

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

MANUAL BÁSICO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CAMBIO DE NIVEL Y CAMBIO DE DIRECCIÓN CON FLUJO A GRAVEDAD

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERO CIVIL

**PATRICIA LORENA HARO RUIZ
MARÍA FERNANDA JARA VACA**

DIRECTOR: DR. - ING. MARCO CASTRO DELGADO

Quito, Noviembre 2006

DECLARACIÓN

Nosotras, Patricia Lorena Haro Ruiz y María Fernanda Jara Vaca, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada 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 por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Patricia Lorena Haro Ruiz

María Fernanda Jara Vaca

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Patricia Lorena Haro Ruiz y María Fernanda Jara Vaca, bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Marco Castro Delgado.
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser mi compañero incondicional y quien me ha guiado toda la vida.

Al Dr. Marco Castro, Ing. Ximena Hidalgo, Ing. Marcelo Hidalgo e Ing. Rafael Poveda por su ayuda y guía en la realización de este proyecto, además de las lecciones de vida que nos han dado.

A mis papis y hermanos por haberme apoyado siempre, por haber creído en mí y por no dejarme renunciar.

A todas las personas que trabajan en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental: Srta. Cristina y Don Víctor gracias por su apoyo y sus ánimos; Santiaguito, Manuelito, "Wally", muchísimas gracias porque sin ustedes no hubiéramos podido realizar el proyecto.

A mi compañera de Tesis, Fer. Gracias por embarcarte conmigo en esta aventura y gracias por todas las cosas que he aprendido contigo.

A mis amigas y amigos de la facultad por haber compartido conmigo tantos lindos momentos. Gracias Carlita, Dani, Mayrita y Orlandito por acompañarme todo este tiempo. A mis amigas del colegio y del grupo juvenil por estar conmigo siempre.

A los chicos de "La Wira", sus canciones dicen mucho y ustedes también, gracias por preocuparse por mí.

A Padre Freddy Yépez, David y Danilo, sus consejos y su amistad me han acompañado en este camino. Gracias por estar conmigo.

P. H. R.

DEDICATORIA

A mis papis Joel y Beatriz por haber creído siempre en mí a pesar de todo y de todos.

A mis hermanos Esteban y Walter por haber estado conmigo sin importar nada y a pesar de todo seguir confiando en mí.

A mis amigas queridas que siempre han estado conmigo aunque no se encuentren aquí: Jhoas, Adri, Alex, Maggy, Jhahi, Carlita, Dani, Mayri, Fer J, Soffy, Gaby N, Fer V, Nadya, Andreita, Estefi y a todas mis amigas del colegio.

A mis amigos David Y. y David D., y Gus.

A Padre Javier Andrade, me enseñaste a no dejarme vencer.

A mi **Amigo** de toda la vida.

P. H. R.

AGRADECIMIENTO

No existen palabras para agradecer a todas aquellas personas que permitieron cumplir con este gran sueño mil gracias a todas ellas: Dr. Marco Castro Delgado, Ing. Ximena Hidalgo, Ing. Marcelo Hidalgo, Ing. Rafael Poveda.

Al Padre Todopoderoso que permite hacer los sueños realidad por más grandes que estos sean cuando se luchan con fe.

A mis padres porque sin ellos no hubiera sido posible llegar a cumplir un sueño más, a mis hermanos y sobrinas por estar presentes en los tiempos más difíciles.

A mi compañero de sueños e ilusiones Darío por ser parte de mi vida hoy y siempre.

A mis amigas y amigos de la carrera: Diana, Liliana, Milton, Diego, Cristina por compartir muchos momentos juntos, a mis eternas amigas: Isabel, Mayra, Patricia, Normita por estar siempre junto a mí y recibir constantemente su apoyo.

A mi compañera de tesis Patricia Haro porque juntas logramos cumplir la meta, a todas las personas que trabajan en la facultad de Ingeniería Civil especialmente a Ligia Carvajal, y Sonia Almeida.

A las personas que trabajan en el departamento de Ciencias del Agua, que he tenido la oportunidad de conocer: Srta. Cristina, Don Víctor, Santiaguito, Manuel, "Wally" sin su ayuda habría sido imposible efectuar esta investigación.

F. J. V

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado al hombre y la mujer que desde muy niña formaron mi carácter y mi fuerza de voluntad ellos son mis padres: Hugo y María por enseñarme que el amor familiar es la base y el cimiento para alcanzar el éxito.

A mis Hermanos: Noemí y Edison por ser mi ejemplo y mi apoyo cuando tuve que separarme de mis padres para cumplir un sueño.

A mis Sobrinas: Doménica y María Victoria que permitieron con su sonrisa alentar aquellos momentos difíciles.

A mi compañero Darío por permitirme descubrir a su lado la posibilidad de amar.

F. J. V

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES SOBRE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA CAMBIO SIMULTÁNEO DE NIVEL Y DE DIRECCIÓN

1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA FÍSICO	1
1.2	BASES DE DISEÑO EN SISTEMAS DE FLUJO A GRAVEDAD	2
1.3	CONDICIONES HIDRODINÁMICAS REQUERIDAS A LA ENTRADA Y AL PIE DE UNA ESTRUCTURA ESPECIAL DE CAMBIO DE NIVEL Y DE DIRECCIÓN	5
1.4	DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS CLÁSICAS DE SOLUCIÓN.....	7
1.4.1	POZOS DE CAÍDA LIBRE.....	7
1.4.2	CANAL O TÚNEL DE FUERTE PENDIENTE.....	8
1.4.3	ESTRUCTURAS ESPECIALES	9
1.5	OBJETIVOS TÉCNICOS DE UNA ESTRUCTURA ESPECIAL DE CAMBIO DE NIVEL Y DIRECCIÓN DE FLUJO.....	13

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS BÁSICO DEL FENÓMENO DE FLUJO EN ESTRUCTURAS PARA CAMBIOS DE NIVEL Y DIRECCIÓN

2.1	DEFINICIONES DE LA HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS A GRAVEDAD.....	14
2.2	GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS ELEMENTALES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	22
2.3	DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS INVOLUCRADOS EN EL FLUJO EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN, EN LA CAÍDA LIBRE Y SUMERGIDA, FLUJO A TRAVÉS DE UNA REJA E INTRODUCCIÓN DE AIRE EN UNA MASA DE AGUA.....	28
2.3.1	ABRASIÓN.....	28
2.3.2	CAVITACIÓN	29

2.3.3	VIBRACIÓN INDUCIDA	29
2.3.4	CAÍDA LIBRE Y SUMERGIDA	29
2.3.5	INTRODUCCIÓN DE AIRE EN LA MASA DE AGUA	30
2.3.6	FLUJO A TRAVÉS DE UNA REJA	30
2.4	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS FUERZAS MÁS RELEVANTES EN ESTE TIPO DE ESTRUCTURAS	31
2.5	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS DE CAMBIO DE NIVEL Y DIRECCIÓN.	33
2.5.1	CAUDAL UNITARIO	34
2.5.2	DESNIVEL A VENCER.....	34

CAPÍTULO 3

BASES DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS DESCARGADORES A VÓRTICE

3.1	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	35
3.1.1	CANAL DE ENTRADA O DE APROXIMACIÓN.....	35
3.1.2	CÁMARA DE ENTRADA	36
3.1.3	TUBO VERTICAL O POZO	36
3.1.4	CÁMARA DE DISIPACIÓN AL PIE	36
3.1.5	CANAL DE ENTREGA	37
3.2	DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO	37
3.2.1	CANAL DE ENTRADA O DE APROXIMACIÓN.....	37
3.2.2	CÁMARA DE ENTRADA	38
3.2.3	TUBO VERTICAL O POZO	40
3.2.4	CÁMARA DE DISIPACIÓN AL PIE	44
3.2.5	CANAL DE ENTREGA	45
3.3	ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO PARA CAUDAL VARIABLE	46
3.3.1	ANÁLISIS DE FLUJO EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN	46
3.3.2	ANÁLISIS DE FLUJO EN LA CÁMARA DE ENTRADA	47
3.3.3	ANÁLISIS DE FLUJO EN EL TUBO VERTICAL O POZO	48
3.3.4	ANÁLISIS DE FLUJO EN LA CÁMARA DE DISIPACIÓN	48

3.3.5	ANÁLISIS DE FLUJO EN EL CANAL DE ENTREGA.....	48
3.4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49

CAPÍTULO 4

BASES DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS POZOS DE BANDEJAS

4.1	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA.....	52
4.1.1	CANAL DE ENTRADA O DE APROXIMACIÓN.....	52
4.1.2	POZO DE DISIPACIÓN.....	52
4.2	DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO	53
4.2.1	POZO DE BANDEJAS REJA-ORIFICIO.....	53
4.2.2	POZO DE BANDEJAS INCLINADAS (5%) CON REJA	56
4.3	ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO PARA CAUDAL VARIABLE	57
4.3.1	ANÁLISIS DE FLUJO EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN	57
4.3.2	ANÁLISIS DE FLUJO EN LAS BANDEJAS	59
4.3.3	ANÁLISIS DE FLUJO EN LA DESCARGA	61
4.4	SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EN MODELOS FÍSICOS	62
4.4.1	SÍNTESIS DE RESULTADOS PARA LA BANDEJAS REJA ORIFICIO	65
4.4.2	SÍNTESIS DE RESULTADOS PARA EL POZO DE BANDEJAS INCLINADAS (5%) CON REJA.....	69
4.5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
4.5.1	POZO DE BANDEJAS REJA - ORIFICIO.....	71
4.5.2	POZO DE BANDEJAS CON REJA E INCLINACIÓN DEL 5%	72
4.5.3	OTRAS INVESTIGACIONES	73

CAPÍTULO 5

MANUAL BÁSICO PARA EL DISEÑO HIDRAÚLICO DE LAS ESTRUCTURAS

5.1	BASES PARA LA UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS	75
5.2	MANUAL DE DISEÑO HIDRAÚLICO DEL DESCARGADOR A VÓRTICE.....	75

5.2.1	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.....	76
5.2.2	DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO	79
5.2.3	ELABORACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO	89
5.2.4	EJEMPLOS DE CÁLCULO	95
5.3	MANUAL DE DISEÑO HIDRÁULICO DEL DISIPADOR EN BANDEJAS MODIFICADO	97
5.3.1	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.....	97
5.3.2	DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO	100
5.3.3	ELABORACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO	106
5.3.4	EJEMPLO DE CÁLCULO	109
5.4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
5.4.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES HIDRÁULICAS	110
5.4.2	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ESTRUCTURALES.....	114

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES

6.1	ASPECTOS HIDRODINÁMICOS QUE REQUIEREN SER COMPLEMENTADOS.....	117
6.2	SOBRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LA FORMA DE PRESENTACIÓN	119
6.3	SOBRE EL RANGO DE APLICACIÓN DEL MANUAL BÁSICO DE DISEÑO HIDRÁULICO.....	121

INDICE DE TABLAS

Tabla No. 2.1: Valores de las escalas según diferentes criterios de similitud.	32
Tabla No. 5.1: Constante K y descripción de los parámetros geométricos de las bandejas	100
Tabla No. 5.2: Valores mínimos para las dimensiones L_i de la geometría de la bandeja.	101

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico No. 1.1: Volumen de control y secciones en las que se puede aplicar las ecuaciones fundamentales de la hidráulica	3
Gráfico No. 1.2: Componentes de la ecuación de energía en la sección de control.	4
Gráfico No. 1.3: Representación gráfica de la Ecuación del Impulso, Resalto Hidráulico.	4
Gráfico No. 1.4: Condiciones de aproximación y de salida de una estructura de cambio de nivel con disipación de energía.	6
Gráfico No. 1.5: Esquema de un pozo de caída vertical	8
Gráfico No. 1.6: Canal de fuerte pendiente con rugosidad artificial	9
Gráfico No. 1.7: Perfil de disipación, tipo esquí	9
Gráfico No. 1.8: Vista en planta y corte del descargador a vórtice.	10
Gráfico No. 1.9: Esquema general del Descargador a Vórtice	11
Gráfico No. 1.10: Esquema general del Pozo de Bandejas	12
Gráfico No. 2.1: Ejemplo en planta de secciones con diferente caudal unitario.	14
Gráfico No. 2.2: Representación gráfica de la ecuación.	15
Gráfico No. 2.3: Diagrama de Energía Específica ($q = \text{cte}$).	16
Gráfico No. 2.4: Diagrama de Caudal (Unitario) Específico ($H_0 = \text{cte}$).	16
Gráfico No. 2.5: Diagrama de Fuerza específica.	18
Gráfico No. 2.6: Resaltos hidráulicos formados en diferentes tramos.	18
Gráfico No. 2.7: Representación de las pérdidas continuas con la pendiente de la línea de energía.	20
Gráfico No. 2.8: Pérdida de energía local por presencia de una pila.	21
Gráfico No. 2.9: Pérdida de energía local por cambio de sección.	21
Gráfico No. 2.10: Pérdida de energía local por cambio de dirección.	22
Gráfico No. 2.11: Fuerza de resalto hidráulico por gradas.	24
Gráfico No. 2.12: Disipación por contraflujo.	25
Gráfico No. 2.13: Rampas de bloques.	25

Gráfico No. 2.14: Aireador de fondo.	26
Gráfico No. 2.15: Disipación de energía por chorro de difusión (fuente).	27
Gráfico No. 2.16: a) Chorro libre, c) Chorro sumergido paralelo al flujo	27
Gráfico No. 2.16: b) Chorro sumergido inclinado, d) Chorro sumergido en el fondo.	28
Gráfico No. 3.1: Geometría de la cámara de entrada para flujo subcrítico.	38
Gráfico No. 3.2: Geometría de la cámara de entrada para flujo supercrítico.	39
Gráfico No. 3.3: (a) Perfil longitudinal; (b) Sección transversal del flujo supercrítico en la cámara espiral; (c) Identificación en planta de α_M para vórtice supercrítico.	42
Gráfico No. 3.4: Variación del parámetro de ventilación $\alpha = Q_a/Q$ en función de la longitud relativa del tubo vertical	44
Gráfico No. 3.5: Esquema de la cámara al pie del tubo vertical.	45
Gráfico No. 3.6: Estructuras complementarias.	45
Gráfico No. 4.1: Bandeja Reja-Orificio.	54
Gráfico No. 4.2: Dimensiones de la variante bandeja inclinada (5%) con reja.	57
Gráfico No. 4.3: Parámetros de corrección α^* y β^* en función de \bar{c} .	63
Gráfico No. 4.4: Relación entre coeficientes de resistencia λ_d/λ_a en función de \bar{c} .	64
Gráfico No. 4.5: Esquema de ubicación de piezómetros en el modelo pozo de bandejas reja orificio.	65
Gráfico No. 4.6: Curva de tendencia de $Q/Q_{m\acute{a}x}$ en función de la eficiencia de la estructura.	69
Gráfico No. 4.7: Curva de tendencia de $Q/Q_{m\acute{a}x}$ en función de la eficiencia de la estructura.	71
Gráfico No. 5.1: Elementos constitutivos del Descargador a Vórtice.	76
Gráfico No. 5.2: Geometría de la cámara de entrada para flujo subcrítico.	80
Gráfico No. 5.3: Geometría de la cámara de entrada para flujo supercrítico.	81
Gráfico No. 5.4: (a) Perfil longitudinal; (b) Sección transversal del flujo supercrítico en la cámara espiral; (c) Identificación en planta de α_M para el descargador a vórtice supercrítico.	84

Gráfico No. 5.5: Notación de parámetros de cálculo	86
Gráfico No. 5.6: Variación del parámetro de ventilación $\beta = Q_a/Q$ en función de la longitud relativa del tubo vertical	87
Gráfico No. 5.7: Esquema de la cámara al pie del tubo vertical.	88
Gráfico No. 5.8: Estructuras complementarias.	88
Gráfico No. 5.9: Elementos constitutivos de un dissipador en Bandeja – Reja.	97
Gráfico No. 5.10: Esquema en 3D del flujo de caída en la bandeja con rejillas. (Fuente: “Diseño de Presas Pequeñas”, Bureau of Reclamation)	99
Gráfico No. 5.11: Variables de la geometría final recomendada del estudio experimental	101
Gráfico No. 5.12: Variables de la Geometría recomendada en elevación	102
Gráfico No. 5.13: Corte Vertical de la cámara de disipación.	103
Gráfico No. 5.14: Corte A-A de la cámara de disipación.	103
Gráfico No. 5.15: Vista en planta del modelo (los niveles inferiores tienen coloración roja).	104
Gráfico No. 5.16: Ábaco de Diseño para el pozo de bandejas	105
Gráfico No. 5.17: Ubicación del By Pass que permite desviar el caudal sanitario para mantenimiento en las bandejas.	112
Gráfico No. 5.18: Ubicación del tubo de ventilación en la cámara de disipación del descargador a vórtice.	113
Gráfico No. 5.19: Eficiencia de las estructuras en función de la relación $Q/Q_{\text{máx}}$.	113

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía No. 2.1: Flujo vorticoso y turbulento.	23
Fotografía No. 2.2: Descarga de Chorros.	23
Fotografía No. 2.3: Descargador a vórtice.	26
Fotografía No. 2.4: Descarga libre en las bandejas 3 y 4.	29
Fotografía No. 2.5: Descarga sumergida en las bandejas 3 y 4.	30
Fotografía No. 2.6: Flujo a través de una reja.	31
Fotografía No. 3.1: Flujo en el canal de aproximación de régimen subcrítico.	38
Fotografía No. 3.2: Tubo vertical en el DV con aproximación subcrítica.	41
Fotografía No. 3.3: Tubo vertical en un descargador a vórtice con aproximación subcrítica.	43
Fotografía No. 3.4: Cámara de disipación.	44
Fotografía No. 3.5: Canal de entrega.	46
Fotografía No. 3.6: Flujo en el canal de aproximación para $Q = 10.0$ l/s.	47
Fotografía No. 3.7: Formación del núcleo de aire en la cámara de entrada.	49
Fotografía No. 3.8: Desplazamiento hacia la izquierda del núcleo de aire en la cámara de entrada.	50
Fotografía No. 3.9: Formación del colchón de aguas en la cámara de disipación para caudales medios.	51
Fotografía No. 3.10: Formación del colchón de aguas y presencia de la masa agua - aire en la cámara de disipación para caudales altos.	51
Fotografía No. 4.1: Pozo de Bandejas Reja-Orificio.	53
Fotografía No. 4.2: Pozo de Bandejas Inclinada (5%) con Rejas.	56
Fotografía No. 4.3: Transición con paredes de alineación curva.	58
Fotografía No. 4.4: Flujo en el canal de aproximación para el pozo de bandejas reja - orificio.	58
Fotografía No. 4.5: Flujo en el canal de aproximación para el pozo de bandejas con reja e inclinación del 5%.	58

Fotografía No. 4.6: Detalle de flujo en las bandejas para un caudal intermedio. Se presenta flujo con caudal pulsatorio y fluctuaciones severas de los niveles de la mezcla agua – aire.	60
Fotografía No. 4.7: Detalle de flujo en las bandejas para un caudal intermedio. Se observa formación del resalto hidráulico y del colchón de aguas.	60
Fotografía No. 4.8: Flujo en la descarga para el pozo de bandejas reja - orificio.	61
Fotografía No. 4.9: Flujo en la descarga para el pozo de bandejas con reja.	62
Fotografía No. 4.10: Desprendimiento del flujo en los cuerpos de impacto.	74
Fotografía No. 5.1: Flujo régimen subcrítico en el canal de aproximación.	80
Fotografía No. 5.2: Vista superior de la cámara de entrada del DV para flujo subcrítico.	81
Fotografía No. 5.3: Vista superior de la cámara de entrada del DV para flujo supercrítico.	82
Fotografía No. 5.4: Tubo vertical en el DV con aproximación subcrítica.	83
Fotografía No. 5.5: Tubo vertical en un descargador a vórtice con aproximación supercrítica.	85
Fotografía No. 5.6: Cámara de disipación con el caudal de diseño.	87
Fotografía No. 5.7: Canal de entrega.	89
Fotografía No. 5.8: Caída del flujo a través de la reja	98

RESUMEN

Los sistemas de alcantarillado sanitario, pluvial y combinado en las ciudades andinas tienen la necesidad de salvar grandes desniveles que incluyen adicionalmente fuertes cambios de dirección en planta, sin que para su desarrollo se disponga de una longitud suficiente.

Como consecuencia del mal funcionamiento hidráulico del sistema de alcantarillado antiguo, se observa la destrucción parcial o total de la red provocando efectos adversos sobre calles o edificaciones urbanas. La Municipalidad o las Empresas de Alcantarillado se ven en la necesidad de realizar reparaciones frecuentes, costosas, inefectivas y peligrosas en muchos puntos de la red, sin que ello sea la solución definitiva para evitar el deterioro rápido y continuo de las obras.

El Manual Básico de Diseño para el Descargador a Vórtice Subcrítico y Supercrítico así como el del Pozo de Bandejas con rejas inclinadas, desarrollado en el presente proyecto de titulación, contiene la explicación del funcionamiento de los elementos que constituyen cada estructura al igual que su respectivo dimensionamiento geométrico, y sus rangos de aplicación.

ABSTRACT

In rain-wastewater urban drainage systems which are located in Andean cities, Hydraulic Engineers should solve the problem of water conduction to an inferior ground level inside of longitudinal reduced spaces and with alignment changes.

