disipación de la energía excedente. Por lo tanto es importante conforme al análisis del diseño original, proponer soluciones efectivas que mejoren el funcionamiento y desempeño global de la descarga del sistema de alcantarillado hacia la quebrada El Batán.

7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES REFERENTES A LA VALIDACIÓN Y/O CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO

El fenómeno de flujo de vertido sobre la rápida escalonada, se debe a que la inercia del agua está esencialmente controlada por los efectos de gravedad, siendo la fuerza que predomina con respecto a las de viscosidad, tensión superficial, entre otras fuerzas dinámicas que incurren en su movimiento. Razón por la cual, el estudio en modelo físico se basa en la aplicación de la Similitud Dinámica Restringida según el criterio de la igualdad entre los números de Froude y entre los factores de fricción tanto del modelo como del prototipo. Así también, debe entonces garantizarse que los efectos de las fuerzas viscosas y de tensión superficial sean despreciables respecto de las fuerzas de gravedad y de inercia, así como ocurre en el fenómeno considerado en el prototipo.

La escala de longitudes seleccionada de 1:20, garantiza la representación del flujo en el modelo permitiendo una adecuada representación del fenómeno de introducción de aire en el flujo de alta velocidad desarrollada en la rápida. Disminuye también los efectos de las fuerzas viscosas y de tensión superficial.

Se verifica la similitud geométrica mediante un levantamiento a detalle de los componentes del modelo, luego de obtener una diferencia menor al 1 % con respecto a las coordenadas de implantación, niveles y dimensiones entre la estructura diseñada y la construida.

Se verifica la similitud restringida de Froude al obtener: (i) Una desviación del 1 % al 4 % para los valores del Número de Froude entre modelo y prototipo; concluyendo que la mayor desviación es debida a una ligera influencia de la tensión superficial para el caso del caudal mínimo ensayado. (ii) Valores de Reynolds que superan la condición de 2×10^4 indicando que en todos los casos el comportamiento del flujo en modelo se desarrolla en el rango turbulento; por tanto, los efectos de viscosidad son despreciables respecto a aquellos de la inercia y de la gravedad. (iii) Desviaciones entre los coeficientes de fricción menores al 10 %; excepto para el flujo con el caudal mínimo ensayado, donde el modelo sobrevalora en un 12 % el efecto de la viscosidad respecto de la pérdida continua de energía. (iv) Números de Weber en modelo siempre mucho menores que los correspondientes en prototipo, salvo el caso del caudal mínimo ensayado cuyo valor se aproxima al crítico existiendo así una incidencia ligera de la tensión superficial; por tal motivo se recomienda agregar una pequeña

cantidad de jabón líquido para reducir el efecto de la tensión superficial del agua cuando se realicen las pruebas con estos caudales mínimos.

La desviación pequeña alrededor del 5 % entre los coeficientes de fricción para el rango intermedio de caudales ensayados ($15 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 75 \text{ m}^3/\text{s}$) garantiza la semejanza dinámica respecto a los efectos de la fricción sobre el movimiento del agua, en lo relacionado con las pérdidas continuas de energía. En el caso de los caudales bajos ($Q < 15 \text{ m}^3/\text{s}$), el modelo presenta valores de coeficientes de fricción algo superiores ($\approx 12\%$), por lo que el efecto viscoso en el modelo estaría algo subdimensionado respecto del efecto viscoso en el prototipo. En cambio, para los caudales altos, ($75 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 150 \text{ m}^3/\text{s}$), el modelo presenta coeficientes de fricción algo inferiores ($\approx 10\%$), por lo que el efecto viscoso en el modelo estaría algo sobredimensionado respecto del efecto viscoso en el prototipo. Esta discrepancia será también tomada en cuenta en el análisis de los valores experimentales cuando se realicen las pruebas experimentales de validación del diseño original y de las estructuras modificadas.

Al haber comprobado que las similitudes: geométrica, cinemática y dinámica entre dimensiones y magnitudes del prototipo y modelo están vigentes para toda la gama de caudales de operación prevista, el modelo ha podido ser considerado para las siguientes etapas de investigación.

Como parte del proceso de calibración del modelo, se ha obtenido la curva experimental de descarga validada para los vertederos de aforo, correspondiendo a la siguiente expresión: $Q=0.0176 h^{2.4434}$ con coeficiente de determinación $R^2=0.9971$.

7.2 CONCLUSIONES REFERENTES AL ANÁLISIS DE DISEÑO ORIGINAL

Sobre la evaluación de la calidad del flujo de aproximación hacia la rápida escalonada:

Se observa la presencia de ondas cruzadas debido al régimen supercrítico en el que se desarrolla el flujo a través del túnel de alineamiento no lineal y sección no prismática. Así también se observa una sobreelevación de la superficie del agua en la pared externa del túnel por efecto de la curvatura. Esta situación consecuentemente ha ocasionado una

mayor derivación hacia la celda derecha en un rango del 51 % al 54 % para toda la gama de caudales totales ensayados.

Existe un impacto frontal y brusco del flujo con el inicio de la pared divisoria, provocando una alteración del flujo aguas abajo mientras más alto es el caudal e ingresando de una manera no adecuada a la transición.

El cuenco disipador aguas arriba de la rápida escalonada cumple con la función de cambiar el régimen supercrítico a subcrítico del flujo, hasta un caudal máximo aproximadamente de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo. Este cambio de régimen se puede corroborar con los números de Froude indicados en el Anexo 4. Para caudales mayores no se genera el cambio de régimen, comportándose el flujo de una manera inestable y caótica a lo largo del esta estructura disipadora e ingresando de forma no apropiada a la rápida escalonada.

Acerca de la evaluación del comportamiento del flujo sobre la rápida escalonada:

El caudal límite determinado experimentalmente, a partir del cual se originan las condiciones de flujo rasante sobre la rápida escalonada corresponde a un valor de $11.45 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada cámara, difiriendo en un porcentaje del 2.3 % con respecto al valor definido teóricamente. Con valores menores a este caudal se constató el desarrollo de un flujo con diferentes características, denominado transitorio.

Al operar la rápida escalonada con caudales relativamente pequeños que presentan una conducta de flujo transitorio, en el orden de los $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal total en prototipo); se ha registrado un impacto brusco sobre algunos escalones próximos al perfil parabólico del inicio de la rápida.

Conforme a la evaluación experimental, la rápida escalonada en estudio es una eficiente estructura de disipación de energía, puesto que el porcentaje de disipación se encuentra entre el 84 % y 93 % de la energía máxima aguas arriba para todo el rango de caudales ensayados en condiciones de flujo rasante. Se analiza que a medida que se incrementa el caudal la disipación de energía es relativamente menor.

En cuanto al comportamiento del flujo rasante se pudo identificar la zona de flujo uniforme

en donde los parámetros hidráulicos como el calado no presentan variación, respecto de la fluctuación que representa este tipo de flujo de alta turbulencia y gran alto contenido de aire; siendo compleja su medida por la dificultad que significa identificar la posición exacta de la superficie libre en la práctica. Razón por la cual se justifica la utilización de la ecuación (2.22) para flujos plenamente desarrollados con aireación uniforme propuesta por Chanson (1993), a fin de determinar el factor de fricción experimental que representa el fondo escalonado de la rápida. Evidentemente el comportamiento del flujo es adecuado sobre la rápida escalonada cuando al mismo tiempo las condiciones de ingreso a la misma también lo son. Para caudales altos alrededor de los $150 \text{ m}^3/\text{s}$ se contempla un comportamiento muy desordenado y fluctuante a lo largo de casi toda la rápida escalonada, como se aprecia en la siguiente figura:

FIGURA 7.1: VISTA LATERAL IZQUIERDA DE LA RÁPIDA ESCALONADA. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 149.07 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{CELDA IZQUIERDA} = 72.42 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

El factor de fricción determinado experimentalmente varía entre 0.14 y 0.25 para la toda la gama de caudales experimentados. Esta variación y discrepancia se puede deber principalmente a que se encuentra relacionado directamente con la medida del calado del flujo aireado, que como anteriormente se mencionó es complicada de obtenerla debido a la fuerte agitación del flujo.

Debido a que la ecuación empleada para la determinación de la energía residual depende críticamente de la estimación del factor de fricción, se constata la importancia de la presencia de un modelo físico que proporcione estas mediciones experimentales necesarias. Una

sobreestimación del factor de fricción podría reservar velocidades de flujo más altas que incidirán en los parámetros de diseño del sistema de disipación de energía aguas abajo.

Al comparar la energía residual obtenida experimental y teóricamente para un caudal de prueba ($Q_{TOTALprototipo} = 46.51 \text{ m}^3/\text{s}$), se tiene una diferencia alrededor del 10 % usando en ambos casos el factor de fricción adquirido en el modelo; consecuentemente una desviación en el porcentaje de disipación de energía aproximadamente del 1 %.

Sobre el comportamiento del flujo en la estructura de entrega del flujo:

El cuenco disipador aguas abajo de la rápida escalonada cumple con la función de cambiar el régimen supercrítico a subcrítico del flujo, hasta un caudal máximo aproximadamente de $42 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo para ambas celdas. Para un caudal mayor sucede que la celda derecha deja de cumplir con esta función y para la celda izquierda cuando los caudales son mayores a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente.

En general cuando se rechaza el resalto hidráulico en el disipador 2 se genera un impacto del flujo en la cubierta del canal de conexión aguas abajo, poniendo en riesgo la perdurabilidad y seguridad de esta estructura.

Por tanto el caudal máximo para el cual el sistema muestra una eficiencia adecuada y aceptable respecto del patrón del flujo y de la disipación de energía continua, es de aproximadamente $42 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.3 RECOMENDACIONES REFERENTES AL ANÁLISIS DE DISEÑO ORIGINAL

Debido a que el funcionamiento eficiente del sistema en forma global depende de la calidad del flujo aguas arriba de la rápida escalonada se recomienda: modificar las características geométricas de la pila en el inicio de la pared divisoria con el propósito de minimizar el impacto del flujo y de permitirle ingresar de manera adecuada a la transición.

Dependiendo del rango establecido de operación de las estructuras para el caso de caudales mayores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$, se recomienda evaluar la modificación geométrica del tramo de salida del cuenco disipador aguas arriba de la rápida, para estabilizar el resalto hidráulico a fin de que el agua que ingresa a la rápida lo haga en condiciones de flujo subcrítico.