Due to a bad hydraulic operation of old sewage system, Technicians could visualize the partial or total destruction of the networks which cause adverse effects on streets or urban constructions. The Municipality or the Sewage Systems Companies have to invest in frequent, expensive, dangerous and ineffective repairs in some network points. In spite of that, the definitive solution to avoid the fast and continuous deterioration of structures does not happen.

The Basic Handbook of Design for Subcritical and Supercritical Vortex Drops as well as the Trays Energy Dissipator with bars and sloped trays, developed in the present degree project contains the operation, the explanation of all elements that constitute each structure including their respective geometric sizing, and their ranks of application.

PRESENTACIÓN

Una de las falencias, en cuanto a recomendaciones de diseño, que presentan los sistemas de alcantarillado son las estructuras especiales que permiten sobrellevar desniveles y cambios de dirección.

La falta del conocimiento sobre el comportamiento del agua frente a algunas estructuras ha conducido a realizar diseños que incluyen obras especiales que no resultan adecuadas para las condiciones de aproximación o de entrega presentes en los colectores. Algunas de estas obras se constituyen en estructuras inefectivas, peligrosas y costosas debido a las frecuentes reparaciones a las que deben ser sometidas.

En la presente investigación, con el objetivo de ofrecer a los ingenieros diseñadores alternativas de diseño, se desarrolla un manual con criterios técnicos válidos que permitan la selección de estructuras hidráulicas óptimas como son el Descargador a Vórtice y el Pozo de Bandejas, para lograr cambios bruscos de dirección y/o salvar grandes desniveles

Los criterios presentados dentro del presente trabajo, en el Manual Básico de Diseño, han sido obtenidos en base a investigaciones físicas efectuadas sobre los modelos en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional, los cuales facilitan la observación de los fenómenos hidráulicos y estructurales, permitiendo así establecer las relaciones necesarias para el adecuado dimensionamiento y sus rangos de aplicación.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES SOBRE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA CAMBIO SIMULTÁNEO DE NIVEL Y DE DIRECCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA FÍSICO

Las características especiales de topografía que presentan las ciudades andinas plantean ciertos problemas en cuanto al diseño de obras, para los sistemas de alcantarillado, con cambios simultáneos de nivel y de dirección del flujo con superficie libre.

En ciudades como Quito, las zonas residenciales, cada vez alcanzan niveles más críticos de ubicación provocando el dilema de encontrar soluciones técnicas y económicas que permitan la conducción de las aguas, salvando grandes desniveles con desarrollos longitudinales mínimos de la obra.

En estos casos, las recomendaciones de diseño, sugieren ubicar pendientes longitudinales mínimas en la conducción, que den lugar a velocidades por debajo de las admisibles para luego diseñar estructuras especiales de salto que permitan disipar la energía potencial debida al desnivel. En una gran mayoría de casos se trata de alturas mayores a los 2.00 m.

La acción del agua sobre los materiales que constituyen la estructura de disipación puede causar, problemas de estabilidad, que pueden ser evitados mediante el correcto diseño de sus estructuras.

El uso de modelos físicos permite examinar el comportamiento de una determinada geometría de estructura hidráulica y los fenómenos que se presentan durante su funcionamiento, que puede ser la introducción de aire así como la

presencia de ondas y perturbaciones en el flujo las mismas, que pueden ser propagadas hacia aguas abajo.

En resumen, el problema planteado para el diseño de la estructura tiene como objetivo lograr la suficiente disipación de energía, para garantizar que el flujo de salida al pie sea estable, y con una distribución casi uniforme de la velocidad.

1.2 BASES DE DISEÑO EN SISTEMAS DE FLUJO A GRAVEDAD

Para el análisis de sistemas de flujo a gravedad se consideran principalmente cuatro hipótesis básicas de diseño:

- El fluido agua se considera que debe ser homogéneo e incompresible; homogéneo por estar constituido de partículas similares e incompresible porque los cambios en la densidad (ρ) se pueden considerar despreciables.
- El flujo debe ser estacionario y en particular la presión en cualquier punto de la masa fluida no varía en el tiempo. Esta condición excluye cualquier tipo de flujo pulsatorio.
- Únicamente fuerzas de gravedad y de presión tienen influencia sobre el flujo (no se considera los efectos de las fuerzas de viscosidad, la tensión superficial y las fuerzas elásticas) debido a que las pérdidas ocasionadas por estas fuerzas son despreciables.
- Las secciones transversales escogidas como secciones de control deben estar ubicadas en zonas donde la distribución de presión sea semejante a la distribución hidrostática; es decir que son zonas donde las líneas de corriente sean paralelas y por lo tanto no tienen curvatura.

Estas hipótesis definen el marco teórico para el planteamiento de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica básica que son:

- Ecuación de Continuidad (Principio de conservación de la masa): La masa de fluido que ingresa al volumen de control debe ser la misma que sale del volumen de control. Su expresión es:

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

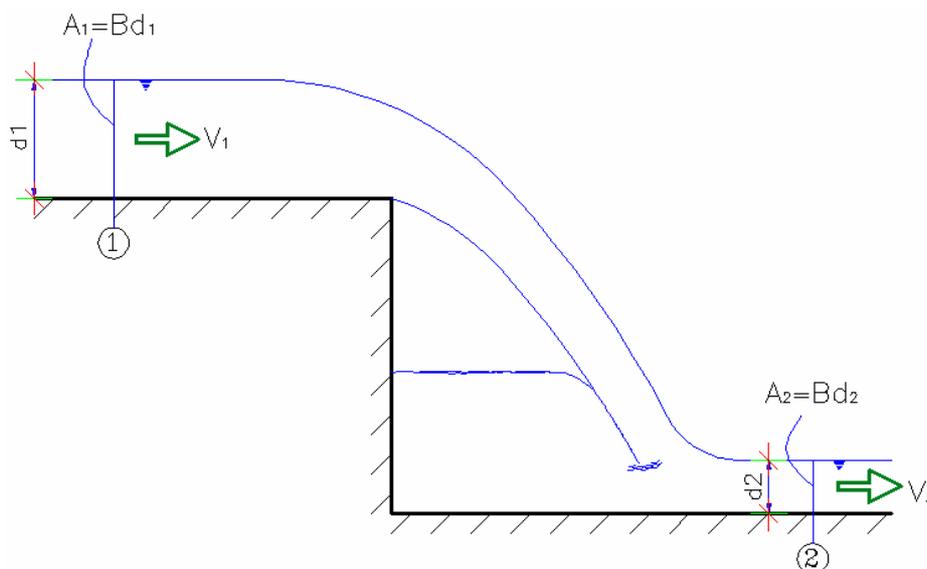


Gráfico No. 1.1: Volumen de control y secciones en las que se puede aplicar las ecuaciones fundamentales de la hidráulica

- Ecuación de Energía (Principio de conservación de energía, Ecuación de Bernoulli): La Energía total (H), el resultado de la suma de energía de posición (z), energía de presión (p/γ) y carga de velocidad ($\alpha v^2/2g$), medida desde un nivel de referencia (horizontal), es constante.

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

En donde α es el coeficiente de corrección de la carga de energía cinética en una sección (Coeficiente de Coriolis), debido a la no uniformidad de la distribución de velocidades. En secciones donde la distribución de velocidades es uniforme se tiene $\alpha = 1.0$.

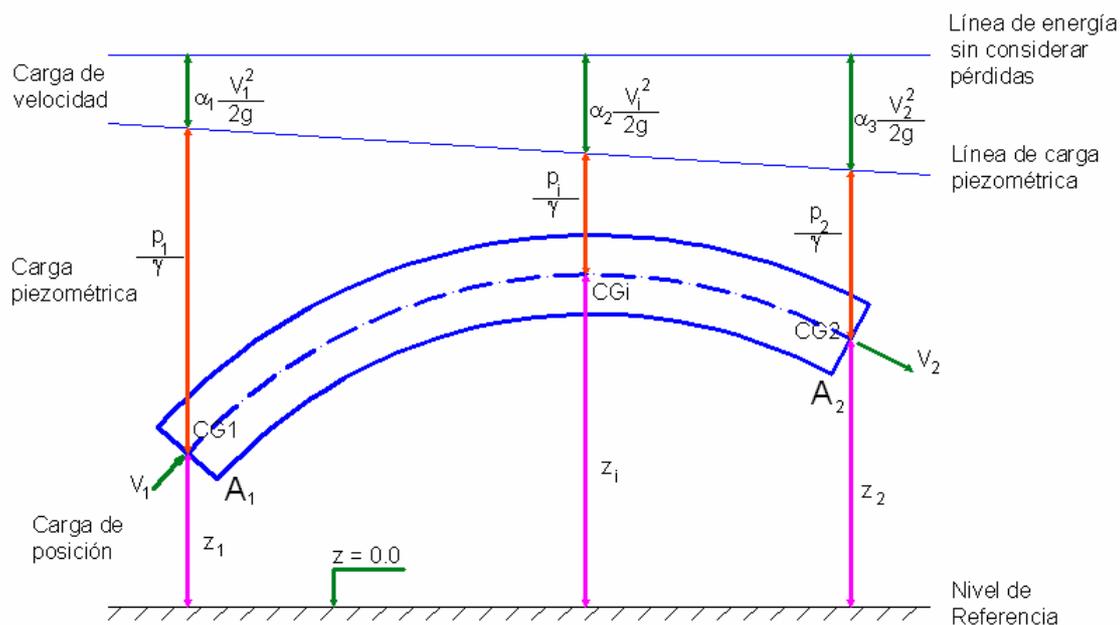


Gráfico No. 1.2: Componentes de la ecuación de energía en la sección de control.

- Ecuación del Impulso (Principio de conservación de la cantidad de movimiento, Ecuación de Boussinesq): La sumatoria de las fuerzas externas en un volumen de control es igual al cambio en la cantidad de movimiento en dicho volumen.

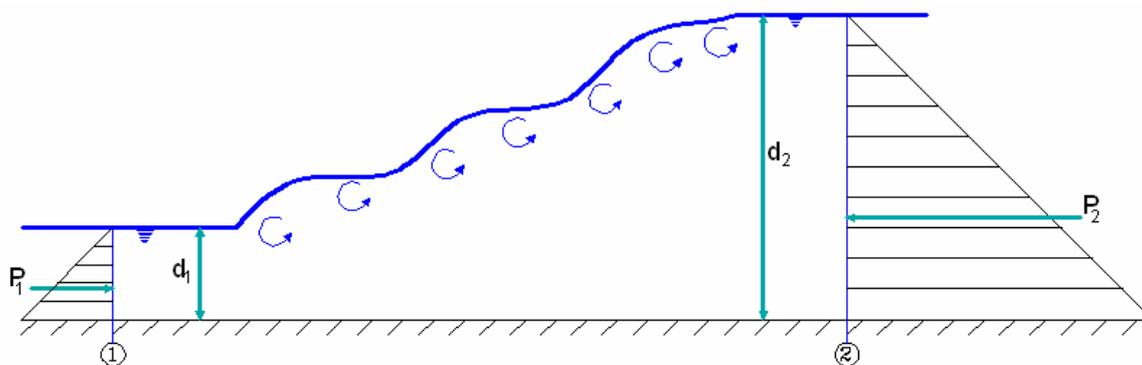


Gráfico No. 1.3: Representación gráfica de la Ecuación del Impulso, Resalto Hidráulico.

La cantidad de movimiento es el producto de la masa de un elemento por su velocidad. La ecuación del impulso como una ecuación de tipo vectorial es:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \rho \cdot Q \cdot (\beta_2 \vec{V}_2 - \beta_1 \vec{V}_1)$$

Donde β es el coeficiente de corrección de la Cantidad de Movimiento por la no uniformidad de la distribución de velocidades, llamado también Coeficiente de Boussinesq. Cuanto más uniforme sea la distribución de velocidades, el valor de β tiende a 1.0.

1.3 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS REQUERIDAS A LA ENTRADA Y AL PIE DE UNA ESTRUCTURA ESPECIAL DE CAMBIO DE NIVEL Y DE DIRECCIÓN

Para iniciar el análisis de las variables que inciden en una estructura especial de cambio de nivel y de dirección, se debe conocer las características del flujo para el que debe ser diseñada. Es importante entonces establecer el mecanismo predominante en el movimiento del agua dentro de la estructura.

En el diseño de una estructura hidráulica se requiere ubicar una sección de control con características de flujo cuasi uniforme en donde se puede aplicar las ecuaciones básicas de la hidráulica. Sin embargo, en sistemas de alcantarillado y específicamente en estructuras de cambio de nivel y de dirección, el flujo de aproximación presenta variaciones entre flujo subcrítico y supercrítico, como resultado de las diversas condiciones geométricas del proyecto en particular.

Un proceso que se presenta frecuentemente y que debe ser considerado en el análisis del flujo de aproximación, es el ingreso de aire acompañado de un flujo no permanente caracterizado por el caudal pulsatorio. Estos fenómenos están relacionados con la velocidad de flujo –generalmente alta-, que en la mayoría de casos supera el valor correspondiente al Froude crítico ($Fr_{cr}=1$).

A la salida de una estructura de cambio de nivel y de dirección es donde se debe observar el rendimiento hidráulico de la estructura. Se debe prever que el flujo del agua no llegue con una velocidad tal que choque sobre el fondo o sobre las paredes laterales.

En algunos casos, la afectación de la estructura, no se limita únicamente al efecto de abrasión sobre el contorno sólido, que se agrava por la presencia de los materiales sólidos (arenas y gravas) que normalmente son arrastrados por el flujo en sistemas de alcantarillado, sino también a potenciales daños por vibración inducida.

Para evitar problemas por el impacto del agua debe garantizarse la presencia de una masa de agua para lograr la distribución y disipación de la energía del chorro de caída a causa de la turbulencia local, de la vorticidad e introducción de aire, y del intercambio de impulso a un volumen mayor.

El flujo que se espera a la salida de una estructura de disipación de energía debe ser permanente, con velocidades bajas, sin fluctuaciones de caudal y cuasi uniforme. Adicionalmente, desde el punto de vista sanitario, la estructura final a la salida debería permitir que los sedimentos no se acumulen, evitando el riesgo de azolve o depósito de material sólido en este tramo de la conducción.

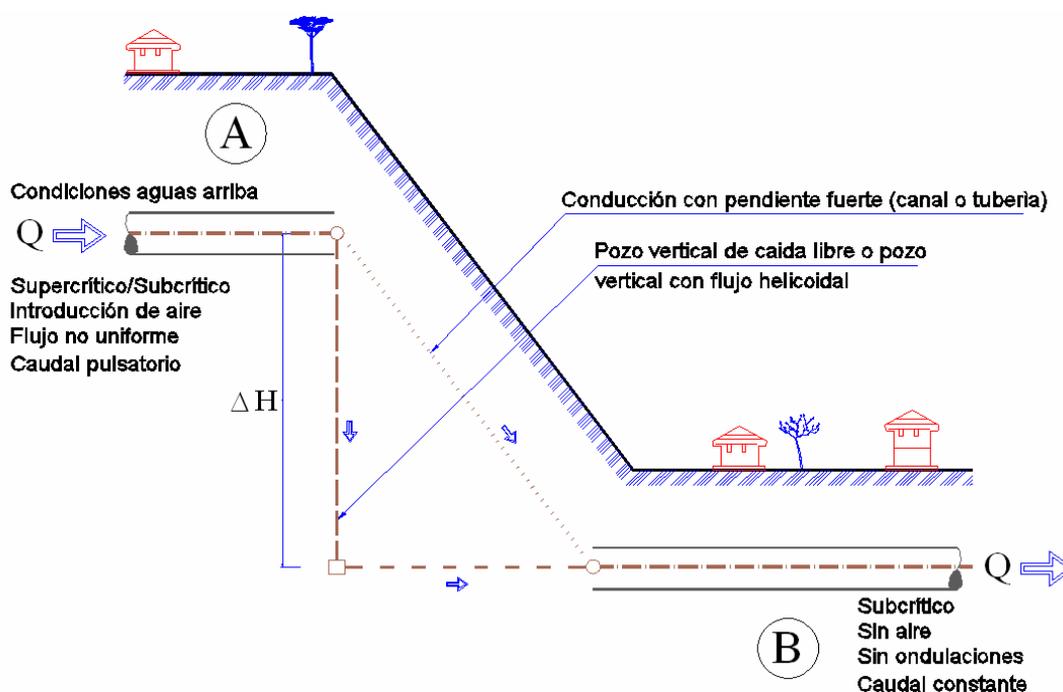


Gráfico No. 1.4: Condiciones de aproximación y de salida de una estructura de cambio de nivel con disipación de energía.

En el Gráfico No. 1.4, se establecen las condiciones de flujo aguas arriba y aguas abajo de una estructura de disipación de energía que permite salvar un desnivel relativamente importante.

1.4 DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS CLÁSICAS DE SOLUCIÓN

Para salvar el desnivel y cambio de dirección, simultáneos, entre dos colectores existen algunas alternativas para disipar energía. Se mencionan tres alternativas que pueden evitar daños en la conducción aguas abajo:

1.4.1 POZOS DE CAÍDA LIBRE

Este tipo de estructura induce un movimiento de caída libre, como su nombre mismo lo indica. Es el caso de una lámina vertiente que ingresa a un pozo vertical y cuya estructuración depende del nivel de aireación sobre la superficie libre inferior del chorro. La estructura está conformada por un pozo vertical que puede ser de sección transversal rectangular o circular, requiriendo además al pie una cámara de disipación, y desaireación. En esta cámara se debe disipar la energía que aparece por el impacto del chorro de caída sobre la base de la estructura.

La estructura posee ventajas hidrodinámicas muy importantes, tales como:

- La posibilidad de descargar caudales que tengan un alto contenido de material sólido.
- Posibilidad de ser construida en áreas reducidas.
- Las facilidades que otorga esta estructura para su construcción.

Se cita por otro lado algunos inconvenientes que presenta la estructura como son:

- Debido a que no es posible garantizar la presencia de un núcleo de aire para la gama de caudales de operación de la estructura, el flujo de caída es con gran frecuencia inestable y sujeta a fluctuaciones.
- Se pueden presentar obstrucciones temporales.

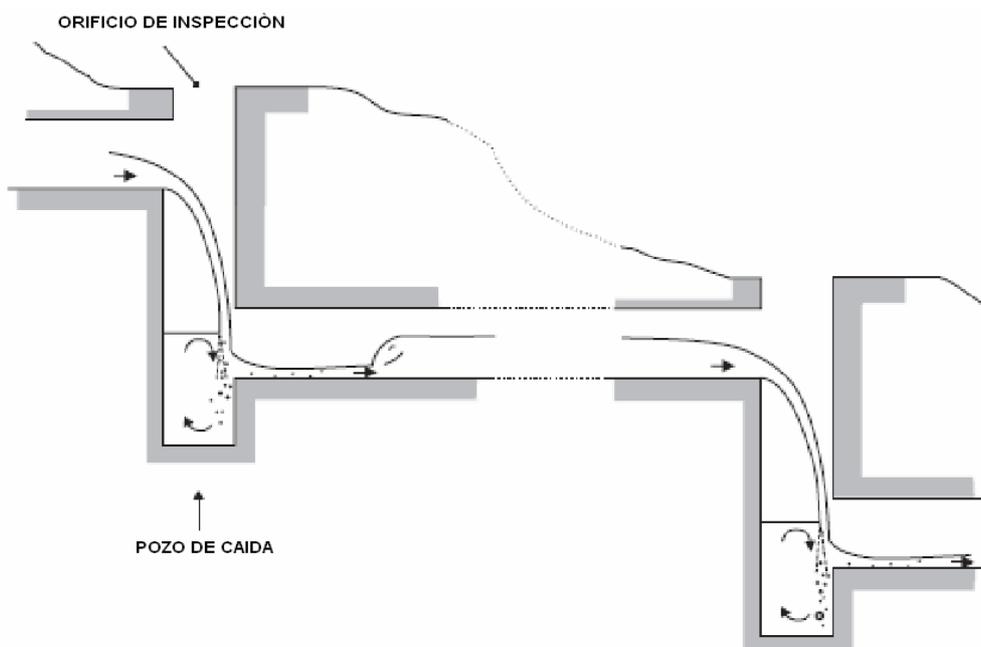


Gráfico No. 1.5: Esquema de un pozo de caída vertical

1.4.2 CANAL O TÚNEL DE FUERTE PENDIENTE

Este canal puede tener rugosidad artificial o simplemente un perfil hidrodinámico. Para aquellos con rugosidad artificial se puede disipar la energía en una distancia relativamente corta. Esta rugosidad es construida de distintas características y formas que generalmente son pequeños disipadores alternados en el canal o en gradas a desnivel, diseñados de acuerdo con su pendiente y en función del calado crítico, correspondiente al caudal de diseño.

Estas estructuras presentan determinadas limitaciones para los sistemas de alcantarillado que van relacionadas con la amplia gama de caudales, para la cual las rugosidades no pueden ser diseñadas, presentándose problemas de obstrucción en los elementos rugosos adicionales, así como deflexiones de flujo

fuera del canal entre otras. El uso de las rugosidades artificiales tiene severas restricciones.

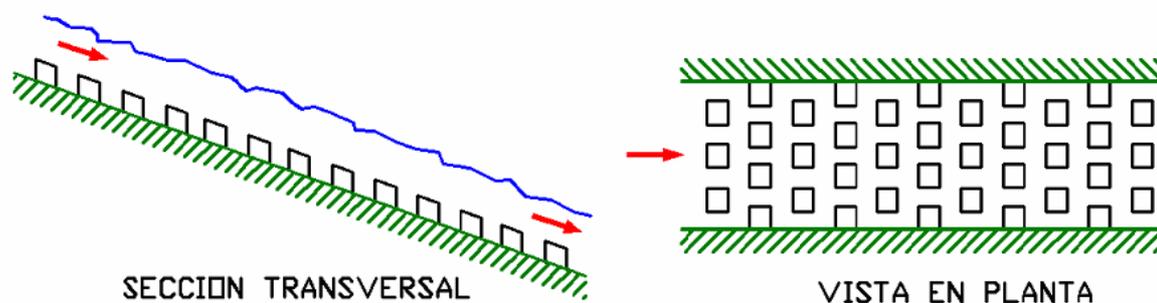


Gráfico No. 1.6: Canal de fuerte pendiente con rugosidad artificial

Las estructuras con perfil hidrodinámico, que pueden terminar en una cubeta de disipación (zampeado para generar el resalto hidráulico), o en salto en esquí, permiten la disipación de la energía del flujo y al pie de la estructura.

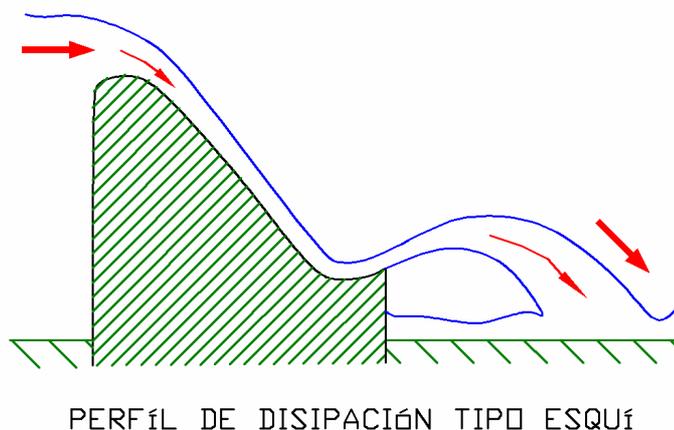


Gráfico No. 1.7: Perfil de disipación, tipo esquí

1.4.3 ESTRUCTURAS ESPECIALES

Dentro de las estructuras especiales que permiten lograr cambios de nivel y/o dirección en sistemas de alcantarillado se aplican comúnmente las siguientes:

- Descargador a vórtice
- Pozo de bandejas

El **Descargador a Vórtice** es una estructura hidráulica que se caracteriza porque induce un movimiento helicoidal en el ingreso a un pozo de caída vertical que se mantiene pegado a lo largo de toda la pared interior del tubo vertical, provocando la disipación de energía, durante el descenso, debida a la fricción y a la curvatura de las líneas de corriente. Esta estructura garantiza la presencia de un núcleo de aire al interior del tubo vertical provocando que la caída helicoidal sea estable y sin fluctuaciones de profundidad o de presión, lo que genera un flujo apropiado en la cámara que se encuentra al pie del tubo.

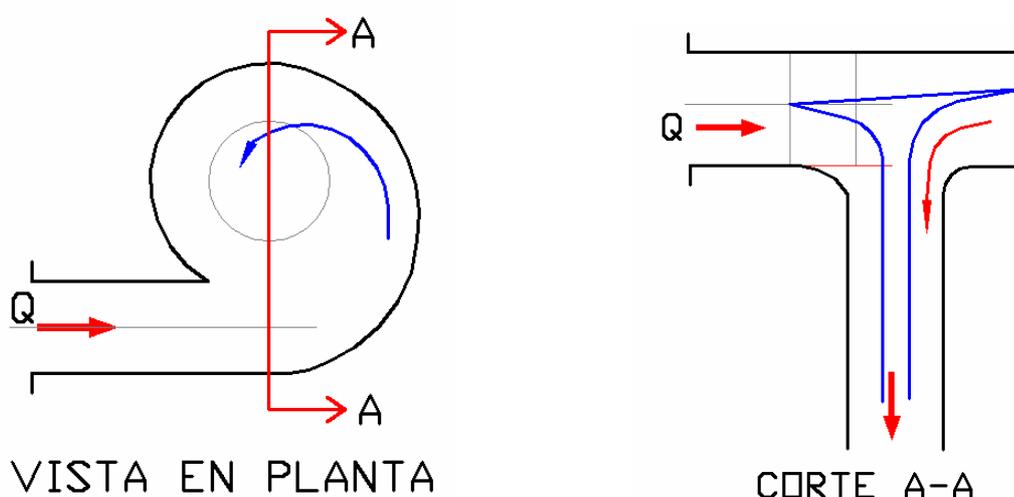


Gráfico No. 1.8: Vista en planta y corte del descargador a vórtice.

Entre las ventajas hidrodinámicas asignadas a esta estructura, se señalan como las más importantes (1):

- Posibilidad de descargar caudales máximos del orden de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ y en desniveles máximos hasta los 100 m.
- Garantía de flujo estable en el movimiento helicoidal.
- Ausencia de ruido en el movimiento de caída
- Aireación adecuada de la lámina en el núcleo
- Disminución y/o eliminación de olores desagradables
- Mínimo de energía remanente al pie
- Garantía de flujo controlado y regulado en la salida del desnivel
- Posibilidad de control eficiente en las crecidas

Como se indica en el Gráfico No 1.9, el descargador a vórtice consta de las siguientes estructuras componentes:

- Canal o colector de entrada o de aproximación,
- Cámara de entrada o cámara espiral,
- Pozo o tubo vertical,
- Cámara de disipación y de desaireación, en el caso de ser necesario, y finalmente, el colector o canal de entrega.

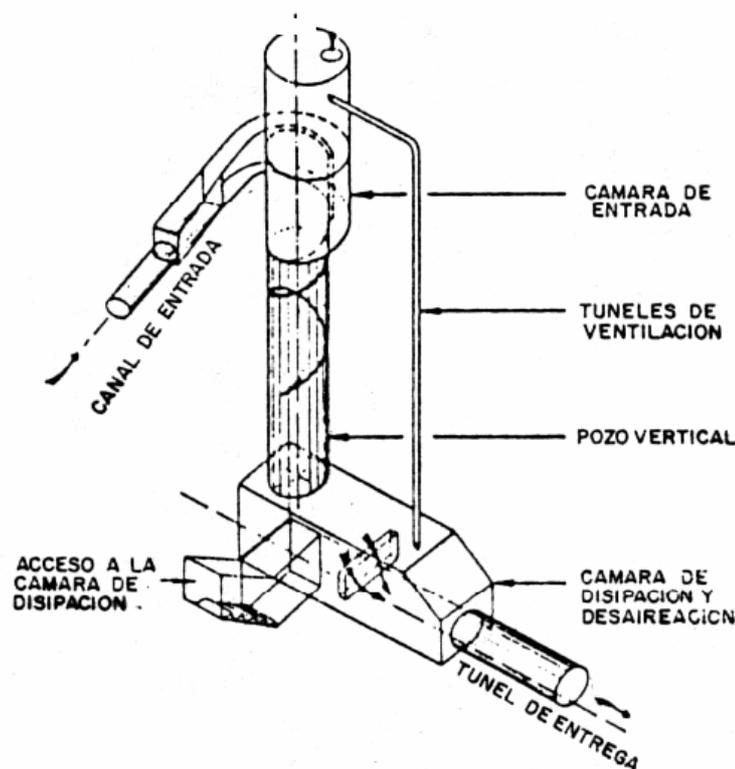


Gráfico No. 1.9: Esquema general del Descargador a Vórtice

El **Pozo de Bandejas** es una estructura recomendada para efectuar cambios de nivel, en colectores con diferencias de alturas mayores a los 2.00 m, que cumple además con la función de disipar energía y permitir el cambio de dirección del flujo a la salida de la obra. Está formada por una sección transversal cuadrada y un desarrollo vertical igual al desnivel que debe salvar; es decir que se trata de una estructura que no necesita espacio para un desarrollo longitudinal puesto que obliga a que el descenso del flujo se realice en forma vertical. Para ello se debe construir, dentro del pozo, una serie alternada de plataformas de sección

rectangular. De acuerdo con la recomendación inicial, frente a la entrada del colector elevado se dispone de una pantalla plana vertical, que corresponde al primer elemento de impacto, cuya función debería ser la reducción de la velocidad del flujo de ingreso y la intercepción del chorro para lograr un cambio brusco de dirección hacia las bandejas horizontales inferiores.

En el Gráfico 1.10 se presenta la conformación geométrica del pozo de bandejas incluyendo el interceptor.

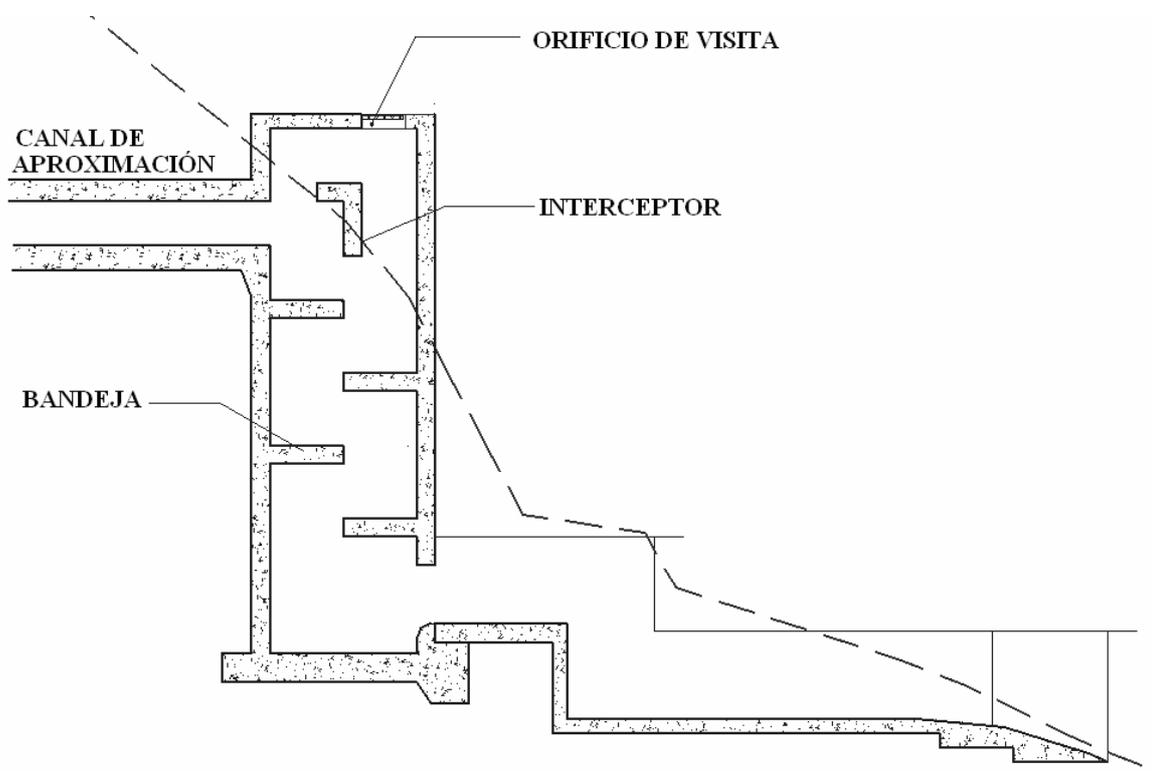


Gráfico No. 1.10: Esquema general del Pozo de Bandejas

En la operación de la estructura se supone que el flujo de agua entre bandejas horizontales forma una cascada caracterizada por un escurrimiento con superficie libre. Entre bandejas se ha definido una altura denominada *zonas de vórtice* con aireación del flujo.

En la parte final del pozo se prevé la formación de un colchón de agua que permita la disipación de la energía residual antes de entregar el flujo al colector de aguas abajo.

1.5 OBJETIVOS TÉCNICOS DE UNA ESTRUCTURA ESPECIAL DE CAMBIO DE NIVEL Y DIRECCIÓN DE FLUJO

Es sumamente importante salvar desniveles de alturas variables, así como lograr cambios de dirección menos abruptos para los colectores mediante estructuras de disipación de energía, cuyos objetivos básicos de diseño y funcionamiento son:

- Disipación de energía:
 - En la caída (debido a la energía de aproximación y a la diferencia de altura).
 - Para cambios de dirección en donde la pérdida de energía se produce mediante fricción y por la doble curvatura de las líneas de corriente.

De esta manera se garantiza la estabilidad de los colectores que presentan gran riesgo de fenómenos como la cavitación, o de flujos abrasivos por su gran velocidad.

- Ofrecer una conducción apropiada del agua: en el flujo de aproximación sin generar embalsamiento , en la salida garantizando un flujo estable y con poca energía residual, controlada sin ondulaciones, con baja sedimentación de materiales o lodo, sin obstrucción al flujo, mínima abrasión, escaso ruido durante su operación, ningún olor o mal aspecto dentro del interior de la estructura.
- Facilidades constructivas.
- Facilidades para las operaciones de mantenimiento y reparación.
- Que sea una estructura económicamente rentable y justificada. En el análisis se deben considerar los costos de operación y de mantenimiento.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS BÁSICO DEL FENÓMENO DE FLUJO EN ESTRUCTURAS PARA CAMBIOS DE NIVEL Y DIRECCIÓN

2.1 DEFINICIONES DE LA HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS A GRAVEDAD

Para aclarar los principios de los flujos a gravedad es necesario indicar ciertos conceptos básicos relacionados con las diferentes fuerzas que intervienen en el comportamiento de este tipo de sistemas.

- **Caudal Unitario** es un parámetro que relaciona el caudal (Q) con el ancho de una sección determinada (B), por lo que no necesariamente es un valor constante:

$$q = \frac{Q}{B}$$

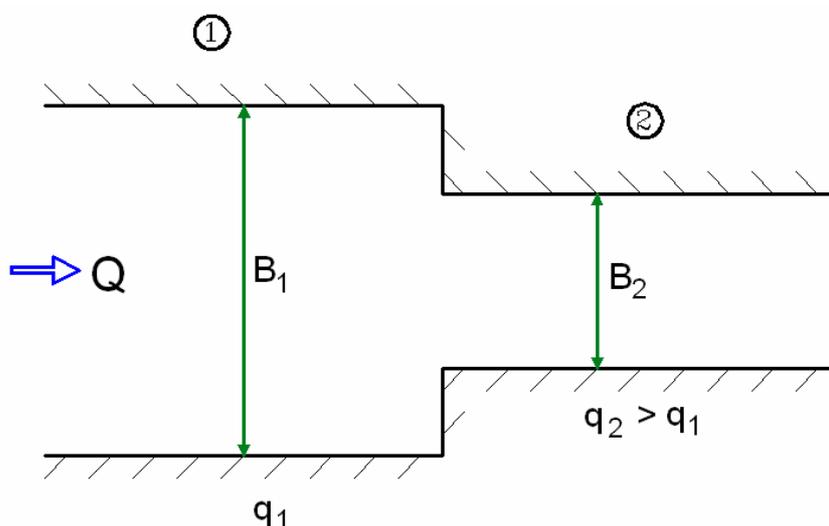


Gráfico No. 2.1: Ejemplo en planta de secciones con diferente caudal unitario.

- **Energía Específica** es la energía que permite el movimiento de un flujo de agua en una sección determinada, la misma que es medida desde el fondo de un canal. Su expresión es:

$$H_o = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

Donde: y es la profundidad de flujo, y

$\frac{q^2}{2gy^2}$ representa la carga de velocidad.

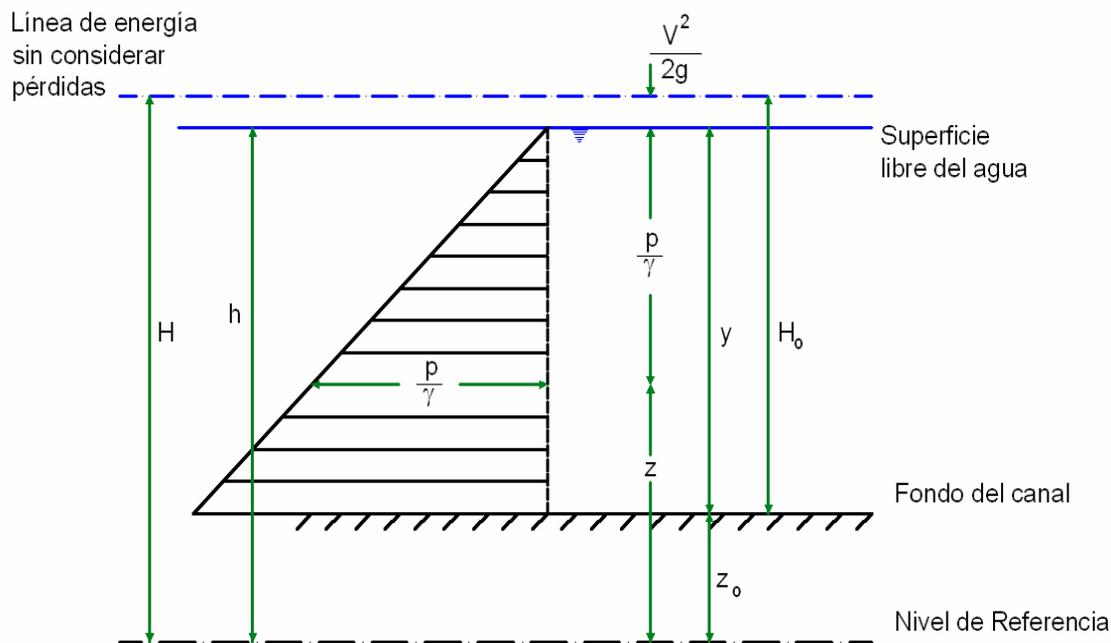


Gráfico No. 2.2: Representación gráfica de la ecuación.

- Para determinar el tipo de flujo que circula por una sección específica se recurre al cálculo del **Número de Froude**, que es la representación de los efectos de las fuerzas inerciales con respecto a las fuerzas de gravedad:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

De acuerdo al valor del número de Froude, se puede clasificar al flujo en:

Flujo lento	→	$Fr < 1.0$	→	flujo subcrítico	$(y > y_c)$
Flujo crítico	→	$Fr = 1.0$	→	flujo crítico	$(y = y_c)$
Flujo rápido	→	$Fr > 1.0$	→	flujo supercrítico	$(y < y_c)$

En la clasificación anterior, y corresponde al calado mientras que y_c es el calado crítico.

$$y_c = \frac{2}{3} H_o = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Calado crítico es la profundidad para la cual el agua puede ser transportada con la cantidad de energía mínima o con el caudal unitario específico máximo como se indica en los gráficos 2.3 y 2.4.

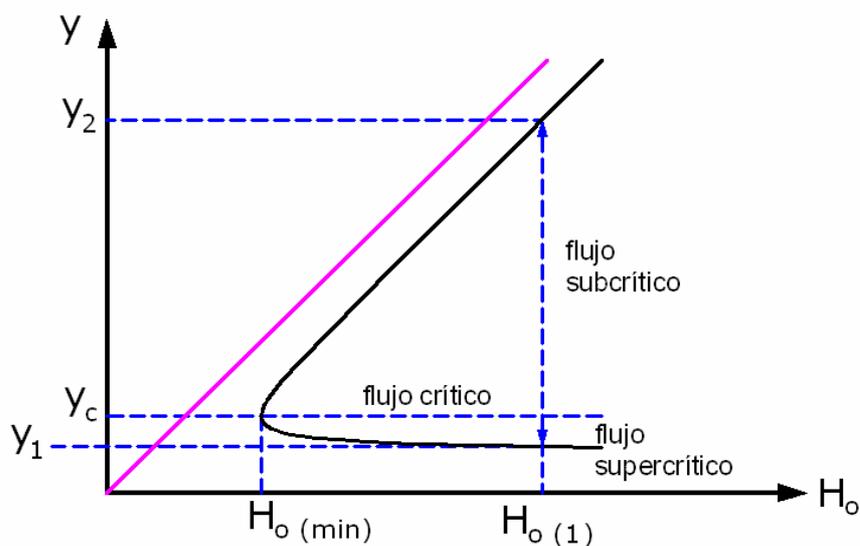


Gráfico No. 2.3: Diagrama de Energía Específica ($q = \text{cte}$).

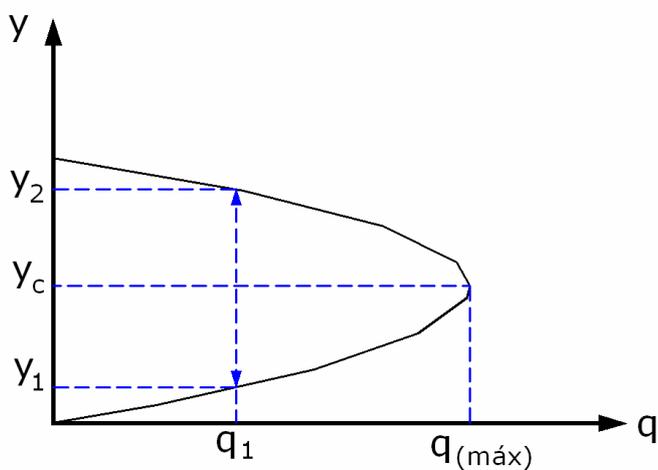


Gráfico No. 2.4: Diagrama de Caudal (Unitario) Específico ($H_o = \text{cte}$).