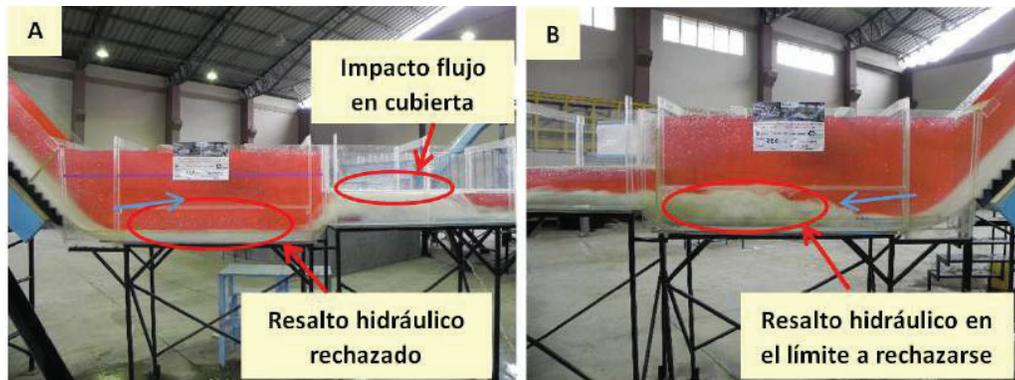
Modificar las características del fondo del perfil parabólico liso del inicio de la rápida escalonada, con la implementación de escalones cuyos vértices se empaten con el perfil. Así se eliminaría o minimizaría el impacto del flujo aguas abajo cuando se opere con caudales pequeños que son los más recurrentes.

Al ser el cuenco disipador aguas abajo de la rápida la principal estructura que presenta deficiencias en su funcionamiento hidráulico desde el rango de caudales intermedios, se recomienda definitivamente mejorar las condiciones de disipación de energía con alguna estructura de impacto que le permita controlar el resalto hidráulico a fin de que el agua que ingresa al canal de conexión 2 lo haga en condiciones de flujo estable, subcrítico y uniformemente distribuido, puesto que será el régimen mediante el cual el flujo ingresará a la segunda rápida escalonada.

7.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES REFERENTES A LAS PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN EN EL DISEÑO ORIGINAL

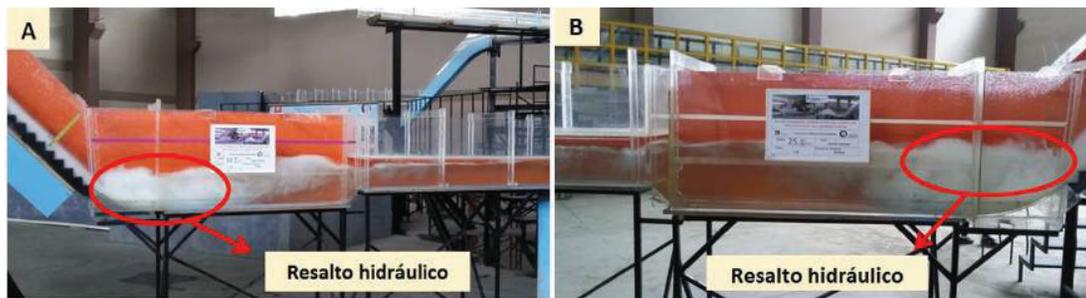
La combinación de las tres propuestas de optimización: impactador rectangular, impactador en forma de "L" invertida y sección de control, establece una gran diferencia en términos de comportamiento de flujo y eficiencia en la disipación de energía en el cuenco amortiguador 2. Se realiza una comparación gráfica del comportamiento del flujo sin y con las modificaciones propuestas a través de las siguientes figuras:

FIGURA 7.2: VISTA LATERAL DERECHA DEL CUENCO DISIPADOR 2 SIN MODIFICACIONES (A). VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL CUENCO DISIPADOR 2 SIN MODIFICACIONES (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55\text{m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

FIGURA 7.3: VISTA LATERAL DERECHA DEL CUENCO DISIPADOR 2 CON MODIFICACIONES (A). VISTA LATERAL IZQUIERDA DEL CUENCO DISIPADOR 2 CON MODIFICACIONES (B). $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 56.55\text{m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

Con caudales en el orden de los $60\text{ m}^3/\text{s}$, se logra estabilizar completamente el resalto hidráulico a lo largo del lecho del cuenco disipador. Cabe recalcar que el comportamiento del flujo hacia aguas abajo de la pantalla en forma de "L", es más uniformemente distribuido que aquél aguas abajo de la pantalla rectangular en el canal de salida.

Hasta caudales en el orden de los $100\text{ m}^3/\text{s}$, se logra la formación del resalto hidráulico en el cuenco disipador 2, razón por la cual en cuanto a términos respecto a la eficiencia en la disipación de energía que se requiere en la estructura aguas abajo de la rápida escalonada, se toma a este caudal como el caudal óptimo de eficiente operación.

Sin embargo, cabe hacer mención que en el canal de conexión aguas abajo de los impactado-

res, existe todavía gran influencia del arrastre de aire generado por el resalto y al funcionar esta estructura aproximadamente a su capacidad completa con un porcentaje de llenado del 95 %, pueden producirse riesgos de cavitación. Por tanto, se recomienda elevar la cubierta del canal de conexión 2, con el propósito de confinar la altura del flujo aireado ocasionado por la formación del resalto, impedir que se generen impactos del flujo altamente turbulento bajo la cubierta y a su vez minimizar o eliminar los riesgos de cavitación.

FIGURA 7.4: PRUEBA 6. VISTA LATERAL IZQUIERDA CUENCO DISIPADOR Y CANAL DE CONEXIÓN 2. $Q_{TOTALPROTOTIPO} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$



ELABORADO POR: Equipo de investigación Rápidas-EPMAPS 2015-2016

El caudal óptimo de eficiente operación del sistema con diseño original $42 \text{ m}^3/\text{s}$ se incrementa a $100 \text{ m}^3/\text{s}$ con la implementación de las modificaciones propuestas, es decir, se amplía el rango eficiente y seguro de caudales de operación en un 40 %.

REFERENCIAS

- [Boes and Hager, 2003] Boes, R. M. and Hager, W. H. (2003). Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9):671–679.
- [Castro,] Castro, M. Análisis dimensional y modelación física en hidráulica. *Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador*.
- [Çengel et al., 2006] Çengel, Y. A., Cimbala, V., John, M., et al. (2006). *Fluid mechanics fundamentals and applications. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. Number TA357. C4318 2006.
- [Chamani and Rajaratnam, 1999] Chamani, M. and Rajaratnam, N. (1999). Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4):361–368.
- [Chanson, 1994] Chanson, H. (1994). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of hydraulic research*, 32(2):213–218.
- [Chanson, 1996] Chanson, H. (1996). Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. *Journal of Hydraulic Research*, 34(3):421–429.
- [Chanson, 2002] Chanson, H. (2002). *Hydraulics of stepped chutes and spillways*. CRC Press.
- [Chanson, 2004] Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow*. Butterworth-Heinemann.
- [Chanson et al., 2015] Chanson, H., Bung, D., and Matos, J. (2015). Stepped spillways and cascades. *Energy Dissipation in Hydraulic Structures, IAHR Monograph, CRC Press, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands*, pages 45–64.
- [Chow, 1986] Chow, V. T. (1986). Hidráulica de los canales abiertos. Technical report.
- [CIERHI-EPN, 2015] CIERHI-EPN (2015). *Términos de referencia*. Quito.

- [EPMAPS, 2005] EPMAPS (2005). *Diseños definitivos para el control de la escorrentía con la prolongación del colector Ñaquito desde la plaza argentina hasta el río Machángara*. Quito.
- [FRANK, 2008] FRANK, M. W. (2008). *Mecánica de fluidos*. madrid, españa. ed.
- [Gilberto, 2001] Gilberto, S. Á. (2001). *Hidráulica general*. *Limusa*. México.
- [González and Chanson, 2007] González, C. A. and Chanson, H. (2007). Diseño hidráulico de vertedores escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental. *Ingeniería hidráulica en México*, 22(2):5–20.
- [Hidalgo, 2007] Hidalgo, M. (2007). *Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas*. *Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador*.
- [Naudascher and Castro, 2000] Naudascher, E. and Castro, M. (2000). *Hidráulica de canales y estructuras hidráulicas en canales. Traducción al español del texto de igual nombre en alemán*. Editorial Limusa.
- [Simões et al., 2012] Simões, A. L. A., Schulz, H. E., Lobosco, R. J., and de Melo Porto, R. (2012). *Stepped spillways: theoretical, experimental and numerical studies*. INTECH Open Access Publisher.
- [Tozzi, 1992] Tozzi, M. (1992). *Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus [characterization of flow behavior in stepped spillways]*.

ANEXOS

ANEXO 1
CONSTRUCCIÓN MODELO FÍSICO

TANQUE DE ABASTECIMIENTO

Corte y soldadura de placas y perfiles de acero estructural (construcción del tanque, columnas y vigas para el soporte)



Instalación de las columnas sobre las placas de anclaje



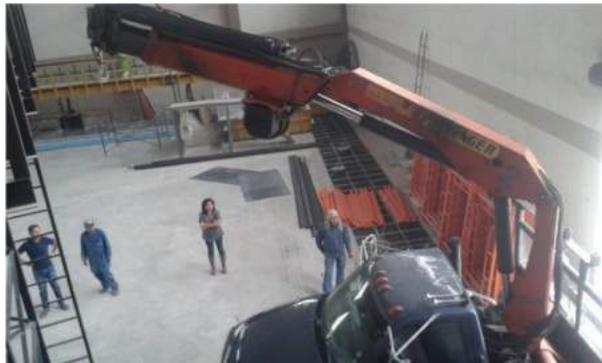
Instalación de las vigas sobre las columnas



Soldadura de base y paredes del tanque



Instalación del tanque con la ayuda de un camión grúa



Trabajos de sellado y pintura definitiva del tanque y torre



INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN

Colocación de los accesorios (bridas, válvula de compuerta, válvula de aire, codos) de la tubería de presión



PANTALLA UNIFORMIZADORA

Trabajos de lijado, sellado y pintura de las tablas triplex



Elaboración de los orificios de la pantalla uniformizadora



FABRICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN ACRÍLICO Y MOLDEOS

Fabricación de los moldes de madera para el moldeo de los perfiles parabólicos de la transición e inicio de la rápida escalonada, así como el perfil circular del inicio del segundo cuenco disipador.



Colocación de las piezas de acrílico en el horno, previo al proceso de moldeo



Moldeo de las piezas de acrílico.



Perfiles moldeados



Construcción de base, paredes y gradas del primer cuenco disipador.



Construcción de gradas y paredes de la rápida escalonada.



Construcción de base y parte recta de las paredes de la sección tipo baúl del túnel de aproximación



Fabricación del molde de madera con hormigón armado para el moldeo de la cubierta circular de la sección tipo baúl del túnel de aproximación.