De los gráficos anteriores se concluye que:

- a) El calado crítico es el mismo ya sea que el caudal unitario sea máximo o la energía específica sea mínima.
 - b) Un caudal puede ser transportado con dos profundidades, una con régimen rápido (supercrítico) y la otra con régimen lento (subcrítico), cuando la energía específica es mayor que la energía mínima o el caudal unitario es menor que el caudal unitario máximo.
 - c) Si disminuye la cantidad de energía: en flujo rápido, la profundidad aumenta; en flujo lento, la profundidad disminuye.
 - d) Si aumenta el caudal específico: en flujo rápido, la profundidad aumenta; en flujo lento, la profundidad disminuye.
- **Resalto Hidráulico** es un fenómeno a gravedad de disipación de energía, definido como el paso violento de un flujo rápido (supercrítico) a un flujo lento (subcrítico).

Se utiliza para disipar energía, siendo aprovechado además en sitios donde se puede tener mezcla de aire con agua. Ocurre con gran intercambio de movimiento.

Como se observa en el Gráfico No. 2.5, el resalto hidráulico se presenta cuando la fuerza específica (Momenta) aguas arriba es igual a la fuerza específica aguas abajo, por lo tanto:

$$M_1 = M_2$$

Siendo $M = P + \rho QV$, donde P es la fuerza de presión y ρQV es la fuerza del impulso o cantidad de movimiento.

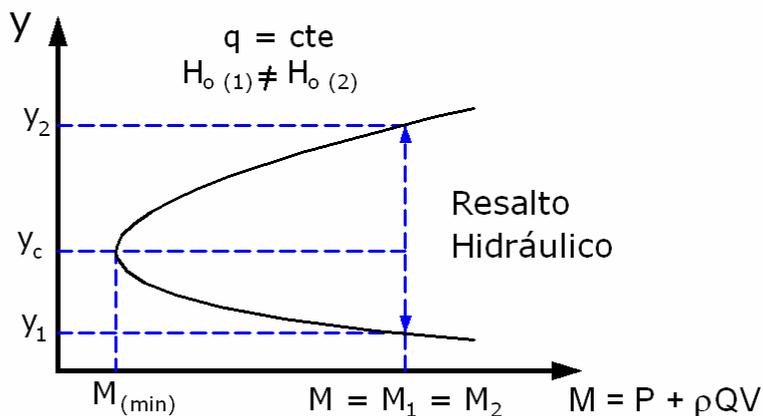


Gráfico No. 2.5: Diagrama de Fuerza específica.

Esta condición es la que permite encontrar las profundidades conjugadas del resalto hidráulico que se obtienen a partir de las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. La expresión resultante es:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)$$

Donde y_1 y y_2 son las profundidades aguas abajo y aguas arriba de la sección del resalto hidráulico respectivamente.

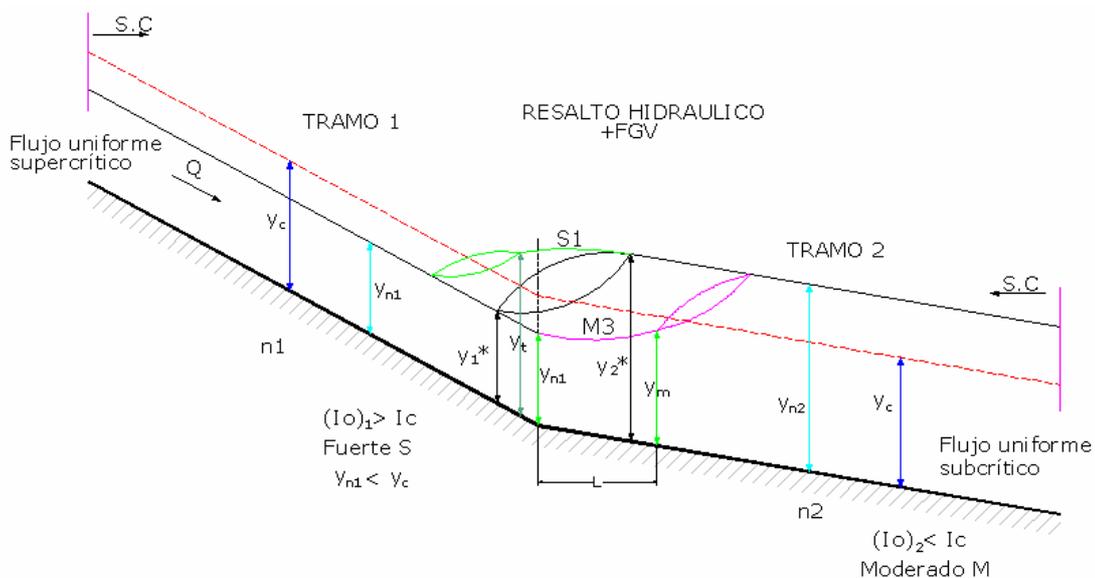


Gráfico No. 2.6: Resaltos hidráulicos formados en diferentes tramos.

En el Gráfico No. 2.6 se diferencian tres tipos de resalto hidráulico con flujo gradualmente variado (FGV):

$M_1 = M_2 \rightarrow y_{n1}$ es conjugado de $y_{n2} \rightarrow$ Resalto estable

$M_1 > M_2 \rightarrow y_{n1} + \text{FGV}$
 y_m es conjugado de $y_{n2} \rightarrow$ Resalto rechazado

$M_1 < M_2 \rightarrow y_{n2} + \text{FGV}$
 y_t es conjugado de $y_{n1} \rightarrow$ Resalto sumergido

- Para revisar el problema de las pérdidas de energía, es necesario introducir el concepto del **Número de Reynolds** que relaciona los efectos de las fuerzas viscosas con respecto a las fuerzas inerciales. Este número permite distinguir los flujos laminares de los turbulentos o de los que se encuentran en la zona de transición.

La teoría señala los siguientes valores para clasificar al flujo de acuerdo al Número de Reynolds:

Flujo laminar $\rightarrow Re < 2 \cdot 10^4$

Flujo en transición

Flujo turbulento $\rightarrow Re > 10 \cdot 10^4$

- En cualquier fenómeno de flujo, debido al efecto viscoso, se presentan **pérdidas de energía** por la transformación de energía cinética en calor. Se consideran dos tipos de pérdidas:

Pérdidas continuas: son aquellas producidas por fricción interna. Se presentan por efecto de los esfuerzos viscosos de corte que se originan en contornos lisos o rugosos.

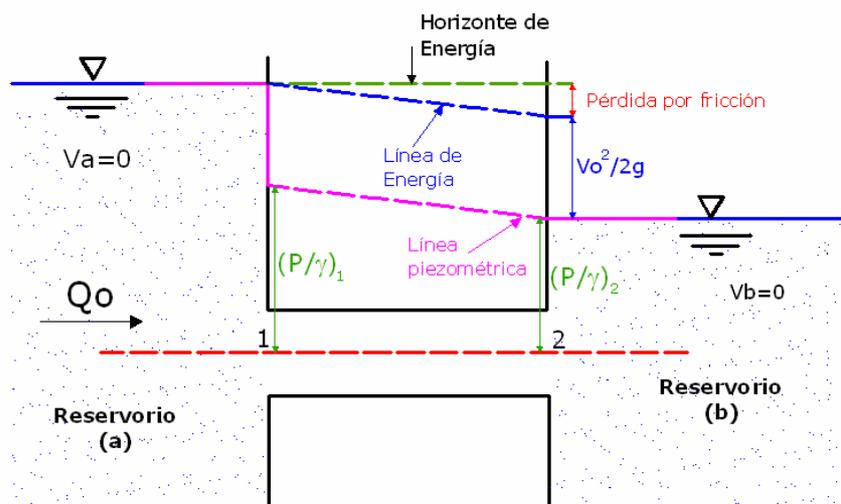


Gráfico No. 2.7: Representación de las pérdidas continuas con la pendiente de la línea de energía.

Como se observa en el Gráfico No. 2.7, la línea de energía presenta una pendiente diferente de cero debido a la consideración de las pérdidas por fricción.

Pérdidas locales: este tipo de pérdidas se originan principalmente por efecto de los esfuerzos internos de corte que se producen en zonas donde existe separación de flujo (entre la masa de agua y el contorno sólido) y las dimensiones son restringidas. Estas pérdidas se encuentran presentes:

- a) Cuando existen estructuras en canales; por ejemplo pilas de puentes, donde Δh es la pérdida de energía calculada como sigue:

$$\Delta h = \xi \frac{V_1^2}{2g}$$

ξ es el coeficiente de pérdidas cuya expresión es:

$$\xi = C_w \cdot \frac{D}{B}$$

Siendo C_w el coeficiente de resistencia.

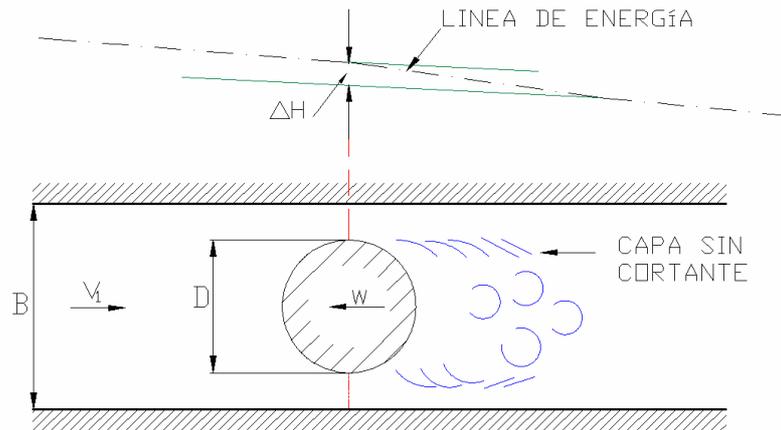


Gráfico No. 2.8: Pérdida de energía local por presencia de una pila.

- b) Pérdidas de energía en cambios de sección transversal donde Δh se calcula como:

$$\Delta h = \xi \frac{V_1^2}{2g} = k \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

Siendo k el coeficiente de pérdidas para cambios de una sección transversal. Este coeficiente varía de acuerdo al tipo de cambio de sección (ampliaciones o reducciones) y de estructura (tuberías, canales).

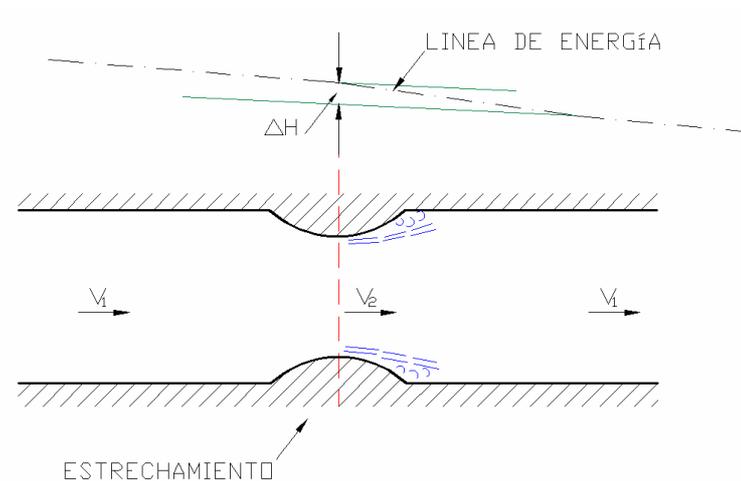


Gráfico No. 2.9: Pérdida de energía local por cambio de sección.

- c) Pérdidas de energía por cambio de dirección: cualquier cambio de dirección genera un cambio local en la distribución de velocidades de flujo. Se caracterizan por la sobre elevación de la superficie libre del agua en el

margen exterior y el descenso de la misma en la orilla interior; se disminuye la velocidad en la parte exterior y se incrementa en la parte interior especialmente en canales de tipo rectangular, cuando se desprecia el efecto de la viscosidad.

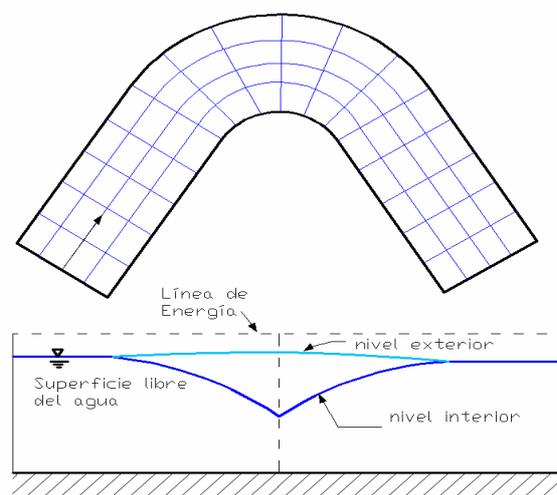


Gráfico No. 2.10: Pérdida de energía local por cambio de dirección.

Las pérdidas se calculan utilizando la expresión:

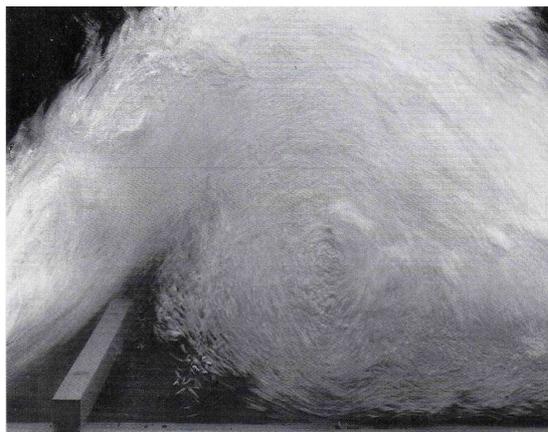
$$\Delta h = \xi_k \frac{V_1^2}{2g}$$

Siendo ξ_k el coeficiente de pérdidas por curva para canales rectangulares lisos.

2.2 GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS ELEMENTALES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

La disipación de energía es el fenómeno básico presente en las estructuras de disipación. Sus procesos elementales pueden ser:

- El efecto de una partícula dentro de la corriente de agua (difusión). La disipación de energía se encuentra relacionada con el efecto de turbulencia.



Fotografía No. 2.1: Flujo vorticoso y turbulento.

Se observa que durante la generación de turbulencia en la zona de torbellino existe la presencia de grandes velocidades, fluctuaciones, y presiones. Estos factores determinan tanto el grado de disipación como el dimensionamiento geométrico de las estructuras predeterminadas.

- Creando interfases turbulentas en caídas de agua con una corriente aireada:
 - Descarga de chorros libres y
 - Desintegración de chorros libres.



Fotografía No. 2.2: Descarga de Chorros.

Existen algunos métodos utilizados para la disipación de energía. Se dividen por grupos de acuerdo a sus características:

Grupo 1: Aprovechan la presencia de fuertes gradientes de velocidad y zonas de alta turbulencia:

- Disipación de energía por expansión y/o deflexión:

Los disipadores que se basan en las expansiones bruscas tienen como fundamento que la velocidad en la descarga sea mucho más pequeña que la velocidad a la entrada de la estructura.

El fenómeno que se relaciona con este tipo de fundamento es el resalto hidráulico que ha su vez permite la transición de un flujo supercrítico a uno subcrítico.

El resalto puede ser apoyado gracias a ciertas estructuras complementarias tales como un umbral de fondo, una viga transversal o escalón en un tanque estabilizador.

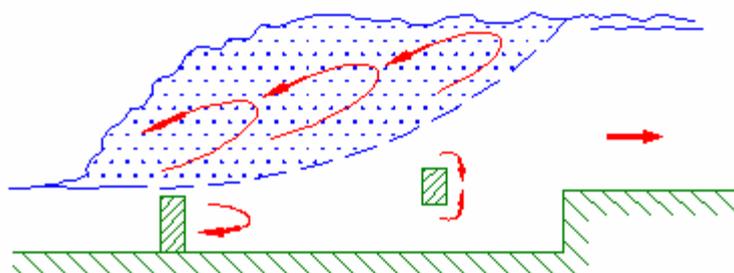


Gráfico No. 2.11: Fuerza de resalto hidráulico por gradas.

- Disipación de energía por contraflujo:

El principio de contraflujo se refiere a la energía de un chorro que puede ser disipada por hendiduras dentro de dos o más chorros, con el choque de uno contra otro.

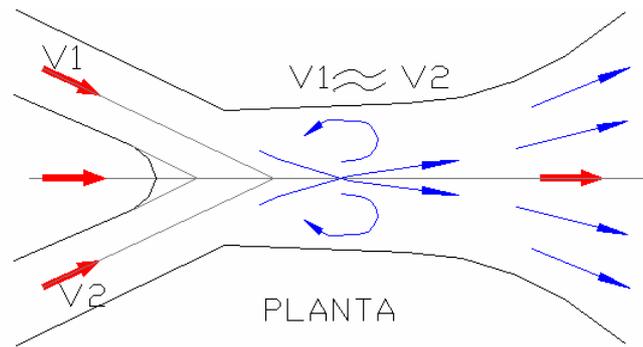


Gráfico No. 2.12: Disipación por contraflujo.

- Disipación de energía con canales rugosos y cascadas:

Los canales con rugosidad artificial pueden disipar grandes porcentajes de energía en distancias comparativamente cortas, estas pueden ser construidas de varias formas: deflectores alternados de hormigón, rampas de bloques o material pétreo grueso.

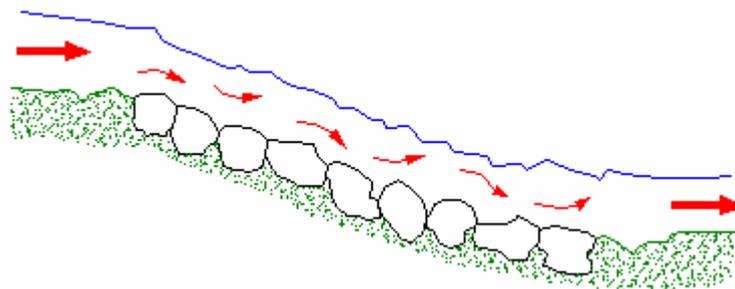


Gráfico No. 2.13: Rampas de bloques.

- Disipación de energía con dispositivos a vórtice:

Estos dispositivos están conformados de un tanque cilíndrico con entrada tangencial y una salida axial. Debido a la presencia garantizada de un núcleo de aire, el flujo helicoidal de caída es estable y libre de fluctuaciones de la profundidad o de la presión, generando un flujo adecuado en la cámara al pie del tubo.



Fotografía No. 2.3: Descargador a vórtice.

- Disipación de energía por entrada de aire:

Este método de disipación generado por mezcla aire agua, no es muy efectivo debido a que el aire es menos denso que el agua. La pérdida de energía es despreciable incluso con altas concentraciones de aire. Sin embargo, los aireadores de fondo son usados actualmente para homogenizar el flujo previniendo presiones negativas y erosión en rápidas.

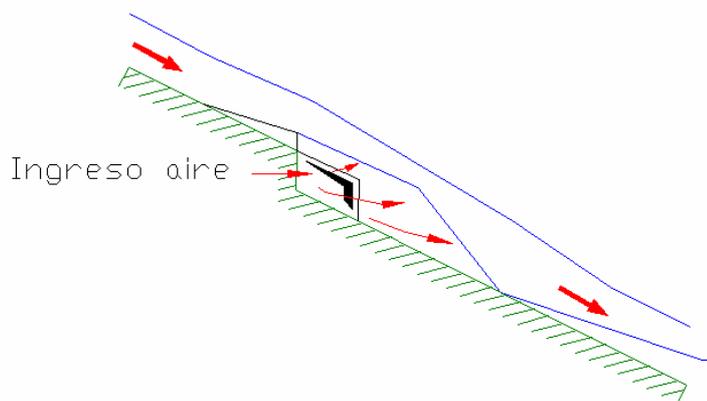


Gráfico No. 2.14: Aireador de fondo.

- Disipación de energía por chorro de difusión:

Como se menciona anteriormente la introducción de aire no origina una significativa disipación de energía, pero esta eficiencia depende del grado o

intensidad en el contacto a la entrada, ya que si el aire alcanza un grado donde la corriente es transformada como rociador (spray), su eficiencia puede ser grande.

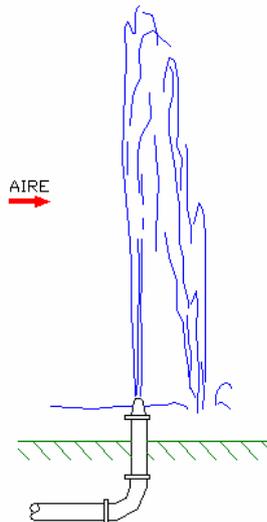


Gráfico No. 2.15: Disipación de energía por chorro de difusión (fuente).

Grupo 2: Disipan la energía en forma de chorros y pueden tener agua o aire como medio receptor o medio fluido a la salida.