Moldeo de las piezas de acrílico.



MONTAJE DEL MODELO FÍSICO

Elaboración de estructuras auxiliares (mesas y perfiles) para el soporte del modelo físico.



Instalación y sujeción de andamios y estructuras auxiliares para el soporte del modelo físico.



Montaje y sujeción de la rápida escalonada.



TANQUE Y CANAL DE DESCARGA

Corte e instalación de la malla electrosoldada, previo a la construcción de la losa de hormigón.



Construcción losa de cimentación y colocación de mortero y ladrillos para la construcción de las paredes del tanque y canal de descarga.



TANQUE Y CANAL DE DESCARGA

Enlucido de las paredes del tanque y canal de descarga.



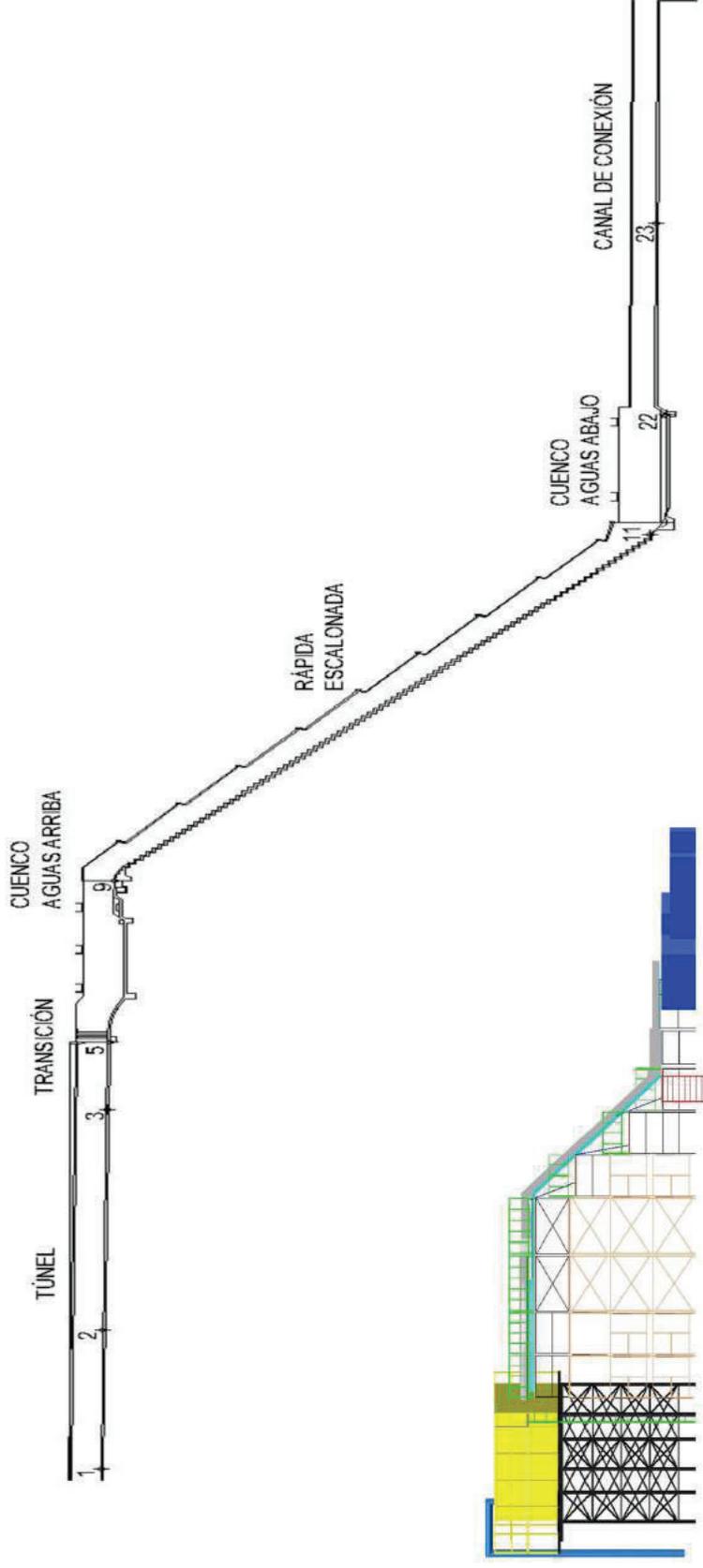
Aplicación de pintura externa e interna del tanque y canal de descarga.



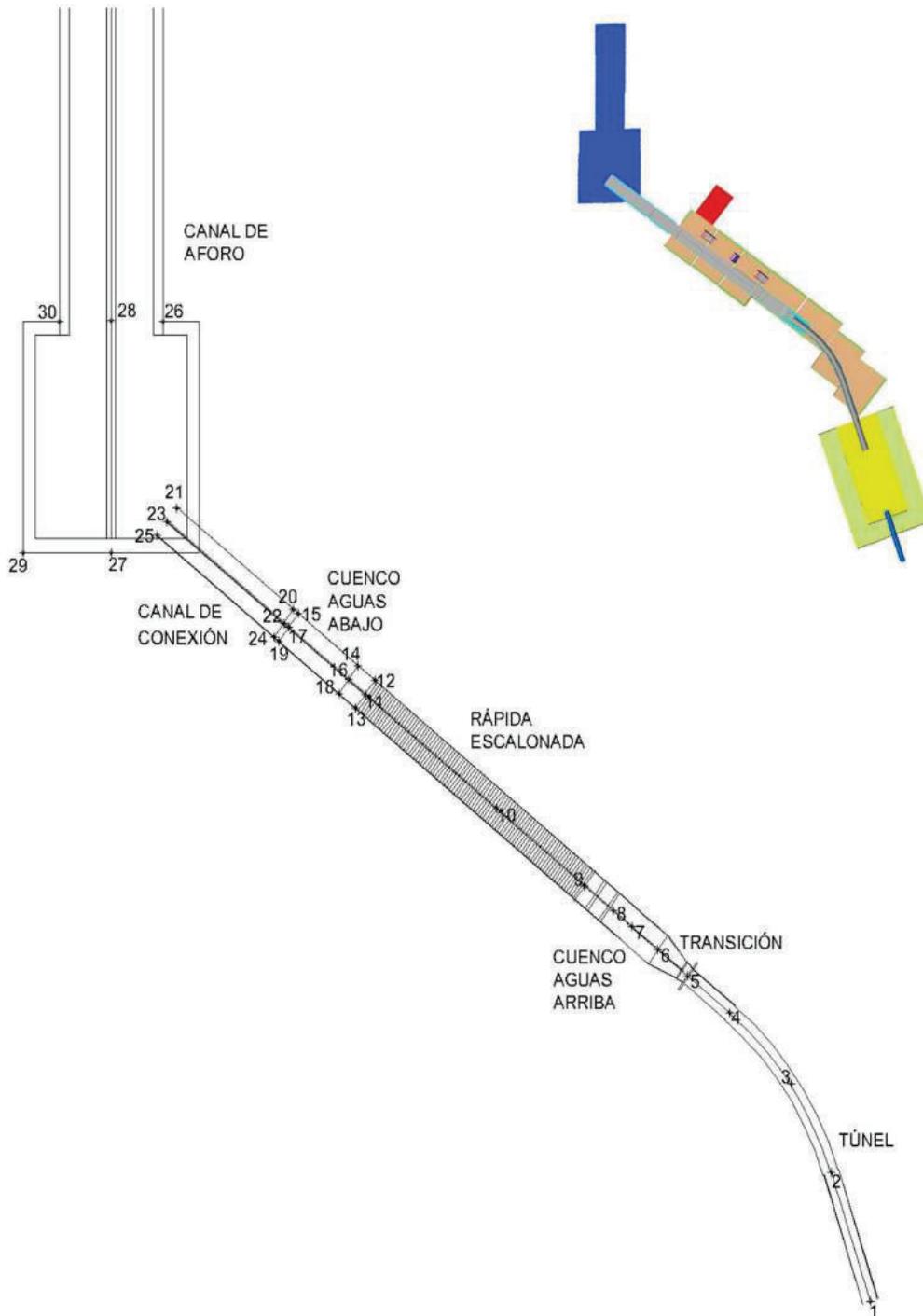
ANEXO 2

ESQUEMAS CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA

Esquema de los puntos considerados para realizar el levantamiento altimétrico del modelo físico de la Rápida Escalonada



Esquema de los puntos considerados para realizar el levantamiento planimétrico del modelo físico de la Rápida Escalonada



ANEXO 3
REGISTRO DE DATOS

Registro de datos obtenidos del aforo volumétrico del vertedero triangular



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS
(CIERHI)
REGISTRO DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE LOS
MODELOS FÍSICOS
MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA

NOMBRE: ESCALONADA

HORA: 12:30 PM

FECHA: 23/12/2015

VERTEDERO TRIANGULAR DE PARED DELGADA CON ÁNGULO EN EL VÉRTICE DE 90°					
Lectura cero vertedero: h_0 (cm) =			20.58		
No.	h_{medido} (cm)	Carga sobre el vertedero h' (cm) = $h_{\text{medido}} - h_0$	Volumen V (l)	Tiempo t (s)	Caudal Q (l/s)
1	28.28	7.7	8.205	3.02	2.72
	28.28	7.7	7.310	2.89	2.53
	28.26	7.68	7.24	2.84	2.55
2	32.04	11.46	12.70	1.92	6.61
	32.04	11.46	15.91	2.38	6.68
	32.04	11.46	13.75	2.07	6.64
3	35.96	15.38	14.90	0.99	15.05
	35.96	15.38	23.70	1.683	14.08
	35.96	15.38	16.56	1.10	15.05
4	39.21	18.63	24.24	1.17	20.72
	39.03	18.45	31.25	1.69	18.49
	39.03	18.45	50.10	2.29	21.88
5	41.59	21.01	27.53	0.87	31.64
	41.59	21.01	32.49	1.02	31.85
	41.59	21.01	41.52	1.37	30.31

Registro de datos en la Prueba P-1 (Q prototipo = 44.91 m³/s). Lecturas limnómetros. (VALIDACIÓN)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 9:00 FECHA: 17/12/2015
 No. Prueba: 1

Ecuación experimental - Curva de descarga:

$Q = 0.0176 \cdot h^{2.4434}$

Lectura cero limnómetro: h_0 (cm) = 20.58
 Lectura medida limnómetro: h_{lm} (cm) = 40.12
 Caudal medido en modelo: Q_m (l/s) = 25.10
 Caudal en prototipo: Q_p (m³/s) = 44.91

TÚNEL BAÚL : Tramo recto - Ingreso curva		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =	9.22	
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	16.19	
CUENCO DISIPADOR 1		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =	26.75	
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	39.68	Medición realizada en la mitad de la sección del tramo después de la primera grada. 
2	39.66	
3	39.65	
RÁPIDA ESCALONADA : Inicio perfil parabólico		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =	31.14	
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	36.27	En la segunda grada se empiezan a formar pequeñas cavidades de aire, en la tercera se incrementan y desde la cuarta se observan vórtices de flujo recirculante que ocupan todo el volumen bajo el pseudofondo.
2	35.92	
3	35.66	
CUENCO DISIPADOR 2		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =	5.26	
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	25.15	* Medición realizada 26 cm aguas arriba del final del cuenco propiamente dicho.
2	24.96	
3	24.60	* Dificultad en medir por la presencia de una alta fluctuación.