- Chorro libre
- Chorro sumergido
- Chorro de pared
- Chorro en la superficie libre del agua
- Chorro radial
- Chorro en contraflujo
- Chorro dividido
- Chorro giratorio o rotatorio

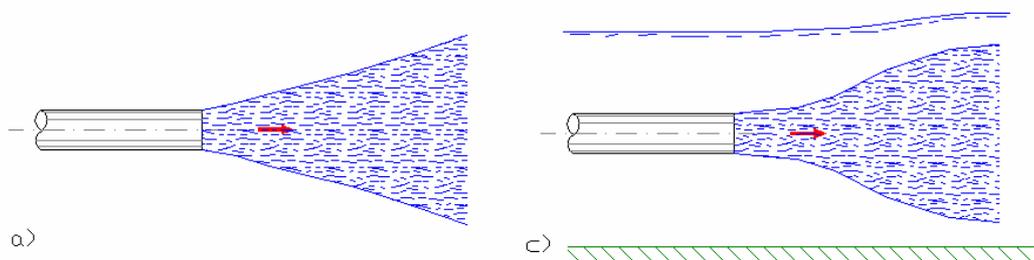


Gráfico No. 2.16: a) Chorro libre, c) Chorro sumergido paralelo al flujo

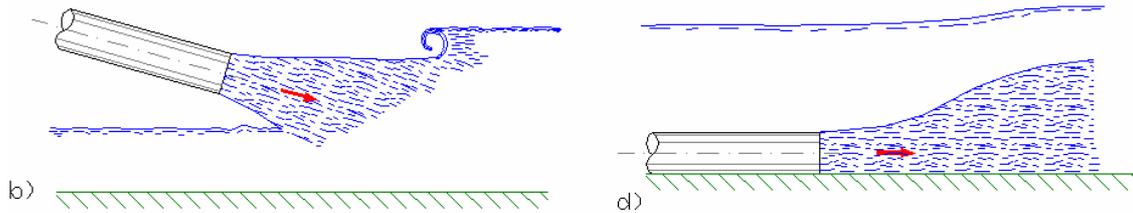


Gráfico No. 2.16: b) Chorro sumergido inclinado, d) Chorro sumergido en el fondo.

2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS INVOLUCRADOS EN EL FLUJO EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN, EN LA CAÍDA LIBRE Y SUMERGIDA, FLUJO A TRAVÉS DE UNA REJA E INTRODUCCIÓN DE AIRE EN UNA MASA DE AGUA

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, en el canal de aproximación a la estructura de disipación de energía se requiere un flujo estable y uniforme, sin introducción de aire para garantizar la presencia de caudal constante. Sin embargo, en todo proceso de disipación de energía se producen perturbaciones en el flujo que pueden resultar en algunos fenómenos físicos que afectan a la estructura. Entre estas perturbaciones se consideran las siguientes:

- Abrasión
- Cavitación
- Vibración Inducida
- Caída libre y sumergida
- Introducción de aire en la masa de agua
- Flujo a través de una reja

2.3.1 ABRASIÓN

El arrastre de materiales y las altas velocidades del flujo producen rozamiento en las paredes y en el fondo de las estructuras (canal de aproximación, pozo de caída). Como resultado final se genera cambios desde su geometría inicial.

2.3.2 CAVITACIÓN

Es uno de los problemas más serios que puede manifestarse en una estructura por la presencia de posibles subpresiones locales, del orden de la presión de vapor y debidas a la separación del flujo de la geometría física.

Como se conoce, no existe ningún material capaz de soportar cavitación. Con un diseño adecuado de la geometría de las estructuras se puede garantizar un buen funcionamiento.

2.3.3 VIBRACIÓN INDUCIDA

Es el resultado de los cambios de velocidad de flujo producidos por la configuración de la estructura y se traduce en un intercambio de energía entre la masa de agua y el medio sólido.

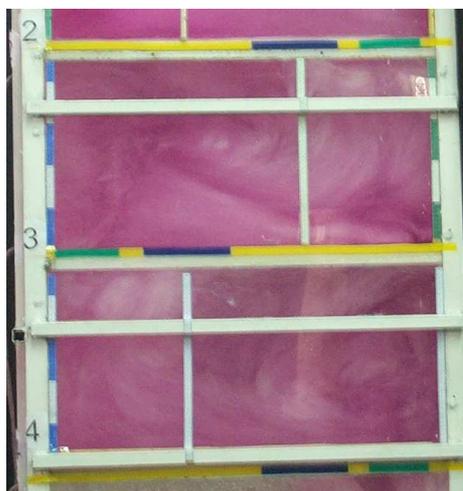
2.3.4 CAÍDA LIBRE Y SUMERGIDA

La caída libre es el fenómeno en el que el chorro de agua descarga sobre el colchón de aguas que debe formarse en cada nivel (cuando se habla del pozo de bandejas, Fotografía No. 2.4) o en la cámara de disipación (en el caso del descargador a vórtice).



Fotografía No. 2.4: Descarga libre en las bandejas 3 y 4.

La caída sumergida se refiere a la descarga del flujo dentro de una masa de agua como se indica en la Fotografía No. 2.5. Cuando no existe una aireación adecuada y una masa de agua suficiente, la energía no disipada es absorbida por las paredes de la estructura produciéndose desgaste, socavación y vibración.



Fotografía No. 2.5: Descarga sumergida en las bandejas 3 y 4.

2.3.5 INTRODUCCIÓN DE AIRE EN LA MASA DE AGUA

En este punto se debe diferenciar el fenómeno de introducción de aire en el canal de aproximación y en la estructura de disipación como tal.

En el **canal de aproximación**, la introducción de aire en la masa de agua, determinaría la presencia de caudales pulsatorios, que es una condición no deseable al ingreso de la estructura de disipación.

En la **estructura de disipación**, el ingreso de aire, debido al proceso de pérdida de energía, produce aceleración en el flujo por lo que se incrementan las fuerzas de impacto.

2.3.6 FLUJO A TRAVÉS DE UNA REJA

La lámina vertiente se separa en varios segmentos largos y delgados. El agua cae al cuenco amortiguador que se forma en la parte inmediata inferior, donde la

disipación de energía se realiza por difusión, como se señala en la Fotografía No. 2.6.



Fotografía No. 2.6: Flujo a través de una reja.

2.4 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS FUERZAS MÁS RELEVANTES EN ESTE TIPO DE ESTRUCTURAS

En el caso de estructuras hidráulicas de control, la simulación del flujo de agua en un modelo físico a escala reducida exige que se cumplan los tres tipos de similitud: geométrica, dinámica y cinemática. Con todo, al realizar modelos reducidos de estructuras de geometría compleja, no es posible cumplir paralelamente con la similitud dinámica de todas las fuerzas que intervienen en el fenómeno físico por lo que la aplicación de estas leyes en el modelo se restringe únicamente a las fuerzas predominantes.

El criterio básico de similitud que debe ser seleccionado es el criterio de Froude. Esto significa que la relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad en el prototipo debe ser idéntica a la relación propuesta en el modelo físico; por lo que se debe garantizar además la semejanza geométrica así como la reproducción del patrón de flujo.

Otra consideración importante se refiere a que, en general, todo fenómeno de disipación de energía debe simularse mediante el criterio de similitud de Reynolds. Sin embargo, mantener en forma simultánea la validez de los criterios de Froude y de Reynolds no es posible. La simulación apropiada del efecto

viscoso en el modelo no distorsionado, construido y operado bajo el criterio de similitud de Froude, exige que el flujo para el modelo, en todos los casos, sea turbulento totalmente desarrollado además de que el factor adimensional de fricción λ en la relación de Darcy – Weisbach sea idéntico en prototipo y en modelo, $\lambda_p = \lambda_m$. De este modo, a pesar de que se tenga $Re_m < Re_p$, se logra la representación apropiada del patrón de flujo y de la pérdida porcentual de energía.

Para la representación del fenómeno de introducción de aire se debe considerar a las fuerzas de tensión superficial como fuerzas predominantes adicionales; lo que significa que además del criterio de similitud de Froude, se deba considerar el criterio de similitud de Weber cuando el modelo requiera de análisis con este tipo de similitud como caso particular.

De acuerdo con estos dos criterios, y bajo la consideración inicial de que en el modelo se utiliza agua, de igual densidad y tensión superficial que las del prototipo, las principales relaciones de magnitudes físicas o escalas resultantes para el modelo serían:

<i>Magnitud física</i>	<i>Similitud según Froude</i>	<i>Similitud de Weber</i>	<i>Similitud de Reynolds</i>
Longitudes	$L_r = L_p/L_m$	$L_r = L_p/L_m$	$L_r = L_p/L_m$
Superficies	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$
Velocidades	$V_r = L_r^{1/2}$	$V_r = L_r^{-1/2}$ con $\sigma_r=1$	$V_r = L_r$
Tiempo	$t_r = L_r^{1/2}$	$t_r = L_r^{3/2}$	$t_r = 1$
Caudales	$Q_r = L_r^{5/2}$	$Q_r = L_r^{3/2}$	$Q_r = L_r$
Aceleración	$a_r = 1$	$a_r = L_r^{-2}$	$a_r = 1$
Presión	$(p/\gamma)_r = L_r$	$(p/\gamma)_r = L_r$	$(p/\gamma)_r = L_r$

Tabla No. 2.1: Valores de las escalas según diferentes criterios de similitud.

En la Tabla No. 2.1 se observa que, de acuerdo con el criterio de similitud de Weber, en el modelo deben presentarse velocidades superiores a aquellas correspondientes del prototipo, bajo el requisito de que $\gamma_r = 1$.

Tomando en cuenta la vigencia del criterio de similitud de Froude, la escala del parámetro adimensional de Weber se reduce a: $We_r = v_r^2 L_r = L_r^2$. Por lo tanto, un modelo operado bajo el criterio de similitud de Froude subestima la cantidad de aire que ingresa o es introducido a la masa de agua, puesto que el número de Weber efectivo en el modelo es menor que el del prototipo. Sin embargo, se puede obtener una representación óptima de la introducción de aire si el modelo froudiano tiene una escala de longitudes inferior a $L_r = 20$ y probando la eficiencia de la estructura con caudales superiores al caudal máximo de diseño hasta en un 25%.

Esta recomendación se fundamenta en los estudios realizados en una familia de modelos construidos con diferentes escalas de longitudes para evaluar el efecto de escala debido a la tensión superficial y a la formación de burbujas de aire que pueden ser introducidas en la masa de agua (18,19).

Finalmente, se menciona que la evaluación por separado de la influencia relativa de la viscosidad y de la tensión superficial en el modelo físico es normalmente imposible, dado que son efectos que pueden compensarse entre sí. Mientras la tensión superficial en el modelo afecta al grado de curvatura de la superficie libre del agua y por lo tanto, a su aceleración local centrífuga; la viscosidad relativamente mayor en el modelo hace que ésta incidencia sea menor.

2.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS DE CAMBIO DE NIVEL Y DIRECCIÓN.

Los parámetros de diseño hidráulico abarcan características de flujo como son caudal unitario (pendientes y calados de aproximación) y desniveles a vencer.

2.5.1 CAUDAL UNITARIO

Para el dimensionamiento geométrico de las estructuras de cambio de nivel y/o dirección, se tiene como magnitud principal el caudal unitario que se encuentra relacionado con la velocidad admisible del flujo a la entrada y a la salida de la estructura.

Es conveniente mencionar que el caudal de diseño no debe ser siempre igual al caudal máximo, ya sea en la conducción o en la aproximación, así como tampoco debe estar limitado a normativas de sistemas de alcantarillado o estar relacionado con períodos de retorno determinados. El caudal de diseño debe ser expresado como un porcentaje del valor del caudal máximo ($Q/Q_{\text{máx}}$) con el que se garantice un buen funcionamiento en el proceso de disipación.

2.5.2 DESNIVEL A VENCER

Una magnitud de igual importancia que determina el dimensionamiento geométrico de la estructura, es la diferencia de cotas (Δz) en la entrada y en la salida de la estructura de disipación. Este valor representa la cantidad de energía interna que deberá disiparse en el proceso.

En este punto es necesario acotar que la magnitud del desnivel se constituye en un parámetro que influye directamente en el tipo de estructura de disipación que se va a implementar.

CAPÍTULO 3

BASES DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS DESCARGADORES A VÓRTICE

3.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

En el diseño de las estructuras denominadas descargadores a vórtice es importante revisar la eficiencia del sistema para toda la serie de caudales de operación incluyendo los caudales mínimos sanitarios de manera que se garantice la formación y la presencia de flujo helicoidal.

Adicionalmente, otros aspectos relacionados con el buen funcionamiento de la estructura son:

- Mantenimiento de un núcleo de aire estable en la cámara de entrada (caracol) y en el tubo vertical.
- Suficiente ventilación para los caudales máximos en la cámara de disipación.
- La expulsión del aire introducido a lo largo del movimiento helicoidal.

3.1.1 CANAL DE ENTRADA O DE APROXIMACIÓN

El tipo de flujo que circula por este canal determina las características hidrodinámicas del descargador a vórtice. Para garantizar la estabilidad del flujo en el canal se debe cumplir con las siguientes recomendaciones:

En el caso de **flujo subcrítico**, se requiere que $Fr < 0.75$. Las características hidrodinámicas en el canal de aproximación serán controladas por la descarga en el tubo vertical, desde aguas abajo.

Para canales de entrada con **flujo supercrítico** se recomienda que $Fr > 1.30$. En este caso es importante analizar la posibilidad de que las altas velocidades en el

canal de aproximación den lugar a perturbaciones (sobreelevaciones) en la superficie libre del agua que pueden ser transportadas aguas abajo con la consecuente afectación al proceso de disipación de energía.

3.1.2 CÁMARA DE ENTRADA

La configuración de la cámara permite que la lámina del flujo permanezca confinada a la geometría del caracol garantizando la entrega de un flujo helicoidal al tubo vertical donde se produce la disipación de energía.

Es importante recalcar que el canal de aproximación debe entregar un flujo estable a la cámara de entrada para que se presente un buen funcionamiento. Sin embargo, de lo observado en laboratorio, se puede señalar que a pesar de existir pequeñas perturbaciones en el canal de entrada, la configuración en caracol de la cámara permite mantener el confinamiento del flujo.

3.1.3 TUBO VERTICAL O POZO

El diseño del diámetro del tubo vertical debe garantizar tanto la presencia de un núcleo de aire, que permita la disipación, así como el mantenimiento del flujo helicoidal adecuado; es decir, con un paso óptimo respecto de la longitud del tubo. La disipación de energía en esta parte de la estructura se produce por: la fricción del flujo con las paredes del tubo; cambio continuo de dirección y un incremento notable de la longitud de recorrido.

3.1.4 CÁMARA DE DISIPACIÓN AL PIE

Los principales objetivos que deben ser satisfechos en esta cámara al pie del tubo vertical son los siguientes:

- Garantizar la estabilidad del flujo helicoidal de caída proporcionando la ventilación suficiente del núcleo de aire en el tubo vertical,

- Disipar la energía residual al pie del tubo vertical (generalmente se coloca un estrechamiento a la salida de la cámara de disipación para asegurar la formación de un colchón de aguas que permita la disipación de la energía residual),
- Permitir que el flujo de ingreso al canal de entrega al pie de la estructura, sea homogéneo y estable,
- Permitir el cambio de dirección entre los canales de llegada y de salida del descargador a vórtice,
- Ofrecer la posibilidad de inspección de la estructura de cambio de nivel.

3.1.5 CANAL DE ENTREGA

El canal de entrega puede tener cualquier forma en su sección transversal; siempre que la transición entre la pared de aguas abajo de la cámara y el canal garantice un flujo controlado. El requerimiento principal del canal de entrega es que el flujo no presente caudales pulsatorios de la mezcla de agua y aire.

3.2 DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO

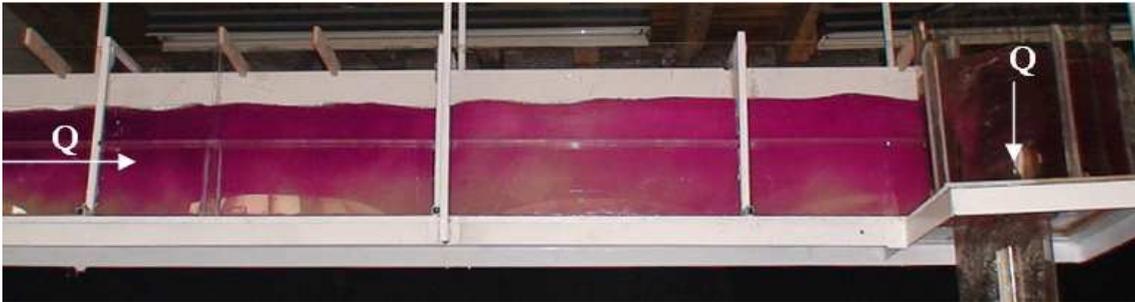
En el presente trabajo, se definen dos tipos de configuraciones de los descargadores a vórtice en función del tipo de régimen en el canal de aproximación: para flujo subcrítico y flujo supercrítico.

3.2.1 CANAL DE ENTRADA O DE APROXIMACIÓN

El canal de entrada debe tener una sección rectangular para facilitar la transición adecuada al flujo helicoidal en el caracol. En determinados casos, el ancho del canal debe ser variable con sección menor al final para:

- Provocar una aceleración que permita condiciones aceptables al inicio del movimiento helicoidal.

- Que la lámina de agua, para caudales pequeños, se mantenga adherida a la pared interior del tubo vertical.



Fotografía No. 3.1: Flujo en el canal de aproximación de régimen subcrítico.

3.2.2 CÁMARA DE ENTRADA

- a) Dimensionamiento geométrico para **régimen subcrítico:**

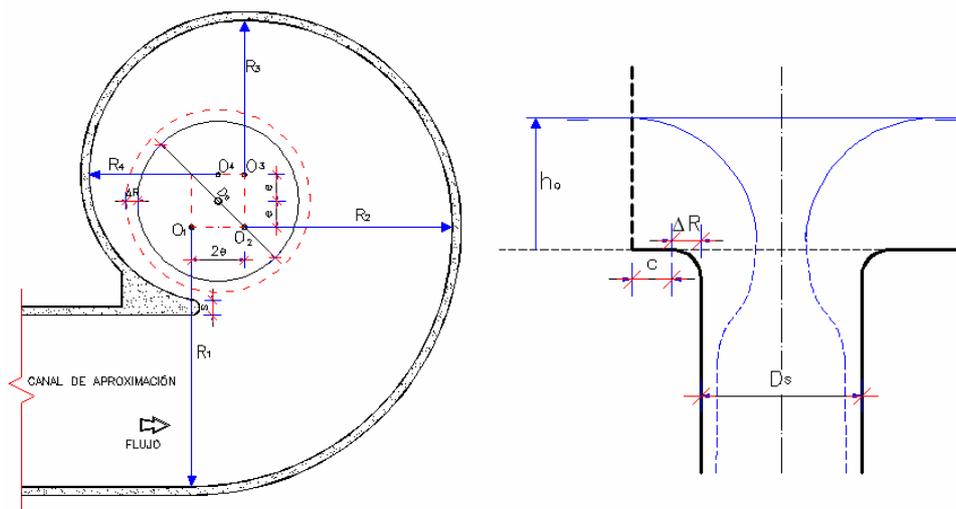


Gráfico No. 3.1: Geometría de la cámara de entrada para flujo subcrítico.

La magnitud base para la configuración de este tipo de cámara es el diámetro D_s del tubo vertical cuya apertura controla las características del flujo de aproximación subcrítico.

Las dimensiones geométricas de la cámara se obtienen utilizando las expresiones:

$$a = 0.5D_s + \Delta R + c + s + 0.5b$$

$$R_4 = 0.5D_s + \Delta R + c + e$$

$$R_3 = R_4 + e$$

$$e = (b + s) / 7$$

$$R_2 = R_4 + 3e$$

$$R_1 = R_4 + 5e$$

Donde: b = ancho del colector de entrada
 D_s = diámetro del tubo vertical o pozo
 $\Delta R, s, c$ = dimensiones estructurales

Se debe satisfacer además: $1 \leq a / D_s \leq 1,25$

b) Dimensionamiento geométrico para **régimen supercrítico**:

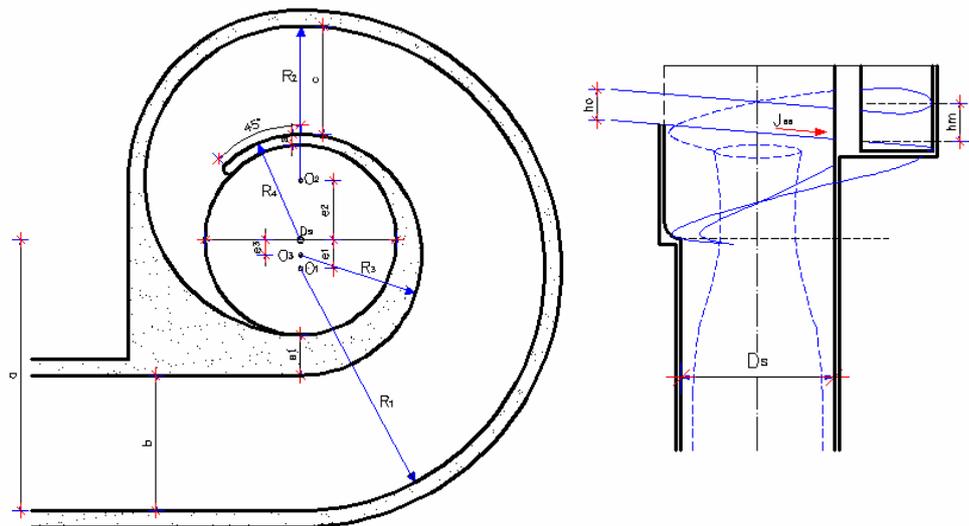


Gráfico No. 3.2: Geometría de la cámara de entrada para flujo supercrítico.

Las dimensiones geométricas de la cámara se obtienen utilizando las expresiones:

$$R_4 = 0.5D_s + s$$

$$R_3 = (0.5D_s + s + a - b) / 2$$

$$R_2 = (D_s + s + c) / 2$$

$$R_1 = (0.5D_s + s + a + c) / 2$$

$$e_1 = a - R_1$$

$$e_2 = 0.5D_s + s + c - R_2$$

$$e_3 = a - b - R_3$$

$$s_1 = a - b - 0.5D_s$$

Se deben satisfacer adicionalmente:

$$(0.5D_s + s + c) \leq a \leq (1.5D_s + s)$$

$$0.4D_s \leq b \leq D_s$$

$$0.4D_s \leq c \leq D_s.$$

El valor de la pendiente J_{se} es mayor que el de la J_{so} y varía entre el 5% al 30%; mientras que las magnitudes a , c , s , J_{se} son parámetros definidos por el cálculo estructural.

El contorno de la cámara de entrada para flujo supercrítico no es límite para la masa de agua por lo que su configuración se diseña en forma de un tobogán con paredes altas que permiten controlar la sobreelevación del nivel de agua.

3.2.3 TUBO VERTICAL O POZO

El diámetro del tubo vertical se calcula mediante la relación empírica:

$$D_s = \eta \cdot \left(\frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5}$$

Donde el factor η depende de la geometría de la cámara de entrada y varía entre 0,83 hasta 2. En el caso de los modelos ensayados en la EPN, se determinó que el valor de $\eta = 1,25$ es recomendable para los dos tipos de flujo de aproximación.

El valor Q_d representa el caudal de diseño, para el cual queda determinada toda la geometría de la estructura. La selección de este caudal obedece a los requerimientos de cada proyecto en particular. El valor del caudal máximo ($Q_{m\acute{a}x}$) que puede ser aceptado en el tubo vertical sin que produzca una grave reducción en el núcleo de aire y permita mantener la presión atmosférica en la superficie libre del flujo helicoidal. Este valor de $Q_{m\acute{a}x}$ representa el gasto para el cual se cierra el núcleo de aire y se presenta caudal no permanente con graves fluctuaciones de presión interna.

En caso del flujo de aproximación **subcrítico**, $Q_{m\acute{a}x}$ se calcula con la expresión:

$$Q_{m\acute{a}x} = 4 \cdot \left(\frac{D_s}{2}\right)^3 \cdot \sqrt{\frac{5g}{b}}$$

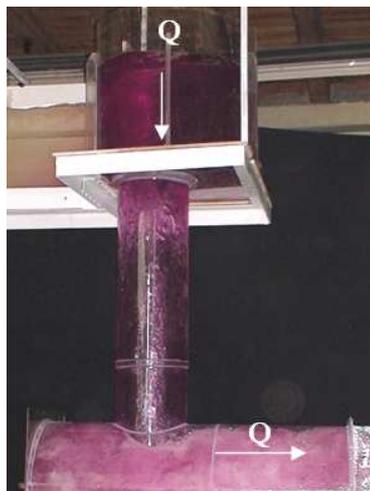
Para caudales inferiores al valor de $Q_{m\acute{a}x}$, es posible determinar la curva de descarga con respecto a la profundidad de flujo en el canal de entrada, mediante la relación:

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{\pi \cdot \sqrt{2y}}{\sqrt{\frac{1}{\mu^2} - \left(\frac{\pi \cdot D_s}{2 \cdot a \cdot y}\right)^2}}$$

Donde: $Q_o = \sqrt{\frac{g \cdot a}{b} \cdot \left(\frac{D_s}{2}\right)^5}$ y $y = \frac{h}{h_o}$ siendo $h_o = \frac{a \cdot D_s}{2b}$

μ = coeficiente de contracción característico del tipo de cámara de entrada.

Por razones de estabilidad del flujo helicoidal de caída, se recomienda que el diámetro seleccionado para la construcción de la estructura esté siempre en el rango: $D_s \leq D_{efec} \leq 1.5D_s$.



Fotografía No. 3.2: Tubo vertical en el DV con aproximación subcrítica.

Para el caso del flujo de aproximación **supercrítico**, debe considerarse que el control desde la entrada al tubo vertical desaparece y que las condiciones hidrodinámicas dependen exclusivamente del radio de curvatura de las paredes

de la cámara espiral. Aparece entonces en este caso, una onda permanente en la pared interior, ubicada en la sección α_M , que produce una elevación de la superficie libre igual a h_M , como se esquematiza en el Gráfico No. 3.3.

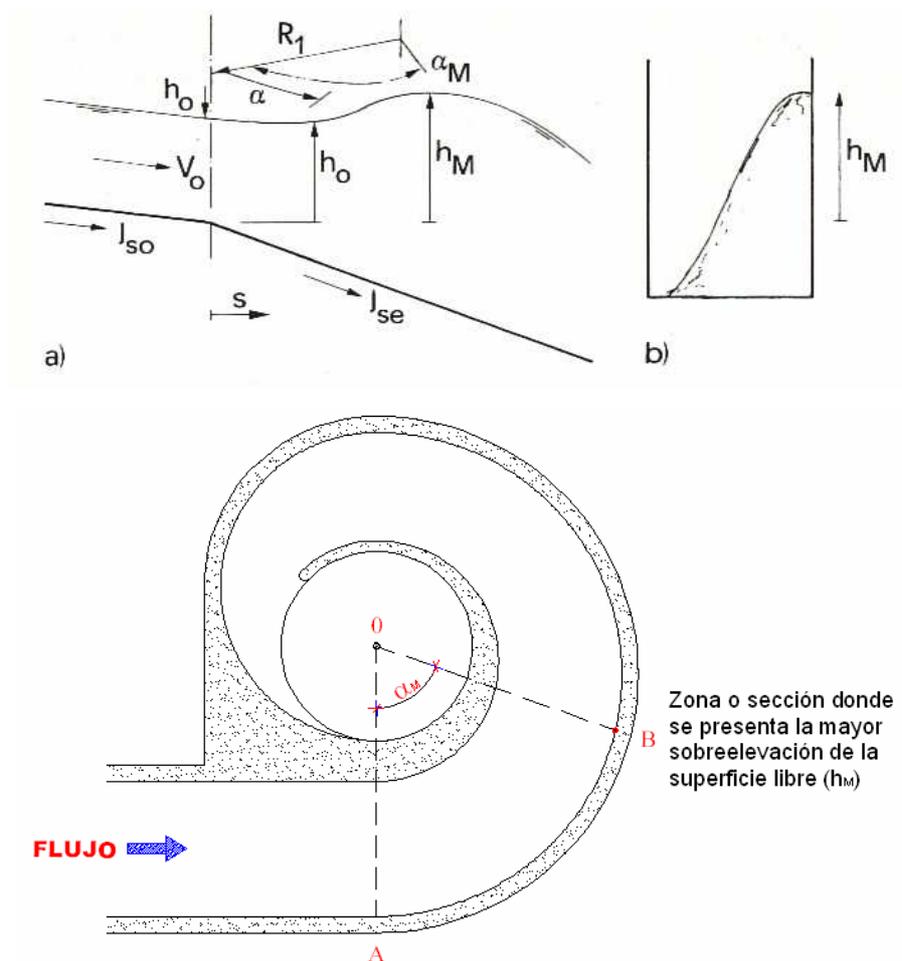
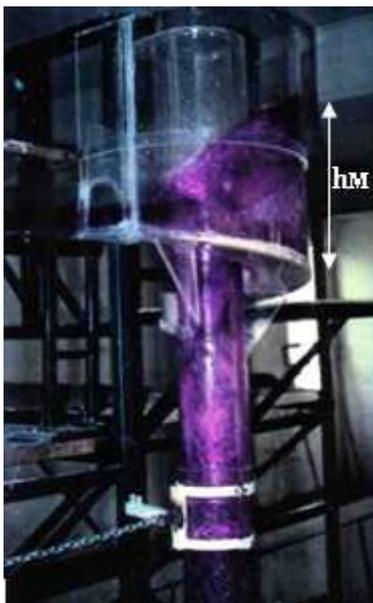


Gráfico No. 3.3: (a) Perfil longitudinal; (b) Sección transversal del flujo supercrítico en la cámara espiral; (c) Identificación en planta de α_M para vórtice supercrítico.

El valor de la sobreelevación h_M se evalúa con la relación experimental:

$$\frac{h_M}{R_1} = (0.15 \cdot Fr_o + 1.10) \cdot \left(\frac{2bh_o^2 \cdot Fr_o}{R_1^3} - \frac{J_{so}}{2} \right)$$

La ubicación de la sobreelevación se determina por: $\frac{\alpha_M}{Fr_o} = 75 \cdot \sqrt{\frac{h_o}{R_1}}$



Fotografía No. 3.3: Tubo vertical en un descargador a vórtice con aproximación subcrítica.

Para evaluar el porcentaje de disipación de energía se calcula, en primer lugar, la velocidad V_{fin} que alcanza el flujo en la sección final del tubo vertical, bajo la estimación correcta del coeficiente λ de fricción o del coeficiente n de la ecuación de Manning, que consideren el movimiento helicoidal, estable, con cambio continuo de alineación y con introducción de aire.

$$V_{fin} = \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{3/5} \cdot \left(\frac{Q}{\pi \cdot D_s} \right)^{2/5} \right] \cdot \left[Tgh \left(6 \cdot \frac{L_s}{L_{s\ ext}} \right) \right]$$

El valor de L_s representa la longitud efectiva del tubo vertical. El valor de $L_{s\ ext}$ representa la longitud del tubo vertical, a partir de la cual se descuelga el flujo del contorno y desaparece el movimiento helicoidal del flujo principal.

$$L_{s\ ext} = \left(\frac{3}{g} \right) \cdot \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{6/5} \cdot \left(\frac{Q}{P \cdot D_s} \right)^{4/5} \right]$$

Para completar el diseño del tubo vertical se debe considerar el caudal de aire Q_a requerido para garantizar una completa ventilación del flujo de agua en su caída vertical, mediante la siguiente relación:

$$Q_a = 0.04 \cdot \left(\frac{Z}{D_s} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{V_{fin} \cdot \pi \cdot D_s^2}{4} - Q \right) \quad \text{para } Q \leq Q_{m\acute{a}x}$$

Si se expresa la relación $\beta = \frac{Q_a}{Q}$ en función del parámetro $q_s = \frac{Q \cdot n}{\pi \cdot D_s^{8/3}}$ se obtiene la curva señalada en el Gráfico No. 3.4 (válida para diseño), que permite la valoración de la eficiencia de una determinada longitud L_s de tubo vertical.

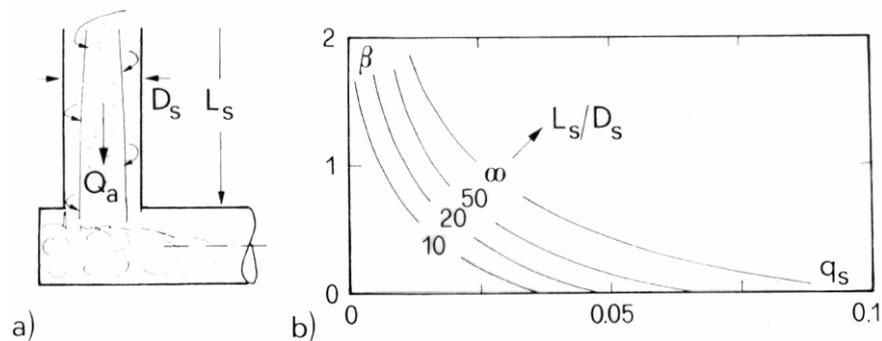
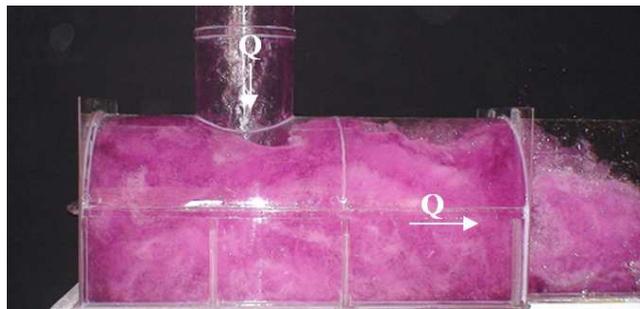


Gráfico No. 3.4: Variación del parámetro de ventilación $\beta = Q_a/Q$ en función de la longitud relativa del tubo vertical

3.2.4 CÁMARA DE DISIPACIÓN AL PIE



Fotografía No. 3.4: Cámara de disipación.

La geometría básica de la cámara, esquematizada en el Gráfico No. 3.5, se basa en las siguientes expresiones:

$$4 \leq St/D_s < 6$$

$$2 \leq Bt/D_s < 3$$

$$2 \leq Tt/D_s < 3$$

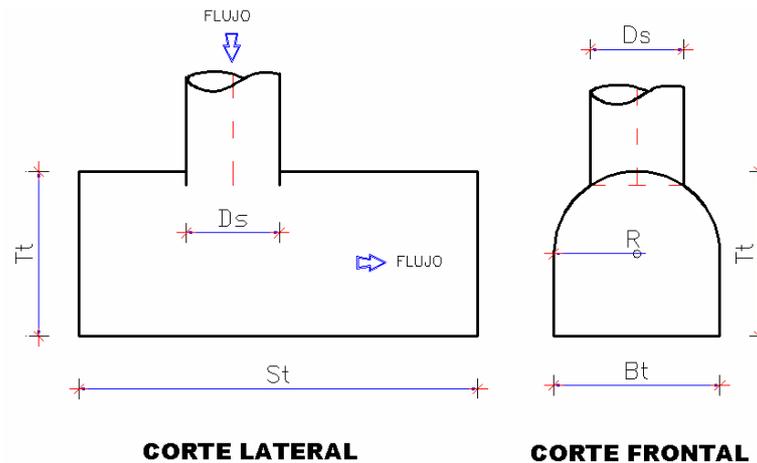


Gráfico No. 3.5: Esquema de la cámara al pie del tubo vertical.

En cada caso particular, es necesario identificar la presencia de estructuras complementarias que deben ser colocadas al interior de la cámara al pie que mejoran los grados de disipación.

El dimensionamiento geométrico de estas estructuras obedece a la condición final en el canal de entrega, respecto del grado de disipación de energía residual.

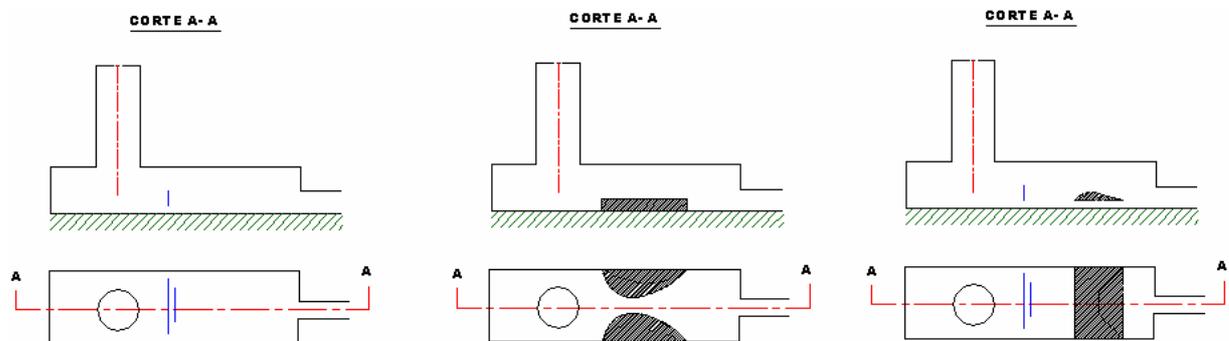


Gráfico No. 3.6: Estructuras complementarias.

El diseño geométrico obedece a los criterios señalados en la Hidráulica Básica.

3.2.5 CANAL DE ENTREGA

El canal de entrega puede tener cualquier forma de sección transversal. En determinadas ocasiones se dispone de un estrechamiento en la sección final de la

cámara y de tipo abocinada con ventilación suficiente para mejorar el flujo en el canal de entrega.



Fotografía No. 3.5: Canal de entrega.

3.3 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO PARA CAUDAL VARIABLE

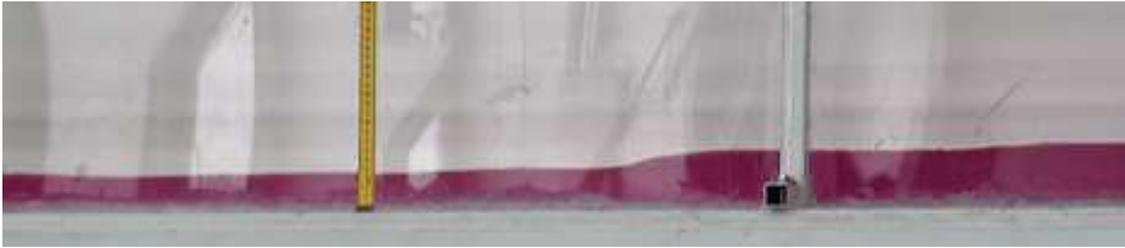
Considerando el régimen (subcrítico o supercrítico) para el que ha sido diseñada la estructura de disipación se detalla a continuación el funcionamiento para cada parte del descargador considerando caudal variable. El estudio experimental que se reporta a continuación fue desarrollado en el laboratorio de Hidráulica de la EPN.

3.3.1 ANÁLISIS DE FLUJO EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN

Para **flujo subcrítico**, se espera que las líneas de corriente en el canal de aproximación, tiendan a ser rectas y paralelas.

En el modelo ensayado en el laboratorio se observa perturbaciones en el flujo por la presencia de una transición entre el tanque de carga y el inicio del canal. Este hecho conduce a la recomendación de que debe cuidarse sobremanera la geometría de cambio gradual en la aproximación del canal.

Para el caudal ensayado de 10.0 l/s, debido a las características de la entrada del canal, se produce una aceleración en el flujo hasta el segundo tramo donde se observa una onda y cambio de régimen generado por el control de la cámara de entrada.



Fotografía No. 3.6: Flujo en el canal de aproximación para $Q = 10.0$ l/s.

En el caso de **flujo supercrítico** se presenta una fuerte pendiente al canal lo que permite alcanzar rápidamente altas velocidades produciendo una mezcla agua - aire cuyas características de flujo se diferencian notablemente de aquella en flujo subcrítico.

3.3.2 ANÁLISIS DE FLUJO EN LA CÁMARA DE ENTRADA

Para la serie de caudales (bajos, medios y altos) observados en **régimen subcrítico**, se produce una sobreelevación del flujo en la pared externa desde la base de la cámara, y cuya altura es menor mientras menor es el caudal de circulación.

La sobreelevación que se produce en el flujo se debe principalmente al efecto de las fuerzas centrífugas ya que en esta estructura se genera el flujo helicoidal totalmente definido, observándose además la presencia de una columna de aire que garantiza el buen funcionamiento de la estructura.

Para caudales en **régimen supercrítico**, el cambio de pendiente en la cámara acelera el flujo principal por lo que genera una considerable sobreelevación del nivel de superficie libre y la pérdida de contacto de la lámina con la pared interior de la margen izquierda.

La sobreelevación de la superficie libre del agua, considerando caudales variables, no debe sobrepasar el nivel previsto de las paredes exteriores.

3.3.3 ANÁLISIS DE FLUJO EN EL TUBO VERTICAL O POZO

La formación del núcleo de aire perfectamente definida es una característica importante que se observa en las pruebas del modelo con **flujo subcrítico**. Los valores de los diámetros del núcleo de aire visualizados en el laboratorio, para la serie de caudales de operación (bajos, medios, altos), permiten concluir que a caudales altos, el diámetro relativo del núcleo de aire es menor.

Se observa la formación de flujo helicoidal bien definido a lo largo del tubo vertical aún en pruebas con caudales bajos.

El comportamiento del flujo en el tubo vertical para **régimen supercrítico** es similar al descrito anteriormente para régimen subcrítico ya que la cámara del vórtice supercrítico entrega un flujo con movimiento helicoidal con similares características a las del vórtice subcrítico.

3.3.4 ANÁLISIS DE FLUJO EN LA CÁMARA DE DISIPACIÓN

El flujo en la cámara de disipación presenta características hidrodinámicas definidas para la serie de caudales considerados. En caso de caudales altos, se observa una mezcla violenta que provoca una gran macroturbulencia con considerable introducción de aire; mientras que para caudales bajos y medios, el control que se coloca al final de la cámara permite la formación de un colchón de aguas que permite la disipación de la energía residual.

3.3.5 ANÁLISIS DE FLUJO EN EL CANAL DE ENTREGA

El colector de salida recibe el flujo desde la cámara de disipación; en su primer tramo, se observa, fuertes fluctuaciones en la superficie libre del agua especialmente para caudales altos. En el caso de caudales bajos se mantienen las fluctuaciones de la superficie libre, pero la longitud del tramo en que esta se desarrolla es menor.

3.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ◆ Los patrones de flujo en cada elemento de la estructura descargador a vórtice se ajustan a lo previsto como hipótesis del diseño y del dimensionamiento geométrico.
- ◆ La cámara de entrada es el elemento que ejerce control en el flujo del canal de aproximación determinando el régimen en el que éste se encuentra (subcrítico); para caudales bajos se observa que el control que ejerce la cámara de entrada alcanza a la mitad del canal de entrada, mientras que para caudales medios y altos se aprecia que la cámara de entrada ejerce pleno control en el flujo del canal a pesar de las condiciones impuestas en la transición a la entrada del modelo.
- ◆ Para la gama de caudales de operación de la estructura se observa la presencia del núcleo de aire estable tanto en el tubo vertical como en la cámara de entrada, garantizando así el flujo helicoidal y por ende la disipación de energía en esta estructura.