NOTA:
 Medida 1: Cerca del margen izquierdo
 Medida 2: Aproximadamente en la mitad de la sección
 Medida 3: Cerca del margen derecho

Registro de datos en la Prueba P-1 (Q prototipo = 44.91 m³/s). Lecturas cintas de medida. (VALIDACIÓN)



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

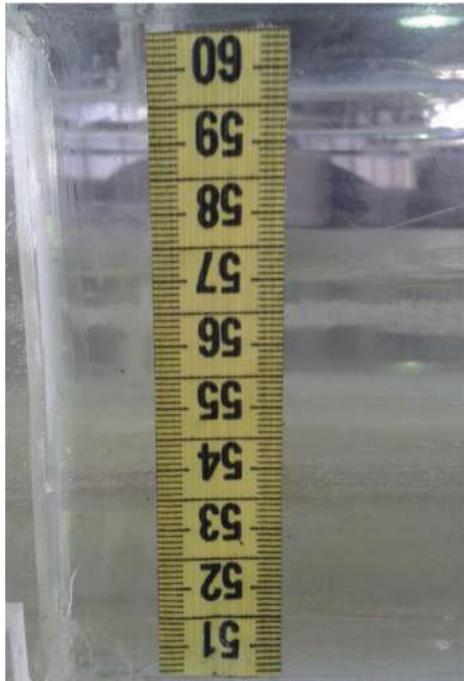
REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 9:00 FECHA: 17/12/2015
 No. Prueba: 1

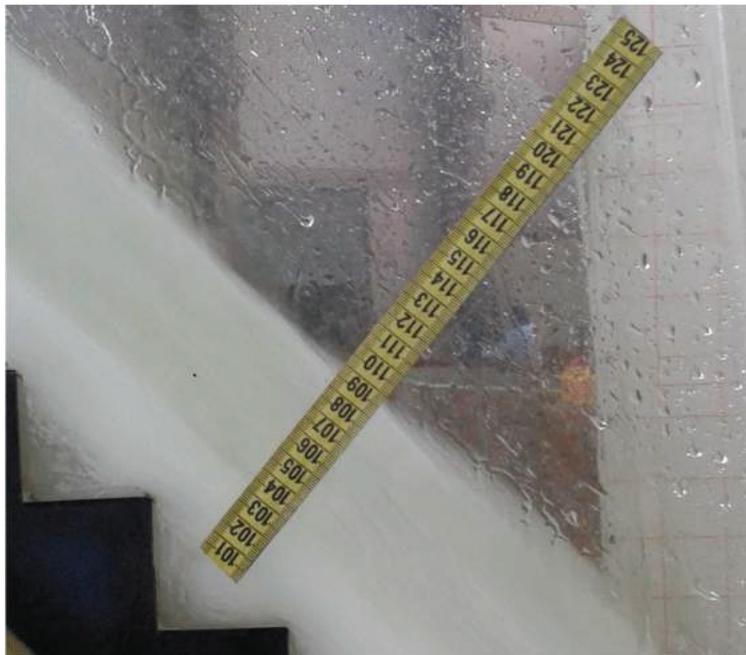
Ecuación experimental - Curva de descarga: $Q = 0.0176 * h^{2.4434}$
 Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)= 20.58
 Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)= 40.12
 Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)= 25.10
 Caudal en prototipo: Q_P (m³/s)= 44.91

CINTAS DE MEDIDA			
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)	Ubicación	Observaciones
1	6.7	Tramo curvo túnel	Presencia de ondas cruzadas.
2	3.3 - 5.9	Inicio transición	Variación alta de medición debido a una alteración en el flujo producida por las ranuras de las compuertas.
3	14.0 - 15.0	Final transición	Alta turbulencia por la presencia de resalto hidráulico.
4	16.5 - 17.9	Final cuenco disipador 1	Presencia de pequeñas ondulaciones en la superficie del agua.
5	4.9	Inicio rápida escalonada	
6	3.6	Tramo medio rápida escalonada	Formación de vórtices de flujo recirculante que ocupan todo el volumen bajo el pseudofondo. Flujo rasante.
7	3.4	Final rápida escalonada	Formación de vórtices de flujo recirculante que ocupan todo el volumen bajo el pseudofondo. Flujo rasante.
8	8.2	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	Alta turbulencia por la presencia de resalto hidráulico.
9	18.5	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	Presencia de fuertes ondulaciones en la superficie del agua.
10	4.7	Tramo medio canal conexión 2	Presencia de ondulaciones en la superficie del agua.

Lectura cinta de medida No. 1 en el tramo curvo del túnel de aproximación. Prueba P-1 (Q prototipo = 44.91 m³/s)



Lectura cinta de medida No. 7 en el tramo final de la rápida escalonada. Prueba P-1 (Q prototipo = 44.91 m³/s)



Registro de datos en la Prueba P-2 (Q prototipo = 20.76 m³/s). Lecturas limnómetros. (VALIDACIÓN)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 15:36 FECHA: 18/12/2015
 No. Prueba: 2

Ecuación experimental - Curva de descarga:

$Q = 0.0176 \cdot h^{2.4434}$

Lectura cero limnómetro: h_0 (cm) = 20.58
 Lectura medida limnómetro: h_{lm} (cm) = 34.83
 Caudal medido en modelo: Q_m (l/s) = 11.61
 Caudal en prototipo: Q_p (m³/s) = 20.76

TÚNEL BAÚL : Tramo recto - Ingreso curva		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		9.22
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	13.59	
CUENCO DISIPADOR 1		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		24.98
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	34.71	Medición realizada en la mitad de la sección del tramo después de la primera grada.
2	34.57	
3	34.63	
RÁPIDA ESCALONADA : Inicio perfil parabólico		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		29.48
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	32.47	* La lámina de agua impacta en la tercera y cuarta grada. * En la tercera grada se empiezan a formar pequeñas cavidades de aire y desde la cuarta se observan vórtices de flujo recirculante que ocupan aproximadamente el 75% del volumen bajo el pseudofondo.
2	32.21	
3	32.17	
CUENCO DISIPADOR 2		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		7.28
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	22.82	* Medición realizada 26 cm aguas arriba del final del cuenco propiamente dicho.
2	22.86	
3	22.84	* Dificultad en medir por la presencia de una alta fluctuación.

NOTA:

- Medida 1: Cerca del margen izquierdo
- Medida 2: Aproximadamente en la mitad de la sección
- Medida 3: Cerca del margen derecho

Registro de datos en la Prueba P-2 (Q prototipo = 20.76 m³/s). Lecturas cintas de medida. (VALIDACIÓN)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA

HORA: 15:36

FECHA: 18/12/2015

No. Prueba: 2

Ecuación experimental - Curva de descarga:

$Q = 0.0176 * h^{2.4434}$

Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)= 20.58

Lectura medida limnómetro: h_{im} (cm)= 34.83

Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)= 11.61

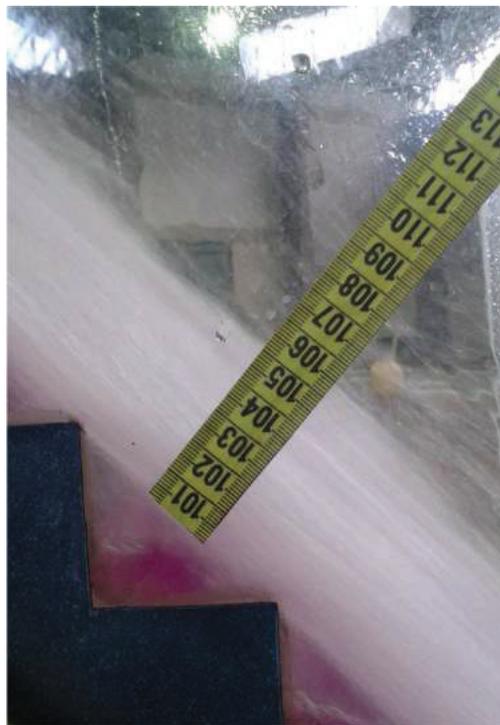
Caudal en prototipo: Q_P (m³/s)= 20.76

CINTAS DE MEDIDA			
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)	Ubicación	Observaciones
1	4.1 - 4.3	Tramo curvo túnel	Presencia de ondas cruzadas.
2	3.2	Inicio transición	
3	4.4	Final transición	Turbulencia por la presencia de resalto hidráulico.
4	12.2 - 13.1	Final cuenco disipador 1	Presencia de pequeñas ondulaciones en la superficie del agua.
5	14.6	Inicio rápida escalonada	
6	2.4 - 3	Tramo medio rápida escalonada	Formación de vórtices de flujo recirculante que ocupan aproximadamente el 75% del volumen bajo el pseudofondo. Flujo transitorio.
7	2.2	Final rápida escalonada	Formación de vórtices de flujo recirculante que ocupan aproximadamente el 75% del volumen bajo el pseudofondo. Flujo transitorio.
8	13.5	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	Alta turbulencia por la presencia de resalto hidráulico.
9	13.7 - 16.4	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	Presencia de ondulaciones en la superficie del agua.
10	3 - 4.4	Tramo medio canal conexión 2	Presencia de ondulaciones en la superficie del agua.