Fotografía No. 3.7: Formación del núcleo de aire en la cámara de entrada.

- ◆ Experimentalmente se determina el caudal límite de funcionamiento del modelo, en el cual se pudo observar que el núcleo de aire formado en la cámara de entrada se desplaza del eje central, debido a las grandes magnitudes de las fuerzas centrífugas e inerciales actuantes para esta condición. Como consecuencia se tiene concentración de esfuerzos.

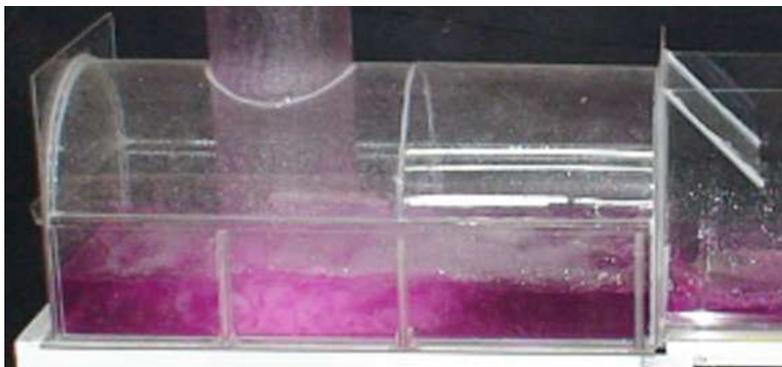
- ◆ Se aprecia en el tubo vertical para el caudal límite de funcionamiento un flujo helicoidal que se mantiene hasta la mitad de la estructura, produciéndose un desprendimiento del flujo y la caída directa a la cámara de disipación.



Fotografía No. 3.8: Desplazamiento hacia la izquierda del núcleo de aire en la cámara de entrada.

- ◆ En el canal de entrega, para caudales altos, se presenta flujo turbulento de una masa agua – aire que tiene que ser controlada para evitar problemas en la conducción.
- ◆ A caudales más bajos, el núcleo de aire es cada vez mayor mientras que para caudales altos, el núcleo de aire disminuye de sección.
- ◆ Para flujo subcrítico se recomienda la aplicación de las estructuras descargadores a vórtice como disipadores de energía pues se aprovecha la altura de caída para lograr una disipación parcial de la energía con la que la cámara al pie requiere de menores dimensiones; adicionalmente el flujo descende controlado y no existe riesgos de obstrucciones ni de flujos pulsatorios.
- ◆ La configuración de la cámara de disipación, para caudales bajos y medios, garantiza la formación del colchón de aguas que aporta a la disipación de

energía residual del flujo; para caudales altos, a pesar de la presencia del colchón de aguas se evidencia el alto porcentaje de mezcla agua – aire.



Fotografía No. 3.9: Formación del colchón de aguas en la cámara de disipación para caudales medios.



Fotografía No. 3.10: Formación del colchón de aguas y presencia de la masa agua - aire en la cámara de disipación para caudales altos.

- ◆ Se recomienda, como obra complementaria, la construcción de un ducto de ventilación para garantizar la presencia de la presión atmosférica en la parte posterior de la cámara de disipación y estabilizar el flujo en esta zona.
- ◆ Se debe tener un especial cuidado en el diseño de los descargadores a vórtice en régimen supercrítico; ya que este tipo de flujo es inestable y presenta problemas en la conducción, existen sectores en los que su colocación es inevitable por las condiciones topográficas del terreno y limitaciones constructivas.

CAPÍTULO 4

BASES DEL DIMENSIONAMIENTO DE LOS POZOS DE BANDEJAS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Un pozo de bandejas tiene como objetivo disipar energía de la masa de agua desde el canal de aproximación en el nivel superior, mientras desciende, en cada nivel (bandeja) de la estructura. Adicionalmente debe permitir el cambio de dirección del flujo a la salida.

4.1.1 CANAL DE ENTRADA O DE APROXIMACIÓN

El canal de entrada o de aproximación debe presentar, un flujo estable y sin ningún tipo de perturbación hacia el pozo de disipación. Esto se consigue mediante secciones prismáticas y continuas, donde no se presente cambio de materiales constructivos, y en canales que no contengan derivaciones.

4.1.2 POZO DE DISIPACIÓN

Constituido de un grupo de plataformas (bandejas) con determinadas características geométricas, dispuestas en forma alternada en toda su altura; a través de las cuales se traslada el flujo dando lugar a la disipación gradual de la energía.

El funcionamiento del pozo de disipación debe garantizar adicionalmente el control de la sedimentación del material o lodo, ningún olor o mal aspecto en su interior; además que su diseño permita una circulación adecuada de aire y facilite el proceso de mantenimiento.

Es conveniente indicar que a la salida del pozo de disipación se puede colocar un pozo de alivio que funcionará como una piscina que permita la disipación de la energía residual del flujo antes del ingreso al colector, o a su vez una estructura de ancho variable que se abre hacia la salida con muros de ala laterales unidos entre sí, para dar origen a un flujo rápido con expansión rectilínea.

4.2 DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO

Como un aporte más a los estudios e investigaciones realizadas alrededor del Pozo de Bandejas como una estructura de disipación de energía, en el presente proyecto de titulación se plantea una modificación geométrica de sus plataformas (bandejas) obteniéndose conclusiones y observaciones que aportan finalmente al diseño óptimo de la estructura.

4.2.1 POZO DE BANDEJAS REJA-ORIFICIO



Fotografía No. 4.1: Pozo de Bandejas Reja-Orificio.

Con el objetivo básico de determinar el caudal máximo que podría circular por la estructura se decidió diseñar una variante geométrica de bandejas rectangulares

horizontales con un ancho igual a la mitad de la longitud del pozo ($b = L/2$) para aumentar el caudal unitario.

La relación de áreas (ξ) corresponde al porcentaje:

$$\text{RELACIÓN DE ÁREAS : } \frac{A_{\text{rejilla}}}{A_{\text{transversal-bandeja}}} = 14\%$$

Las dimensiones del modelo fueron obtenidas en función del caudal disponible en el laboratorio; es por ello que se adoptó una escala mínima (1:4) para el modelo en prototipo.

La disposición de las bandejas se realiza de forma tal que la ubicación de reja y el orificio se ubiquen en forma alternada.

En el modelo, el ancho del colector de aproximación coincide con el del pozo, siendo la primera bandeja una prolongación del fondo del canal de aproximación. Cada bandeja está conformada en su primera parte de una losa completa, seguida por una reja diseñada para descargar el 40% del caudal de diseño (Q_d) y finalmente un orificio por el que circulará el 60% restante del caudal como se muestra en el Gráfico No. 4.1.

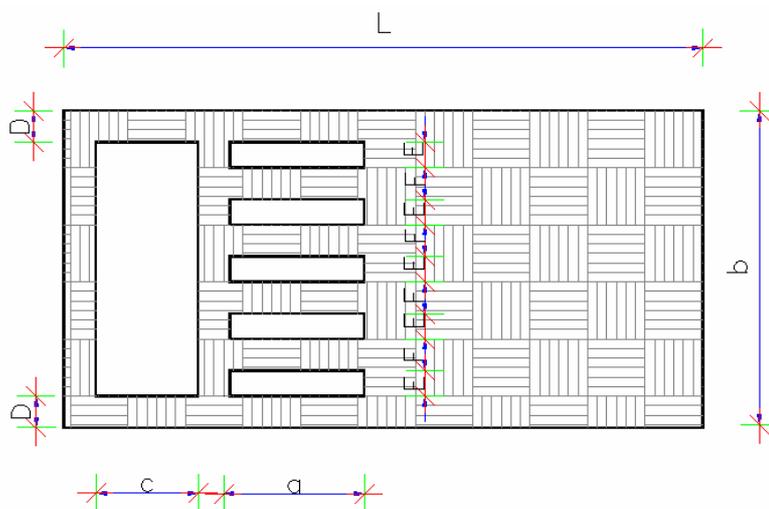


Grafico No. 4.1: Bandeja Reja-Orificio.

Los cálculos efectuados para la estimación del área efectiva en el modelo, tanto de las rejillas como del orificio corresponden a la expresión:

$$A_{\%} = \frac{Q_{\%}}{C_d \cdot \sqrt{2gh_c}}$$

Donde: $A_{\%}$ = área efectiva de la rejilla u orificio.
 $Q_{\%}$ = porcentaje de caudal total que circulará por cada elemento.
 C_d = coeficiente de descarga asumido igual a 0.60.
 h_c = calado crítico

Una vez obtenidos los valores de las áreas efectivas, en base a las dimensiones de la bandeja, se determina el número de rejillas entre las que se dividirá proporcionalmente el área estimada para el 40% de caudal así como la dimensión mayor del orificio.

La altura de separación entre bandejas se estableció en base a los siguientes criterios:

- Mantenimiento: considerando la altura promedio de una persona que puede realizar esta actividad.
- Optimización de la estructura: mejorar el comportamiento del pozo de bandejas partiendo de los resultados obtenidos con experiencias anteriores.

Es importante recordar que la separación entre bandejas influirá en la capacidad de descarga de la estructura.

Los parámetros de diseño que han sido expuestos se muestran en detalle en el **Anexo 1: Plano**: Detalles constructivos modelo Pozo de Bandejas Reja-orificio.

4.2.2 POZO DE BANDEJAS INCLINADAS (5%) CON REJA



Fotografía No. 4.2: Pozo de Bandejas Inclínada (5%) con Rejas.

Como producto de investigaciones anteriores se determinó que esta variante de bandejas con reja e inclinación de la plataforma produce buenos resultados de disipación de energía por lo que se realizó un nuevo modelo procurando optimizar la estructura basándose en ciertas modificaciones realizadas en el modelo de bandeja reja – orificio.

Para el diseño de esta modificación se consideran los siguientes parámetros:

- La longitud de la bandeja es igual a dos veces su ancho ($L = 2b$).
- La relación de áreas es igual al 14%.
- La relación entre las dimensiones B y C, detalladas en el Gráfico No. 4.3, es igual a las determinadas en estudios anteriores: $\frac{B}{C} = \frac{0.190}{0.260}$
- Se adoptó una inclinación recomendada en estudios anteriores de 3° que corresponde al 5% de pendiente a partir de la segunda bandeja (18).

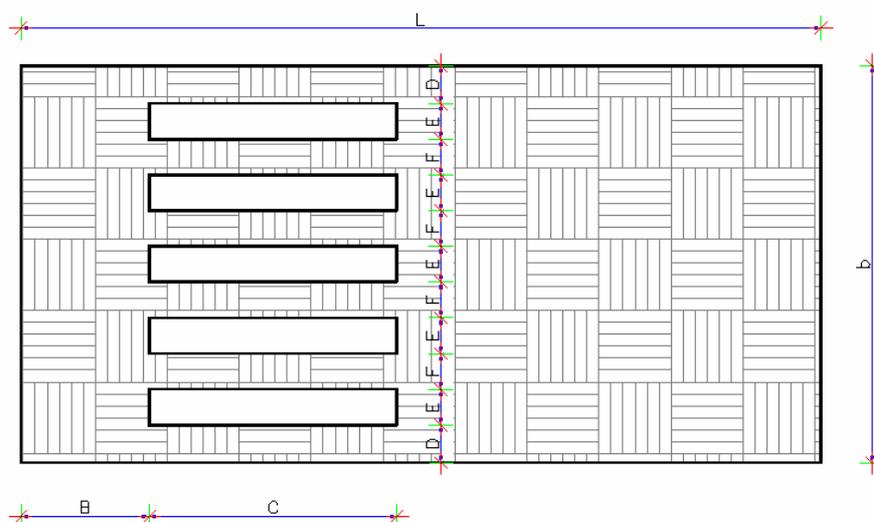


Gráfico No. 4.2: Dimensiones de la variante bandeja inclinada (5%) con reja.

La inclinación de la plataforma de las rejillas permite disminuir la aceleración de la entrada del flujo a los orificios, mejorando de esta manera la aproximación antes de la caída al siguiente nivel. La inclinación en las bandejas contribuye a la acumulación de agua que se constituye en eficientes cuencos disipadores y favorece la presencia de resaltos hidráulicos en cada nivel.

Los parámetros de diseño que han sido expuestos se encuentran detallados en el Anexo 1: Plano: Detalles constructivos modelo Pozo de Bandejas Inclinada (5%) con reja.

4.3 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO PARA CAUDAL VARIABLE

Se describe el funcionamiento de la estructura para un rango de caudales determinado y para cada una de las modificaciones ensayadas.

4.3.1 ANÁLISIS DE FLUJO EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN

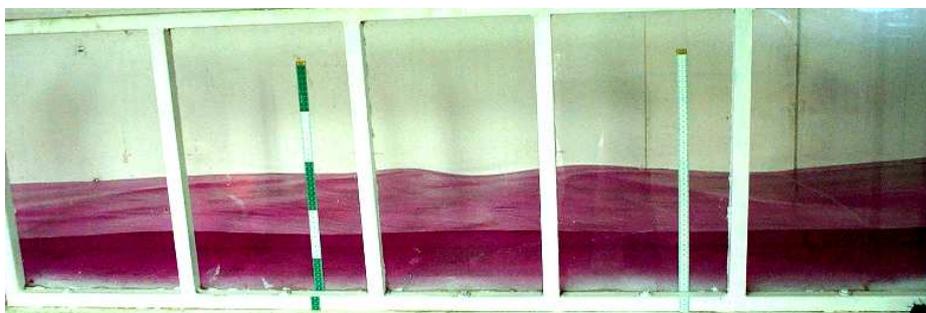
El flujo que se presenta a lo largo del canal de aproximación, en el modelo, para la gama de caudales estudiada, es estable y uniforme gracias a la corrección realizada en la transición de tipo tangencial entre el tanque de carga y el canal

como se puede observar en la Fotografía No. 4.5 y se detalla en el Anexo 1: Plano: Detalles constructivos modelo Pozo de Bandejas Reja-Orificio.

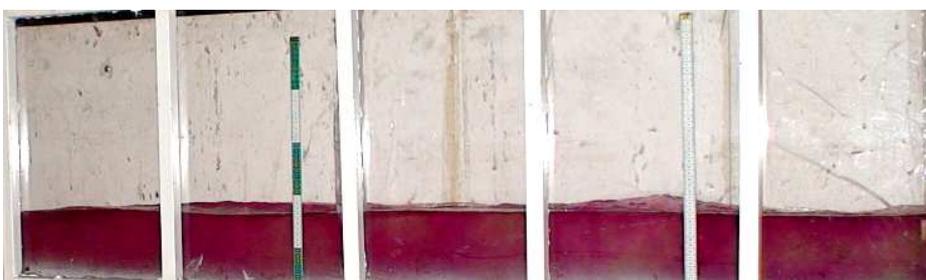


Fotografía No. 4.3: Transición con paredes de alineación curva.

El comportamiento del flujo en el canal de aproximación se aprecia en las Fotografías No. 4.4 y No. 4.5.



Fotografía No. 4.4: Flujo en el canal de aproximación para el pozo de bandejas reja - orificio.



Fotografía No. 4.5: Flujo en el canal de aproximación para el pozo de bandejas con reja e inclinación del 5%.

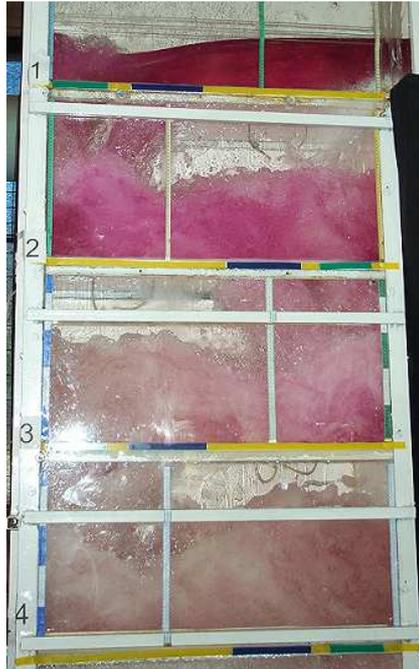
4.3.2 ANÁLISIS DE FLUJO EN LAS BANDEJAS

Para los dos modelos de bandejas ensayadas se evidencia características específicas del comportamiento de la estructura:

- En la primera bandeja, el comportamiento del flujo se ve influenciado por el canal de aproximación. La reja y el orificio funcionan adecuadamente.
- La segunda bandeja refleja la influencia de la entrada uniforme del flujo a la estructura a través de la primera bandeja. Su comportamiento entonces no es representativo para otras bandejas.
- La tercera bandeja se constituye en la bandeja referencial puesto que no posee ningún tipo de influencia de la entrada o salida del flujo en la estructura.
- Debido a que la parte final del pozo tiene una altura mayor que la altura entre bandejas se produce introducción de aire adicional al sistema por lo que en la cuarta bandeja se observa un comportamiento diferente a la bandeja tipo.

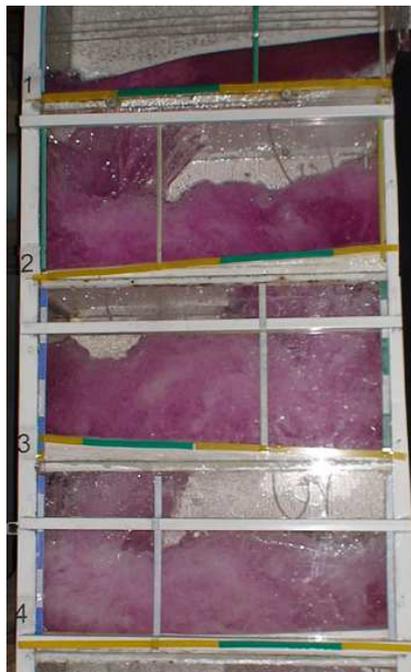
En el modelo de bandejas reja – orificio ensayado con caudales entre 13.1 l/s y 79.5 l/s se presentan las siguientes características particulares:

- a) Para el caudal 13.1 l/s, el flujo impacta directamente sobre las losas de las bandejas, que puede producir problemas de abrasión y disminuir la vida útil de la estructura. La disipación de energía se produce a costo del desgaste de la estructura.
- b) En los caudales medios y altos, la velocidad de circulación del flujo por la bandeja permite que el caudal evite la reja y descargue directamente por el orificio, generando, en algunos niveles, ahogamiento de la bandeja para caudales altos, y limitando la formación del resalto hidráulico.



Fotografía No. 4.6: Detalle de flujo en las bandejas para un caudal intermedio. Se presenta flujo con caudal pulsatorio y fluctuaciones severas de los niveles de la mezcla agua – aire.

En el modelo de bandejas con reja e inclinación del 5%, ensayado con caudales entre 10.2 l/s y 75.5 l/s se presentan las siguientes características particulares:



Fotografía No. 4.7: Detalle de flujo en las bandejas para un caudal intermedio. Se observa formación del resalto hidráulico y del colchón de aguas.

- a) Para el caudal de 10.2 l/s, la inclinación de las plataformas ayuda a la formación del colchón de aguas; Se evita el impacto del flujo directamente sobre la losa y se garantiza la disipación de energía para caudales bajos.
- b) En los caudales medios y altos el comportamiento anterior se reproduce una vez más; permitiendo constatar la presencia del resalto hidráulico en cada nivel, de tal modo que se garantiza la disipación de energía a lo largo de la estructura de disipación.

4.3.3 ANÁLISIS DE FLUJO EN LA DESCARGA

Para el modelo del pozo de bandejas reja – orificio, el flujo en la descarga muestra energía residual y flujo pulsatorio, como se observa en la Fotografía No. 4.8. La variante de las bandejas no genera entonces suficiente disipación de energía para cambio de nivel.



Fotografía No. 4.8: Flujo en la descarga para el pozo de bandejas reja - orificio.

En el modelo del pozo de bandejas con reja e inclinación de la plataforma, para el grupo de caudales ensayados, se presenta un flujo adecuado en la entrega al colector, ratificando la aceptable capacidad de disipación de energía. En la Fotografía No. 4.9 se muestra el comportamiento del flujo antes del vertedero de salida.



Fotografía No. 4.9: Flujo en la descarga para el pozo de bandejas con reja.

4.4 SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EN MODELOS FÍSICOS (21)

- (i) El flujo en el interior del pozo adquiere rápidamente las características de una mezcla agua – aire que se presenta por la alta velocidad de flujo y por los choques de los chorros en las paredes.
- (ii) La mezcla agua – aire está conformada por una masa líquida con burbujas de aire en la parte más profunda, mientras en la parte superior es prácticamente una masa de aire con gotas de agua, presentándose una distribución más homogénea del aire en la masa líquida, gracias a los movimientos generados por el impacto de los chorros.

La profundidad de flujo aireado depende de la concentración media del aire \bar{c} como se señala en la expresión siguiente: $y_w = (1 - \bar{c}) \cdot y_{90}$

Donde: y_w es la profundidad del flujo de agua sin aire, denominada profundidad de agua clara,
 \bar{c} es la concentración media del aire, expresada en porcentaje y
 y_{90} es la distancia perpendicular al fondo del canal donde la concentración del aire es igual al 90%

Considerando que la relación entre la densidad del aire ρ_L , y la densidad del agua ρ_W es alrededor de 1/700 y que la velocidad de ascenso de las burbujas de aire con respecto a la velocidad del agua V_W es insignificante, es posible suponer que la distribución de la velocidad del agua es mas o menos independiente de la concentración media de aire \bar{c} (16).