Lectura cinta de medida No. 1 en el tramo curvo del túnel de aproximación. Prueba P-2 (Q prototipo = 20.76 m³/s)



Lectura cinta de medida No. 7 en el tramo final de la rápida escalonada. Prueba P-2 (Q prototipo = 20.76 m³/s)



Registro de datos en la Prueba P-3 (Q prototipo = 8.98 m³/s). Lecturas limnómetros. (VALIDACIÓN)



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

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 10:40 FECHA: 18/12/2015
 No. Prueba: 3

Ecuación experimental - Curva de descarga:

$Q = 0.0176 \cdot h^{2.4434}$

Lectura cero limnómetro: h_0 (cm) = 20.58
 Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm) = 30.69
 Caudal medido en modelo: Q_m (l/s) = 5.02
 Caudal en prototipo: Q_p (m³/s) = 8.98

TÚNEL BAÚL : Tramo recto - Ingreso curva		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		9.22
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	11.93	* Dificultad en realizar la medición de una manera precisa debido a la incidencia de tensión superficial alrededor de la punta del limnómetro.
CUENCO DISIPADOR 1		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		24.98
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	32.44	* Dificultad en realizar la medición de una manera precisa debido a la incidencia de tensión superficial alrededor de la punta del limnómetro.
2	32.39	* Medición realizada en la mitad de la sección del tramo después de la primera grada.
3	32.39	
RÁPIDA ESCALONADA : Inicio perfil parabólico		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		29.36
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	30.95	* Dificultad en realizar la medición de una manera precisa debido a la incidencia de tensión superficial alrededor de la punta del limnómetro.
2	30.97	La lámina de agua impacta en la huella de la primera grada y se desprende llegando a la sexta, séptima y octava. Aguas abajo de estas gradas se presenta un tipo de flujo con cavidades de aire alternadas con vórtices de flujo recirculante.
3	30.97	
CUENCO DISIPADOR 2		
Lectura cero limnómetro h_0 (cm) =		7.28
No.	h_{medido} (cm)	Observaciones
1	20.56	* Medición realizada 26 cm aguas arriba del final del cuenco propiamente dicho.
2	20.88	
3	20.57	* Dificultad en medir por la presencia de una alta fluctuación.

NOTA:

- Medida 1: Cerca del margen izquierdo
- Medida 2: Aproximadamente en la mitad de la sección
- Medida 3: Cerca del margen derecho

Registro de datos en la Prueba P-3 (Q prototipo = 8.98 m³/s). Lecturas cintas de medida. (VALIDACIÓN)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 10:40 FECHA: 18/12/2015
 No. Prueba: 3

Ecuación experimental - Curva de descarga:

$Q = 0.0176 * h^{2.4434}$

Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)= 20.58
 Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)= 30.69
 Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)= 5.02
 Caudal en prototipo: Q_p (m³/s)= 8.98

CINTAS DE MEDIDA			
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)	Ubicación	Observaciones
1	2.2 - 2.3	Tramo curvo túnel	Presencia de pequeñas ondas cruzadas.
2	1.6	Inicio transición	
3	11 - 11.4	Final transición	Turbulencia por la presencia de resalto hidráulico. Resalto débil
4	11.2	Final cuenco disipador 1	
5	1.9 - 1.6	Inicio rápida escalonada	
6	1.0 - 1.5	Tramo medio rápida escalonada	Se observa un tipo de flujo con cavidades de aire alternadas con vórtices de flujo recirculante debajo de la corriente principal. Flujo transitorio
7	1.0 - 1.5	Final rápida escalonada	Se observa un tipo de flujo con cavidades de aire alternadas con vórtices de flujo recirculante debajo de la corriente principal. Flujo transitorio
8		Cuenca disipador 2 / final perfil circular	Turbulencia por la presencia de resalto hidráulico.
9	13.6	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	Presencia de ondulaciones en la superficie del agua.
10		Tramo medio canal conexión 2	Presencia de ondulaciones en la superficie del agua.

Lectura cinta de medida No. 1 en el tramo curvo del túnel de aproximación. Prueba P-3 (Q prototipo = 8.98 m³/s)



Lectura cinta de medida No. 7 en el tramo final de la rápida escalonada. Prueba P-3 (Q prototipo = 8.98 m³/s)



Registro de datos en la Prueba P-1 (Q prototipo = 46.61 m³/s). Lecturas cintas.
(DISEÑO ORIGINAL)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 15:50 FECHA: 16/02/2016
 No. Prueba: 1

Ecuación experimental - Curva de descarga:

$$Q = 0.0176 \cdot h^{2.4434}$$

	Margen Izquierda	Margen Derecha
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	29.44	20.58
Lectura medida limnómetro: h_{lm} (cm)=	43.83	36.04
Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)=	11.89	14.17
Caudal en prototipo: Q_P (m ³ /s)=	21.27	25.34

CINTAS DE MEDIDA

No.	Altura de agua h_{medido} (cm)		Ubicación	Observaciones
1	7,2		Tramo curvo túnel	
	MI	MD		
2	6,8	7,6	Final túnel	
3	2	2,3	Final transición	MD: Formación resalto (no se puede medir por la fluctuación)
4	16,75	18,75	Final cuenco disipador 1	
5	6,4	6,9	Inicio rápida escalonada	MD: 3er y 4to escalón, pequeñas cavidades aire desde el 5to ya hay vortices recirculantes.
6	3-4,5	3,5-4,8	Tramo medio rápida escalonada	Formación skimming flow
7	3-4,5	3,5-4,8	Final rápida escalonada	Formación skimming flow
8	2,1	2,5	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	MD: resalto rechazado MI: Resalto, no se puede medir x turbulencia L=95cm
9	20,2	2,5	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	
10	10,3	10	Tramo medio canal conexión 2	MD: Fluo impact en el techo, sale en dirección de la grada, hasta 84-90cm aguas abajo la lámina de agua se adhiere al techo, fluctuación en canal de conexión. MI: Ondas superficiales.

Registro de datos en la Prueba P-2 (Q prototipo = 56.55m³/s). Lecturas cintas.
(DISEÑO ORIGINAL)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 9:00 FECHA: 17/02/2016
 No. Prueba: 2

Ecuación experimental - Curva de descarga:	$Q = 0.0176 * h^{2.4434}$	
	Margen Izquierda	Margen Derecha
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	29.44	20.58
Lectura medida limnómetro: h_{im} (cm)=	45.02	37.31
Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)=	12.44	17.18
Caudal en prototipo: Q_p (m ³ /s)=	25.82	30.73

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)		Ubicación	Observaciones
	MI	MD		
1	8,1		Tramo curvo túnel	
2	7,7	8,6	Final túnel	
3	2,3	2,7	Final transición	Resalto hidráulico en las dos cámaras
4	19,3	20,5	Final cuenco disipador 1	
5	7,0	7,8	Inicio rápida escalonada	MI: Ingreso de aire en la 3era huella MD: Inicio de aire 4ta huella
6	4,4	4,6	Tramo medio rápida escalonada	Formación skimming flow
7	4,4	4,6	Final rápida escalonada	
8	2,6	2,8	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	MI: Resalto, L=1,12m
9	20,1	2,8	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	
10	7,1	8,2	Tramo medio canal conexión 2	MD: Fluo impact en el techo, hasta 80cm aguas abajo después de la grada, fluctuación en canal de conexión.

Registro de datos en la Prueba P-3 (Q prototipo = 80.19m³/s). Lecturas cintas.
(DISEÑO ORIGINAL)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 11:00 FECHA: 17/02/2016
 No. Prueba: 3

Ecuación experimental - Curva de descarga:	$Q = 0.0176 * h^{2.4434}$	
	Margen Izquierda	Margen Derecha
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	29.44	20.58
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	47.60	39.71
Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)=	20.99	23.84
Caudal en prototipo: Q_p (m ³ /s)=	37.55	42.64

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)		Ubicación	Observaciones
1	10,3		Tramo curvo túnel	
	MI	MD		
2	9,9	10,8	Final túnel	
3	3,2	3,5	Final transición	Resalto hidráulico en las dos cámaras
4	21	23	Final cuenco disipador 1	
5	9	9,7	Inicio rápida escalonada	MI: Ingreso de aire en la 5ta huella intermitente: 7ma presencia de vórtices
6	5,2-5,8	4,8-6	Tramo medio rápida escalonada	Formación skimming flow
7	5,2-5,8	4,8-6	Final rápida escalonada	
8	3,4	3,5	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	Resaltos rechazados en ambas cámaras
9	4	4,5	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	
10	9,4	10,3	Tramo medio canal conexión 2	MI: Flujo impacta en pared superior, cae a 80cm. MD: Flujo impacta en pared superior, cae a 85cm.

Registro de datos en la Prueba P-4 (Q prototipo = 101.78m³/s). Lecturas cintas.
(DISEÑO ORIGINAL)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 12:00 FECHA: 17/02/2016
 No. Prueba: 4

Ecuación experimental - Curva de descarga:	$Q = 0.0176 \cdot h^{2.4434}$	
	Margen Izquierda	Margen Derecha
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	29.44	20.58
Lectura medida limnómetro: h_{lm} (cm)=	49.32	41.8
Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)=	26.19	30.71
Caudal en prototipo: Q_p (m ³ /s)=	46.84	54.94

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)		Ubicación	Observaciones
	MI	MD		
1	12,2		Tramo curvo túnel	
2	11,5	12,9	Final túnel	
3	3,8	4,3	Final transición	Resalto hidráulico en las dos cámaras MD: Longitud resalto = 90cm; MI: Longitud resalto = 70cm
4	24,5	25	Final cuenco disipador 1	
5	10,4	11,5	Inicio rápida escalonada	
6	5,6-7	6,5-7,5	Tramo medio rápida escalonada	Formación skimming flow
7	5,6-7	6,5-7,5	Final rápida escalonada	
8	4	4,6	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	Resaltos rechazados en ambas cámaras
9	4	4,6	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	
10	11	12,5	Tramo medio canal conexión 2	MI: Flujo impacta en pared superior, cae a 83cm. MD: Flujo impacta en pared superior, cae a 81cm.

Registro de datos en la Prueba P-5 (Q prototipo = $8.08\text{m}^3/\text{s}$). Lecturas cintas.
(DISEÑO ORIGINAL)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 14:30 FECHA: 17/02/2016
 No. Prueba: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga:	$Q = 0.0176 \cdot h^{2.4434}$	
	Margen Izquierda	Margen Derecha
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	29.44	20.58
Lectura medida limnómetro: h_{lm} (cm)=	36.50	28.1
Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)=	2.09	2.44
Caudal en prototipo: Q_p (m^3/s)=	3.73	4.36

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)		Ubicación	Observaciones
1	2,5		Tramo curvo túnel	
	MI	MD		
2	2,4	2,7	Final túnel	
3	0,4	0,5	Final transición	
4	11,9	12,1	Final cuenco disipador 1	
5	2,7	2,8	Inicio rápida escalonada	Impacta en 1era grada y salta hasta la 4ta grada
6	1	1	Tramo medio rápida escalonada	Flujo transitorio
7	1	1	Final rápida escalonada	
8	0,5	0,6	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	Resalto en ambas celdas MI y MD: Longitud resalto 24cm
9	11,8-14,5	12,5-14,3	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	
10	2,02	2,2	Tramo medio canal conexión 2	

Registro de datos en la Prueba P-6 (Q prototipo = 149.07m³/s). Lecturas cintas.
(DISEÑO ORIGINAL)



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

REGISTRO DE DATOS

NOMBRE: MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA
 HORA: 15:00 FECHA: 17/02/2016
 No. Prueba: 6

Ecuación experimental - Curva de descarga:	$Q = 0.0176 \cdot h^{2.4434}$	
	Margen Izquierda	Margen Derecha
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	29.44	20.58
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	53.20	44.9
Caudal medido en modelo: Q_m (l/s)=	40.48	42.85
Caudal en prototipo: Q_p (m ³ /s)=	72.42	76.66

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua h_{medido} (cm)		Ubicación	Observaciones
1	16,4		Tramo curvo túnel	
	MI	MD		
2	16	16,7	Final túnel	
3	5,4	5,7	Final transición	
4	5,8-6,3	-	Final cuenco disipador 1	MD: imposible medir flujo impacta en pared intermedia
5	7,5-14	14,22	Inicio rápida escalonada	Impacta en 1era grada y salta hasta la 4ta grada
6	10,4	9,5	Tramo medio rápida escalonada	Formación skimming flow
7	10,4	9,5	Final rápida escalonada	
8	5,9	5,6	Cuenca disipador 2 / final perfil circular	Resalto en ambas celdas MI y MD: Longitud resalto 24cm
9	5,5-8	6,4-9	Cuenca disipador 2 / inicio grada de subida	
10	15,3	16,1	Tramo medio canal conexión 2	MI: Flujo impacta en pared superior, cae a 90cm. MD: Flujo impacta en pared superior, cae a 85cm.

ANEXO 4
CÁLCULOS

ANÁLISIS DIMENSIONAL

i. Identificar todas las variables (n) que intervienen en el fenómeno hidráulico

- Variables dependientes

V = Velocidad. $[m/s]$

q = Caudal unitario $[m^3/s/m]$

y = Calado $[m]$

- Variables independientes

h = Altura de grada (contrahuella). $[m]$

l = Longitud de grada (huella). $[m]$

b = Ancho del canal. $[m]$

θ = Ángulo de inclinación de la rápida. $[^\circ]$

g = Aceleración de la gravedad. $[m/s^2]$

γ = Peso específico del agua. $[kg/m^3]$

Número total de variables: $n= 9$

ii. Las dimensiones primarias (j) son: Longitud (L), masa (M) y tiempo (T).

Número de dimensiones primarias: $n= 3$

iii. Teorema Pi Buckingham. $k=n-j$

Número de parámetros adimensionales: $k= 6 (\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6)$

iv. Establecer las variables repetitivas para la determinación de las variables Π en la matriz característica, su determinante no debe ser nulo.

Variables Repetitivas	L	M	T
V	1	0	-1
Y	1	0	0
γ	-3	1	0

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

Matriz característica:

Variables	L	M	T
V	1	0	-1
Y	1	0	0
y	-3	1	0
h	1	0	0
l	1	0	0
b	1	0	0
θ	0	0	0
g	1	0	-2
q	2	0	-1

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

v. Determinación de los parámetros Π adimensionales

Π_1				
	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

Π_1	
Resultados	
a =	0
b =	-1
c =	0

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

$$\Pi_1 = \frac{h}{y}$$

Π_2				
	a	b	c	l
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

Π_2	
Resultados	
a =	0
b =	-1
c =	0

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

$$\Pi_2 = \frac{l}{y}$$

Π_3				
	a	b	c	b
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

Π_3	
Resultados	
a =	0
b =	-1
c =	0

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

$$\Pi_3 = \frac{b}{y}$$

Π4				
	a	b	c	Θ
L	1	1	-3	0
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

Π4	
Resultados	
a =	0
b =	0
c =	0

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

$$\Pi_4 = \Theta$$

Π5				
	a	b	c	g
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	2

Π5	
Resultados	
a =	-2
b =	1
c =	0

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

$$\Pi_5 = \frac{gy}{V^2} = \frac{V}{\sqrt{gy}} = Fr$$

Π6				
	a	b	c	q
L	1	1	-3	-2
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	1

Π6	
Resultados	
a =	-1
b =	-1
c =	0

ELABORADO POR: José López Peñafiel, Karen Soto Morales

$$\Pi_6 = \frac{q}{Vy} = Cd$$

- vi. Verificar que todos los parámetros Π sean adimensionales y escribir la función final de la forma de la ecuación 3.1.

$$Cd = f\left(\frac{h}{y}, \frac{l}{y}, \frac{b}{y}, \Theta, Fr\right)$$

Predominan las fuerzas de gravedad.

CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS

Parámetros obtenidos al aplicar la fórmula expuesta por la Hegly para obtener la curva de descarga

h' (m)	C	Q (l/s)
0.10	1.46	4.62
0.15	1.43	12.49
0.20	1.42	25.39
0.23	1.41	37.57

Parámetros obtenidos al aplicar la fórmula expuesta por la Universidad Católica de Chile para obtener la curva de descarga

h' (m)	u	B/h'	K	C	Q (l/s)
0.05	0.600	12.00	1.000	1.42	0.79
0.10	0.592	6.00	1.000	1.40	4.42
0.15	0.589	4.00	1.015	1.41	12.31
0.20	0.589	3.00	1.039	1.45	25.86
0.23	0.589	2.56	1.048	1.46	38.74

NÚMEROS ADIMENSIONALES

Determinación de Fr, Re, We y λ del flujo de aproximación para modelo y prototipo. Prueba P-2 (Q prototipo = 20.76 m³/s)

PARÁMETRO	PROTOTIPO		MODELO	
Caudal:	Q _p (m ³ /s) =	20.76	Q _m (l/s) =	11.61
Calado:	h _p (m)=	0.87	h _m (m)	0.0437
Perímetro mojado:	P _p (m) =	5.80	P _m (m) =	0.2905
Área mojada:	A _p (m ²)=	3.70	A _m (m ²)=	0.0093
Espejo de agua:	T _p (m)=	5.00	T _m (m)=	0.25
Profundidad hidráulica:	d _p (m)	0.74	d _m (m)	0.0372
Radio hidráulico:	Rh _p (m)=	0.64	Rh _m (m)=	0.0320
Velocidad:	v _p (m/s) =	5.62	v _m (m/s) =	1.25
Número de Froude:	Fr _p =	2.09	Fr _m =	2.07
Viscosidad cinemática:	U _p (m ² /s) =	1.00E-06	U _m (m ² /s) =	1.00E-06
Número de Reynolds:	Re _p =	1.43E+07	Re _m =	1.60E+05
Rugosidad absoluta:	ε _p (mm)=	1.00	ε _m (mm)=	0.0015
Factor de fricción (valor iterado)	λ _p =	1.59E-02	λ _m =	1.64E-02
Factor de fricción:	λ _p =	1.59E-02	λ _m =	1.64E-02
Tensión superficial:	σ _p (kg/m) =	7.39E-03	σ _m (kg/m)	7.39E-03
Densidad:	ρ _p (kg/m ³) =	1000.00	ρ _m (kg/m ³) =	1000.00
Número de Weber:	We _p =	1928.30	We _m =	95.98

Determinación de Fr , Re , We y λ del flujo de aproximación para modelo y prototipo. Prueba P-3 (Q prototipo = 8.98 m³/s)

PARÁMETRO	PROTOTIPO		MODELO	
Caudal:	Q_p (m ³ /s) =	8.98	Q_m (l/s) =	5.02
Calado:	h_p (m)=	0.52	h_m (m)	0.0271
Perímetro mojado:	P_p (m) =	4.88	P_m (m) =	0.2467
Área mojada:	A_p (m ²)=	2.06	A_m (m ²)=	0.0053
Espejo de agua:	T_p (m)=	4.45	T_m (m)=	0.2242
Profundidad hidráulica:	d_p (m)	0.46	d_m (m)	0.0236
Radio hidráulico:	Rh_p (m)=	0.42	Rh_m (m)=	0.0215
Velocidad:	v_p (m/s) =	4.36	v_m (m/s) =	0.95
Número de Froude:	Fr_p =	2.05	Fr_m =	1.97
Viscosidad cinemática:	U_p (m ² /s) =	1.00E-06	U_m (m ² /s) =	1.00E-06
Número de Reynolds:	Re_p =	7.35E+06	Re_m =	8.14E+04
Rugosidad absoluta:	ϵ_p (mm)=	1.00	ϵ_m (mm)=	0.0015
Factor de fricción (valor iterado)	λ_p =	1.74E-02	λ_m =	1.89E-02
Factor de fricción:	λ_p =	1.74E-02	λ_m =	1.89E-02
Tensión superficial:	σ_p (kg/m) =	7.39E-03	σ_m (kg/m)	7.39E-03
Densidad:	ρ_p (kg/m ³) =	1000.00	ρ_m (kg/m ³) =	1000.00
Número de Weber:	We_p =	1156.55	We_m =	57.33

LÍNEA DE ENERGÍA

Cálculos de energía por secciones. Prueba P-2 (Q prototipo = 46.606 m³/s)

Prueba No. 2:	Q _{TOTAL m} (m ³ /s) =	0.026		Q _{TOTAL P} (m ³ /s) =	46.606	
Dimensiones	SECCIÓN 0	SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		
		Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	
z(m) =	4.704	4.666	4.666	4.526	4.526	
y(m) =	0.072	0.068	0.076	0.01977	0.023	
v (m/s) =	1.600	1.550	1.630	2.406	2.481	
α =	1.150	1.150	1.150	1.100	1.100	
α*hv (m)	0.150	0.141	0.156	0.324	0.345	
E (m) =	4.926	4.874	4.897	4.871	4.894	
Fr =	1.995	2.000	1.981	5.463	5.239	
Dimensiones	SECCIÓN 3		SECCIÓN 4		SECCIÓN 5	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	4.526	4.526	4.614	4.614	0.146	0.146
y(m) =	0.175	0.185	0.082	0.087	0.045	0.049
v (m/s) =	0.272	0.306	0.580	0.651	1.511	1.639
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.116	1.116
α*hv (m)	0.004	0.005	0.019	0.024	0.130	0.153
E (m) =	4.71	4.72	4.71	4.72	0.30	0.32
Fr =	0.207	0.227	0.647	0.705	2.716	3.237
Dimensiones	SECCIÓN 6		SECCIÓN 7		SECCIÓN 8	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	0.000	0.000	0.000	0.000	0.099	0.099
y(m) =	0.0213	0.025	0.190	0.025	0.063	0.071
v (m/s) =	2.232	2.295	0.250	2.295	0.757	0.797
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
α*hv (m)	0.279	0.295	0.004	0.295	0.032	0.036
E (m) =	0.30	0.32	0.19	0.32	0.19	0.21
Fr =	4.881	4.663	0.183	4.663	0.965	0.955

Cálculos de energía por secciones. Prueba P-3 (Q prototipo = 56.554 m³/s)

Prueba No. 3:	QTOTAL m (m ³ /s) =	0.032	QTOTAL P (m ³ /s) =	56.554		
Dimensiones	SECCIÓN 0	SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		
		Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	
z(m) =	4.704	4.666	4.666	4.526	4.526	
y(m) =	0.081	0.077	0.086	0.02340	0.027	
v (m/s) =	1.690	1.640	1.720	2.467	2.559	
α =	1.150	1.150	1.150	1.100	1.100	
α*hv (m)	0.167	0.158	0.173	0.341	0.367	
E (m) =	4.953	4.900	4.925	4.891	4.920	
Fr =	1.966	1.979	1.951	5.149	4.987	
Dimensiones	SECCIÓN 3		SECCIÓN 4		SECCIÓN 5	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	4.526	4.526	4.614	4.614	0.146	0.146
y(m) =	0.193	0.205	0.085	0.090	0.052	0.054
v (m/s) =	0.300	0.335	0.679	0.764	1.582	1.803
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.116	1.116
α*hv (m)	0.005	0.006	0.026	0.033	0.142	0.185
E (m) =	4.72	4.74	4.72	4.74	0.31	0.36
Fr =	0.218	0.236	0.744	0.813	3.298	3.925
Dimensiones	SECCIÓN 6		SECCIÓN 7		SECCIÓN 8	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	0.000	0.000	0.000	0.000	0.099	0.099
y(m) =	0.0256	0.028	0.212	0.028	0.056	0.070
v (m/s) =	2.252	2.433	0.272	2.433	1.031	0.982
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
α*hv (m)	0.284	0.332	0.004	0.332	0.060	0.054
E (m) =	0.31	0.36	0.22	0.36	0.22	0.22
Fr =	4.491	4.621	0.189	4.621	1.391	1.185

Cálculos de energía por secciones. Prueba P-4 (Q prototipo = 80.191 m³/s)

Prueba No. 4:	QTOTAL m (m ³ /s) =		0.045	QTOTAL P (m ³ /s) =		80.191
Dimensiones	SECCIÓN 0		SECCIÓN 1		SECCIÓN 2	
			Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	4.704		4.666	4.666	4.526	4.526
y(m) =	0.103		0.099	0.108	0.03179	0.035
v (m/s) =	1.850		1.820	1.880	2.641	2.698
α =	1.150		1.150	1.150	1.100	1.100
α*hv (m)	0.201		0.194	0.207	0.391	0.408
E (m) =	5.008		4.959	4.981	4.949	4.970
Fr =	1.898		1.911	1.884	4.730	4.582
Dimensiones	SECCIÓN 3		SECCIÓN 4		SECCIÓN 5	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	4.526	4.526	4.614	4.614	0.146	0.146
y(m) =	0.225	0.230	0.110	0.125	0.064	0.063
v (m/s) =	0.373	0.415	0.764	0.763	1.864	2.141
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.116	1.116
α*hv (m)	0.008	0.010	0.033	0.033	0.198	0.261
E (m) =	4.76	4.77	4.76	4.77	0.38	0.44
Fr =	0.251	0.276	0.736	0.689	4.795	5.446
Dimensiones	SECCIÓN 6		SECCIÓN 7		SECCIÓN 8	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	0.000	0.000	0.000	0.000	0.099	0.099
y(m) =	0.0338	0.035	0.040	0.045	0.094	0.103
v (m/s) =	2.485	2.687	2.099	2.119	0.893	0.925
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
α*hv (m)	0.346	0.405	0.247	0.252	0.045	0.048
E (m) =	0.38	0.44	0.29	0.30	0.24	0.25
Fr =	4.317	4.553	3.351	3.189	0.930	0.920

Cálculos de energía por secciones. Prueba P-5 (Q prototipo = 101.778 m³/s)

Prueba No. 5:		Q _{TOTAL m} (m ³ /s) = 0.057		Q _{TOTAL P} (m ³ /s) = 101.778		
Dimensiones	SECCIÓN 0	SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		
		Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	
z(m) =	4.704	4.666	4.666	4.526	4.526	
y(m) =	0.122	0.115	0.129	0.03808	0.043	
v (m/s) =	1.960	1.920	2.000	2.751	2.829	
α =	1.150	1.150	1.150	1.100	1.100	
α* <i>h_v</i> (m)	0.225	0.216	0.234	0.424	0.449	
E (m) =	5.052	4.997	5.030	4.989	5.018	
Fr =	1.839	1.860	1.817	4.501	4.333	
Dimensiones	SECCIÓN 3		SECCIÓN 4		SECCIÓN 5	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	4.526	4.526	4.614	4.614	0.146	0.146
y(m) =	0.238	0.267	0.137	0.158	0.073	0.080
v (m/s) =	0.440	0.460	0.765	0.779	2.040	2.160
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.116	1.116
α* <i>h_v</i> (m)	0.011	0.012	0.033	0.034	0.237	0.265
E (m) =	4.78	4.81	4.78	4.81	0.42	0.45
Fr =	0.288	0.284	0.660	0.627	5.983	7.016
Dimensiones	SECCIÓN 6		SECCIÓN 7		SECCIÓN 8	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	0.000	0.000	0.000	0.000	0.099	0.099
y(m) =	0.0402	0.046	0.040	0.046	0.111	0.125
v (m/s) =	2.604	2.687	2.604	2.687	0.948	0.987
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
α* <i>h_v</i> (m)	0.380	0.405	0.380	0.405	0.050	0.055
E (m) =	0.42	0.45	0.42	0.45	0.26	0.28
Fr =	4.146	4.013	4.146	4.013	0.911	0.893

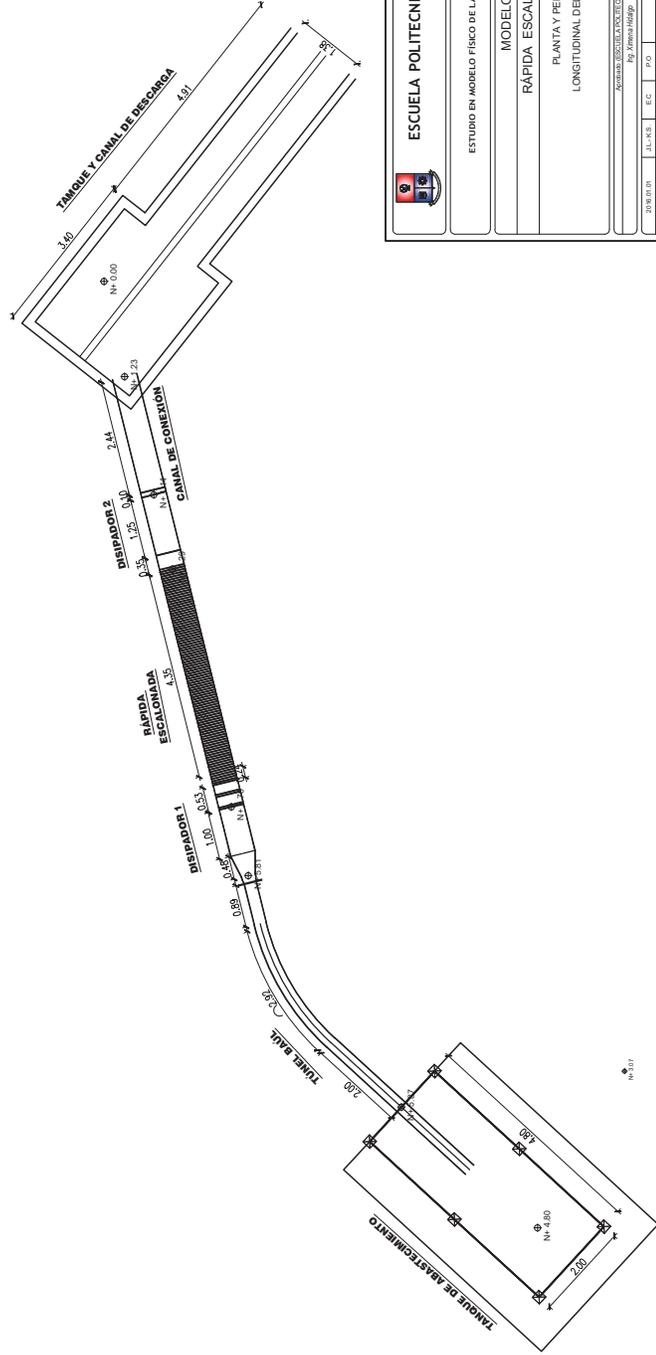
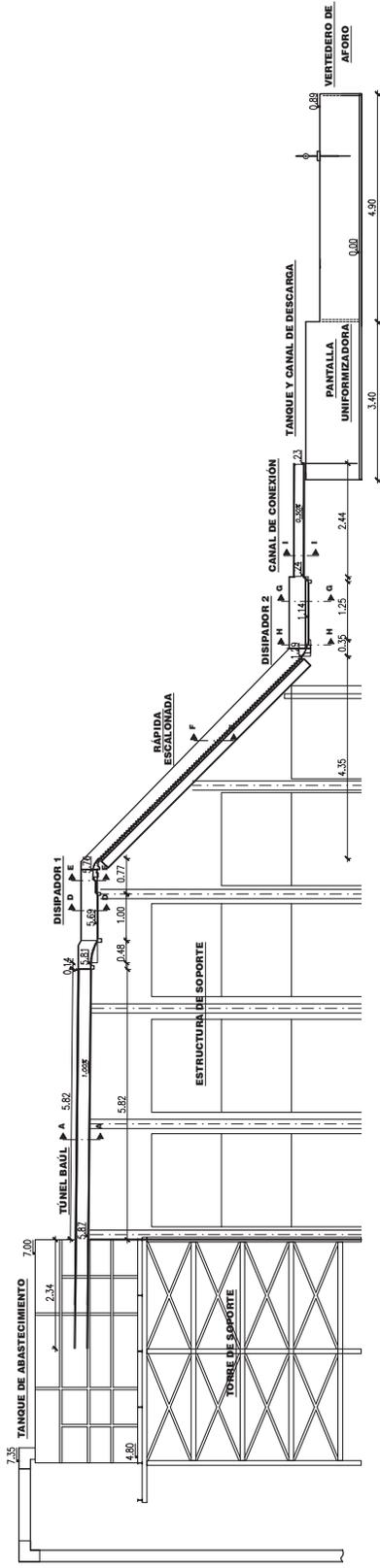
Cálculos de energía por secciones. Prueba P-5 (Q prototipo = 101.778 m³/s)

Prueba No. 5:		Q _{TOTAL m} (m ³ /s) = 0.057		Q _{TOTAL P} (m ³ /s) = 101.778		
Dimensiones	SECCIÓN 0	SECCIÓN 1		SECCIÓN 2		
		Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	
z(m) =	4.704	4.666	4.666	4.526	4.526	
y(m) =	0.122	0.115	0.129	0.03808	0.043	
v (m/s) =	1.960	1.920	2.000	2.751	2.829	
α =	1.150	1.150	1.150	1.100	1.100	
α* <i>h_v</i> (m)	0.225	0.216	0.234	0.424	0.449	
E (m) =	5.052	4.997	5.030	4.989	5.018	
Fr =	1.839	1.860	1.817	4.501	4.333	
Dimensiones	SECCIÓN 3		SECCIÓN 4		SECCIÓN 5	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	4.526	4.526	4.614	4.614	0.146	0.146
y(m) =	0.238	0.267	0.137	0.158	0.073	0.080
v (m/s) =	0.440	0.460	0.765	0.779	2.040	2.160
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.116	1.116
α* <i>h_v</i> (m)	0.011	0.012	0.033	0.034	0.237	0.265
E (m) =	4.78	4.81	4.78	4.81	0.42	0.45
Fr =	0.288	0.284	0.660	0.627	5.983	7.016
Dimensiones	SECCIÓN 6		SECCIÓN 7		SECCIÓN 8	
	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha	Celda Izquierda	Celda Derecha
z(m) =	0.000	0.000	0.000	0.000	0.099	0.099
y(m) =	0.0402	0.046	0.040	0.046	0.111	0.125
v (m/s) =	2.604	2.687	2.604	2.687	0.948	0.987
α =	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
α* <i>h_v</i> (m)	0.380	0.405	0.380	0.405	0.050	0.055
E (m) =	0.42	0.45	0.42	0.45	0.26	0.28
Fr =	4.146	4.013	4.146	4.013	0.911	0.893

ANEXO 5

PLANOS

SISTEMA DE ADUCCIÓN





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA

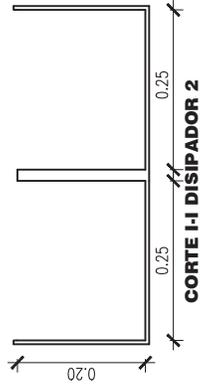
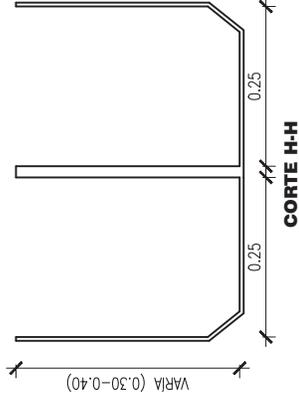
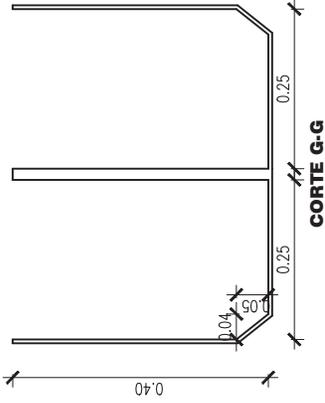
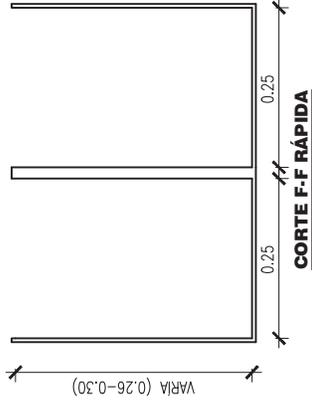
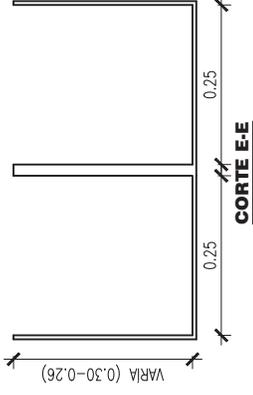
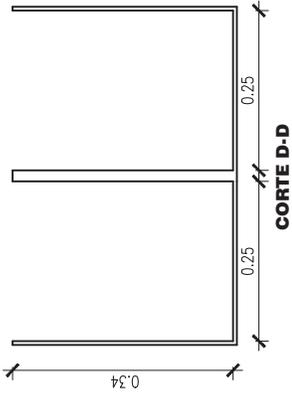
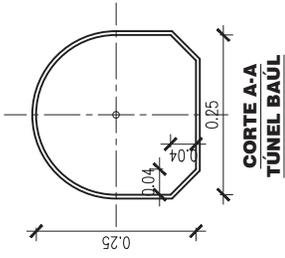
MODELO

RÁPIDA ESCALONADA

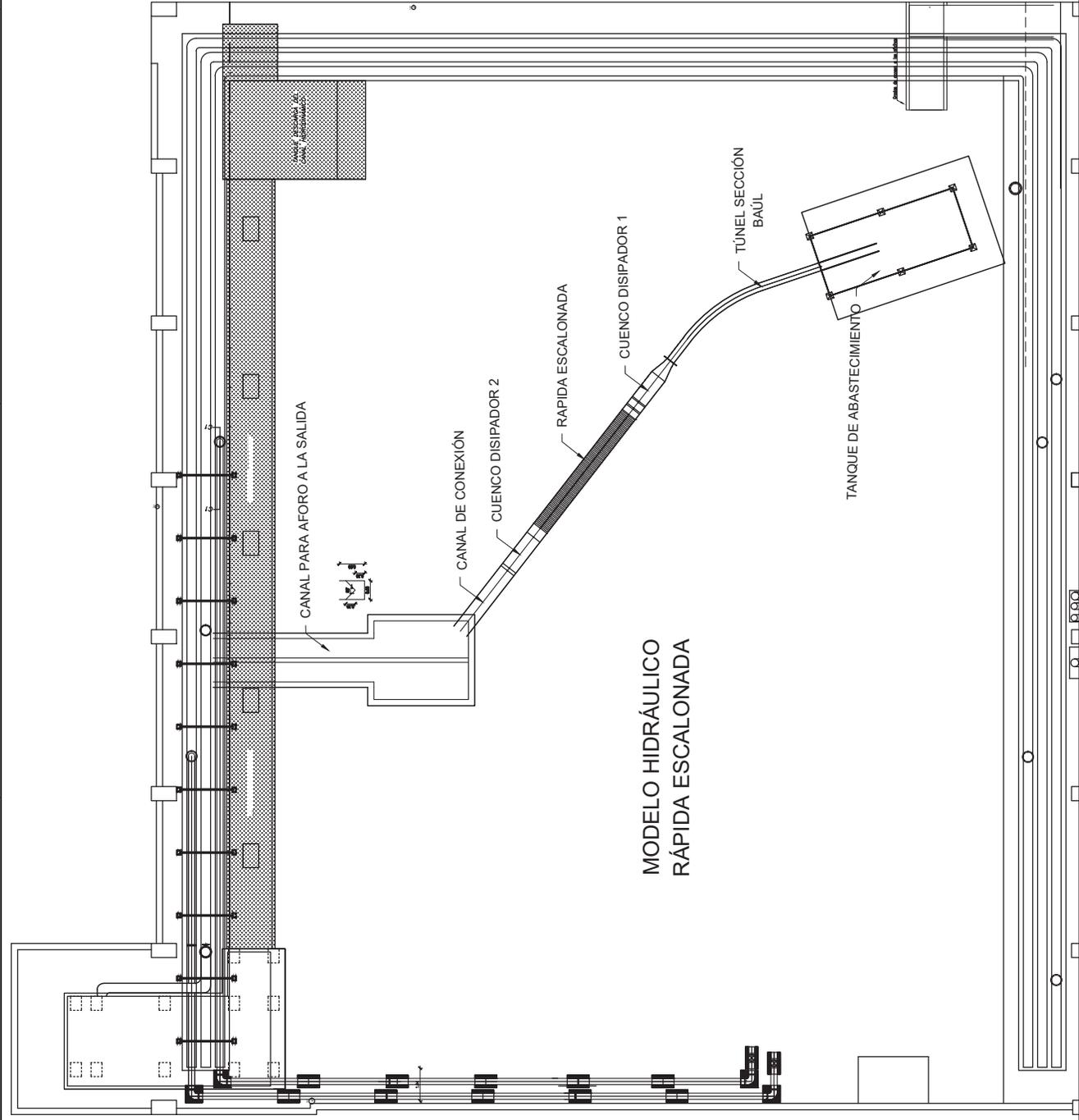
PLANTA Y PERFIL
LONGITUDINAL DEL MODELO

Asesorado: REGULA Y TORRES, INDOCKA
Ing. Zulema Hidalgo

2019/01/03	EC	PRO	Revisión de campo	A
Fecha	Elaboró	Verificó	Descripción de campo	Proy
2019/01/03	EC	PRO	ANÁLISIS 2.00/10m	01000
Fecha	Elaboró	Verificó	Última Edición/versión	Código
Colaborador: EPN GUERINBERG 01	Asesorado:	Escalera	No. Lámina:	A



		ESCUELA POLITECNICA NACIONAL	
ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LA BARRIA ESCALONADA			
MODELO		RÁPIDA ESCALONADA	
CORTES TRANSVERSALES			
AUTORIDAD TECNICA NACIONAL DE INVESTIGACIONES			
Dr. Antonio Rodriguez			
2019.01.01	J.L. C.B.	E.C.	Proyecto de tesis
Fecha	Diseño	Verif.	Descripción del Proyecto
2019.01.01	J.L. C.B.	E.C.	ANÁLISIS DE RIESGOS
Fecha	Diseño	Verif.	Características
			Estado
Código Plano: EPM_GERH/IME/02			No. Lámina: 02 / 03
Autor: Escalónada			E



**MODELO HIDRÁULICO
RÁPIDA ESCALONADA**



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LA RÁPIDA ESCALONADA

**MODELO
RÁPIDA ESCALONADA**

IMPLANTACIÓN DEL MODELO
EN EL LABORATORIO

AUTOR: GUSTAVO AUSTI (INGENIERO CIVIL)

2018/03/03	J.L. S.C.	E.C.	P.O.C.	Revisión de campo
Fecha	Nombre	Apellido	Apellido	Descripción de la revisión
2018/03/03	J.L. S.C.	E.C.	P.O.C.	AN (65) X (20) (mm)
Fecha	Nombre	Apellido	Apellido	Características de la revisión

Escala: Estado: No. Láminas: 03 / 03

Código/Plan: EPA 0281M/01 Archivo: Escalonada