La **ley de distribución de velocidades** para flujo uniforme corresponde a la siguiente expresión:

$$\frac{V_W}{V_{90}} = \left[\frac{y}{y_{90}} \right]^{0.158}$$

Siendo V_{90} es la velocidad del flujo a la distancia y_{90} desde el fondo del canal donde la concentración del aire es igual al 90%, siendo esta la profundidad ficticia donde el agua se considera con una concentración del 90% del aire.

Los parámetros de corrección de la carga de velocidad así como de la cantidad de movimiento para flujo autoaireado, en función de la concentración media del aire (\bar{c}) se presentan en el Gráfico No. 4.3.

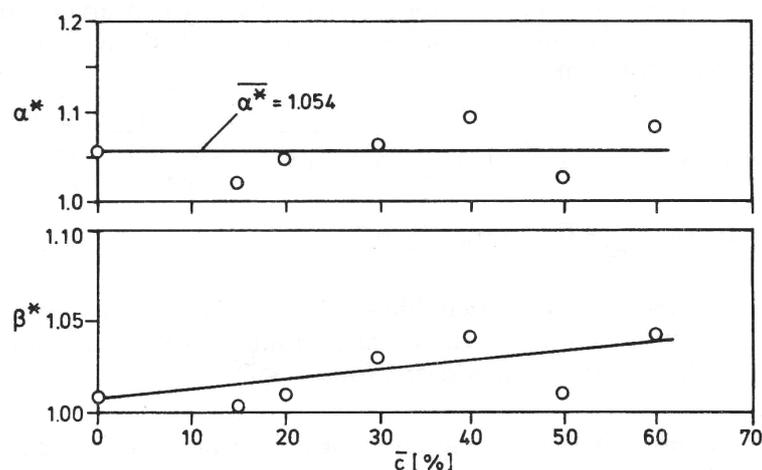


Gráfico No. 4.3: Parámetros de corrección α^* y β^* en función de \bar{c} .

El valor del coeficiente de corrección de la carga de velocidad para flujo autoaireado (α^*) varía entre 1.05 a 1.06 y es prácticamente independiente de la

concentración media del aire; por lo tanto la carga de velocidad de la mezcla no es afectada por la concentración \bar{c} .

El coeficiente de corrección de la cantidad de movimiento para flujo autoaireado β^* aumenta con el valor de \bar{c} , es decir que las fuerzas generadas se incrementan con respecto a las del flujo de agua clara (sin aire).

La resistencia al flujo así como el comportamiento de la mezcla agua – aire depende de la concentración media del aire (\bar{c}). La relación entre los coeficientes de resistencia para flujo totalmente aireado λ_c y para flujo sin aire al inicio de la autoaireación λ_a en función de la concentración media de aire que se reporta en la literatura técnica se presenta en el Gráfico No. 4.4.

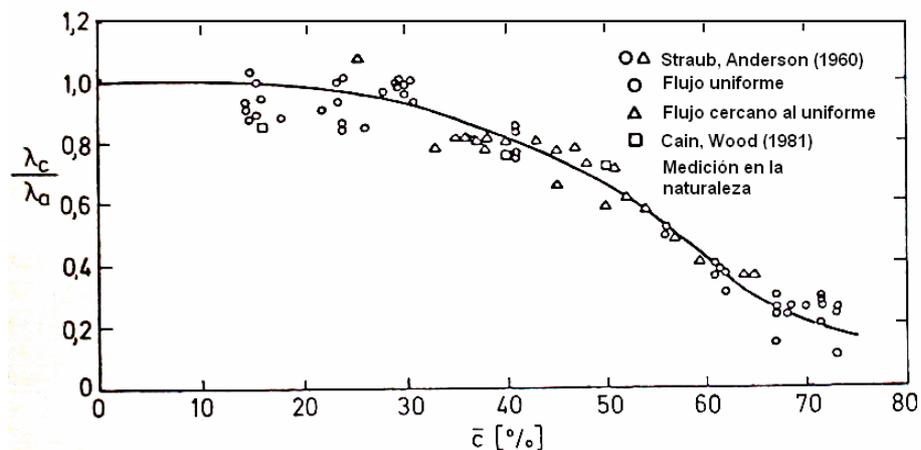


Gráfico No. 4.4: Relación entre coeficientes de resistencia λ_c/λ_a en función de \bar{c} .

Se observa que la resistencia al flujo empieza a disminuir cuando la concentración media del aire \bar{c} sobrepasa el 30%.

El flujo al interior del pozo de bandejas, si bien no es uniforme, se caracteriza por concentraciones medias de aire bastante altas y crecientes de tal manera que es posible asumir que se alcanza valores de \bar{c} del orden del 70%.

Los resultados reportados en la literatura técnica pueden ser aplicados considerando estos altos valores de concentraciones medias de aire. Para

valores de \hat{c} del orden del 50%, el valor del parámetro λ_c/λ_a disminuye hasta 0.60 y para \hat{c} cercanos al 70%, λ_c/λ_a es tan bajo como 0.20.

La reducción en el valor del coeficiente de resistencia, que se observa en flujos con altas concentraciones medias de aire implica que la pérdida de energía generada en un flujo totalmente aireado es menor que la generada en un flujo de agua clara como se establece a continuación en los cálculos realizados para las variantes de pozo de bandejas.

4.4.1 SÍNTESIS DE RESULTADOS PARA LA BANDEJAS REJA ORIFICIO

Para la medición de las presiones, se ubican los piezómetros según el detalle siguiente:

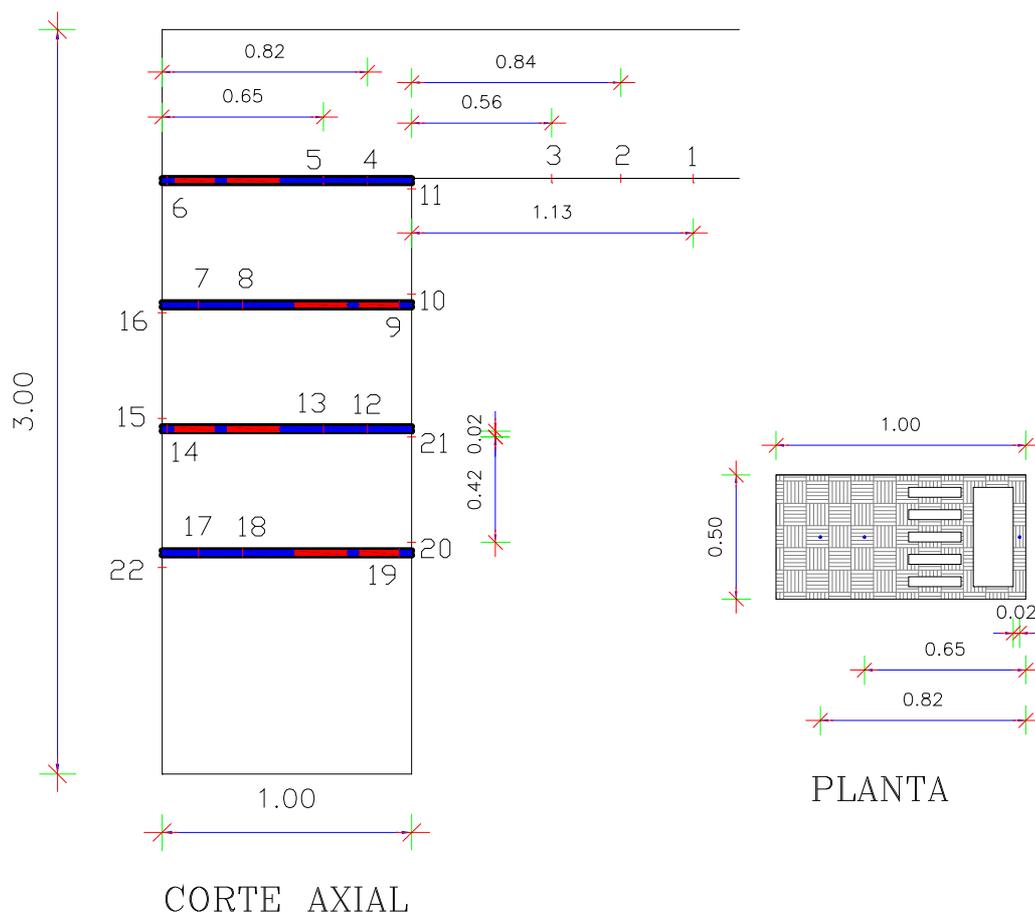


Gráfico No. 4.5: Esquema de ubicación de piezómetros en el modelo pozo de bandejas reja orificio.

- La bitácora del Plan de Pruebas es la siguiente:

PRUEBA # CAUDAL REFERENCIAL MODELO (L/S) =

FECHA:
HORA:

NOMBRE:

hvertedero encerado (cm)=

pasos	Medida	Piezómetro	Cinta (Ref)	Unidad	Observaciones
1	h1v=			cm	carga sobre el vertedero
2	Y1=			cm	calado en el canal
3	Y2=			cm	calado en el canal
4	Y3=			cm	calado en el canal
MEDICION EN LAS BANDEJAS					
BANDEJA # 1					
5	Y4=			cm	Niveles en la bandeja (atrás)
6	Y5=			cm	Niveles en la bandeja (medio)
7	Y6=			cm	Niveles en la bandeja (delante)
BANDEJA # 2					
8	Y7=			cm	Niveles en la bandeja (atrás)
9	Y8=			cm	Niveles en la bandeja (medio)
10	Y9=			cm	Niveles en la bandeja (delante)
11	Y10=			cm	Niveles en pared frontal (abajo)
12	Y11=			cm	Niveles en pared frontal (arriba)
BANDEJA # 3					
13	Y12=			cm	Niveles en la bandeja (atrás)
14	Y13=			cm	Niveles en la bandeja (medio)
15	Y14=			cm	Niveles en la bandeja (delante)
16	Y15=			cm	Niveles en pared frontal (abajo)
17	Y16=			cm	Niveles en pared frontal (arriba)
BANDEJA # 4					
18	Y17=			cm	Niveles en la bandeja (atrás)
19	Y18=			cm	Niveles en la bandeja (medio)
20	Y19=			cm	Niveles en la bandeja (delante)
21	Y20=			cm	Niveles en pared frontal (abajo)
22	Y21=			cm	Niveles en pared frontal (arriba)
23	Y22=			cm	Nivel medio en la descarga
24	h2v=			cm	carga sobre el vertedero
25	h media vertedero			cm	promedio de h1v y h2v
26	Δh vertedero=			cm	diferencia de h_{media} y $h_{\text{encerado de vert.}}$
27	Caudal =			l/s	caudal medido en modelo
DESCRIPCION					
28					

- Los cálculos se realizan según la hoja siguiente:

Simbología:

Descripción	Símbolo	Unidades
Ancho del Pozo	B	cm
Altura entre Bandejas	W	cm
No. de Bandejas (incluido la continuación del canal)	N	-
Caudal de Prueba	Q	l/s
Calado Crítico Canal + Bandeja No. 1	y_{c1}	cm
Calado Aireado (mezcla)	y_m	cm
Contracción de la Mezcla	C_m	-
Energía Total	E_T	m
Calado de aguas claras	y_a	m
Velocidad de aguas claras	V_a	m/s
Velocidad de la mezcla	V_m	m/s
Energía específica de la mezcla	E_e	m
Pérdida parcial	Δh	m
Energía Residual	E_r	m
Eficiencia Parcial	E	%

Expresiones de Cálculo:

Símbolo	Expresión de Cálculo	Observaciones
B		Datos de diseño que dependen de las características de cada proyecto
W		
N		
Q		
y_m		
C_m		Valores asumidos
q	$q = \frac{Q}{B}$	
y_{c1}	$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$	
E_T	$E_T = 1.5 \cdot y_c$	
y_m/y_a	$\frac{y_m}{y_a} = \frac{1}{1 - C_m}$	
y_a	$y_a = \frac{1}{y_m/y_a} \cdot y_c$	
V_a	$V_a = \frac{q}{y_a}$	
V_m	$V_m = V_a$	
E_e	$E_e = \frac{y_{c1}}{100} + \frac{V_m^2}{2g}$	

Símbolo	Expresión de Cálculo	Observaciones
Δh	$\Delta h = E_T - E_e$	
E_r	$E_{r1} = 0.00$ $E_r = E_T - \Delta h$	E_{r1} es la energía residual en la bandeja 1
E	$E = \frac{\Delta h}{E_T}$	

Tabla de Datos:

B = 50,0 cm

W = 50,0 cm

N = 4

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
Q	C_m								
y_{c1}		y_{c1}		y_{c1}		y_{c1}		y_{c1}	
13,1	0,00	45,0	0,00	63,4	0,00	79,5	0,00	84,4	0,00
4,1		9,4		11,8		13,7		14,3	

Bandeja No.	y_m	C_m								
2	3,5	0,60	10,0	0,60	15,5	0,60	17,0	0,60	20,0	0,60
3	4,0	0,61	10,0	0,61	13,5	0,61	14,0	0,61	18,0	0,61
4	4,0	0,62	15,0	0,62	13,0	0,62	11,0	0,62	18,0	0,62

	Valores medidos durante las pruebas
	Valores calculados
	Valores de concentraciones asumidas a partir de referencias teóricas

Tabla De Cálculos:

	Energía Total (m)	Relación y_m / y_a	Calado Aguas Claras (m)	Velocidad Aguas Claras Va (m/s)	Velocidad de la Mezcla Vm (m/s)	Energía Específica Mezcla (m)	Pérdida Parcial (m)	Energía Residual (m)	Eficiencia Parcial (%)	
Q (ft/seg)	13.1									
Canal + Bandeja No. 1	0.062	1.00	0.041	0.64	0.64	0.062	0.000	0.00	0.0%	
Bandeja No. 2	0.562	2.50	0.014	1.87	1.92	0.224	0.338	0.22	60.2%	
Bandeja No. 3	0.724	2.56	0.016	1.68	1.72	0.191	0.533	0.19	73.6%	
Bandeja No. 4	0.691	2.63	0.015	1.72	1.76	0.197	0.493	0.20	71.4%	
Q (ft/seg)	45.0									
Canal + Bandeja No. 1	0.141	1.00	0.094	0.96	0.96	0.141	0.000	0.00	0.0%	
Bandeja No. 2	0.641	2.50	0.040	2.25	2.31	0.373	0.268	0.37	41.8%	
Bandeja No. 3	0.873	2.56	0.039	2.31	2.36	0.384	0.488	0.38	55.9%	
Bandeja No. 4	0.884	2.63	0.057	1.58	1.61	0.282	0.602	0.28	68.1%	
Q (ft/seg)	63.4									
Canal + Bandeja No. 1	0.177	1.00	0.118	1.08	1.08	0.177	0.000	0.00	0.0%	
Bandeja No. 2	0.677	2.50	0.062	2.05	2.10	0.380	0.297	0.38	43.8%	
Bandeja No. 3	0.880	2.56	0.053	2.41	2.47	0.445	0.435	0.44	49.5%	
Bandeja No. 4	0.945	2.63	0.049	2.57	2.62	0.479	0.466	0.48	49.3%	
Q (ft/seg)	79.5									
Canal + Bandeja No. 1	0.206	1.00	0.137	1.16	1.16	0.206	0.000	0.00	0.0%	
Bandeja No. 2	0.706	2.50	0.068	2.34	2.40	0.464	0.241	0.46	34.2%	
Bandeja No. 3	0.964	2.56	0.055	2.91	2.98	0.593	0.371	0.59	38.5%	
Bandeja No. 4	1.093	2.63	0.042	3.80	3.88	0.877	0.216	0.88	19.8%	
Q (ft/seg)	84.4									
Canal + Bandeja No. 1	0.214	1.00	0.143	1.18	1.18	0.214	0.000	0.00	0.0%	
Bandeja No. 2	0.714	2.50	0.080	2.11	2.17	0.440	0.274	0.44	38.4%	
Bandeja No. 3	0.940	2.56	0.070	2.40	2.46	0.489	0.451	0.49	48.0%	
Bandeja No. 4	0.989	2.63	0.068	2.47	2.52	0.503	0.486	0.50	49.2%	

Tabla de Resumen:

Caudal (lt/seg)	$Q/Q_{\text{máx}}$	Energía Total (m)	Pérdida Total (m)	Eficiencia (%)
13,1	0,14	1,562	1,36	87,4%
45,0	0,36	1,641	1,36	82,8%
63,4	0,62	1,677	1,20	71,4%
79,5	0,86	1,706	0,83	48,6%
84,4	1,00	1,714	1,21	70,7%

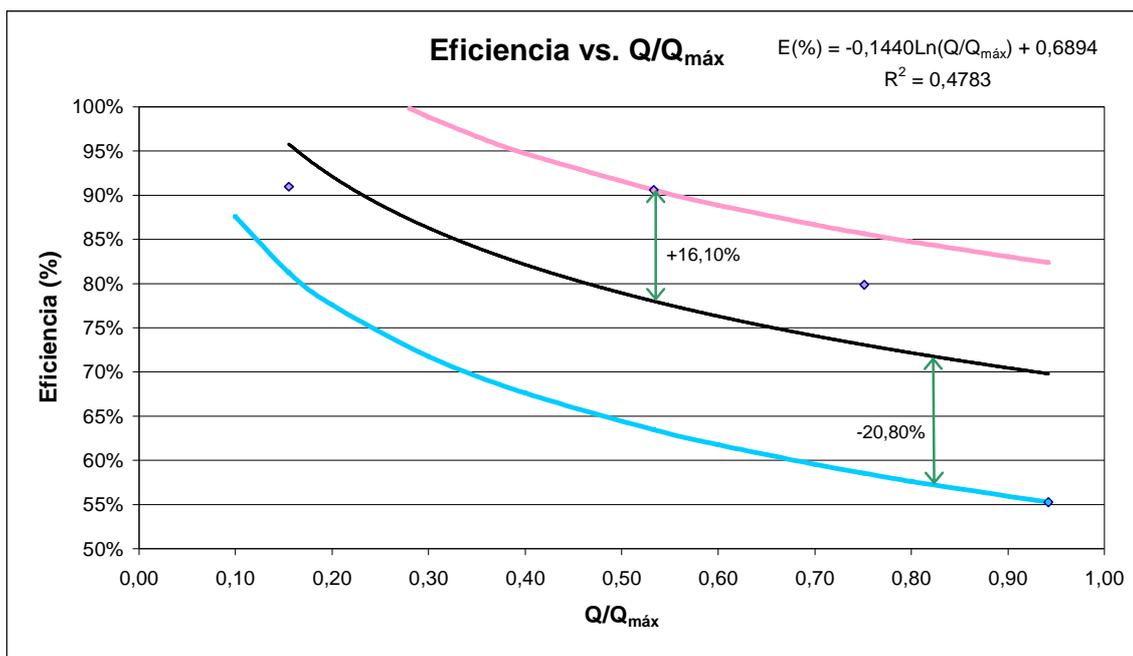


Gráfico No. 4.6: Curva de tendencia de $Q/Q_{\text{máx}}$ en función de la eficiencia de la estructura.

4.4.2 SÍNTESIS DE RESULTADOS PARA EL POZO DE BANDEJAS INCLINADAS (5%) CON REJA

La ubicación de los piezómetros y el plan de pruebas es similar al presentado en el punto anterior para el pozo de bandejas reja – orificio así como la simbología y las expresiones utilizadas en los cálculos.

Tabla de Datos:

B = 50 cm

W = 50 cm

N = 4

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
Q	C_m								
10,2	0,00	27,5	0,00	46,6	0,00	65,3	0,00	75,5	0,00
3,5		6,8		9,6		12,0		13,2	

Bandeja No.	y_m	C_m								
2	3,0	0,20	5,0	0,20	10,8	0,25	19,8	0,30	22,4	0,35
3	4,0	0,30	7,0	0,40	14,3	0,45	24,0	0,50	35,0	0,55
4	4,0	0,30	7,0	0,40	14,2	0,45	24,0	0,50	32,0	0,55

	Datos de la estructura y caudales
	Datos del colchón de aguas en contrapendiente
	Valores calculados
	Valores de concentraciones asumidas a partir de referencias teóricas

Tabla De Cálculos:

	Energía Total (m)	Relación Y_m / Y_a	Calado Mezcla Y_m (m)	Calado Aguas Claras Y_a (m)	Velocidad Aguas Claras V_a (m/s)	Velocidad de la Mezcla V_m (m/s)	Energía Especifica Mezcla (m)	Pérdida Parcial (m)	Energía Residual (m)	Eficiencia Parcial (%)
Q (ft/seg)	10.2									
Canal + Bandeja No. 1	0.052	1.00	0.035	0.035	0.58	0.58	0.052	0.000	0.00	0.0%
Bandeja No. 2	0.552	1.25	0.030	0.024	0.85	0.97	0.078	0.474	0.08	85.8%
Bandeja No. 3	0.578	1.43	0.040	0.028	0.73	0.82	0.074	0.504	0.07	87.2%
Bandeja No. 4	0.574	1.43	0.040	0.028	0.73	0.82	0.074	0.500	0.07	87.1%
Q (ft/seg)	27.5									
Canal + Bandeja No. 1	0.101	1.00	0.068	0.068	0.81	0.81	0.101	0.000	0.00	0.0%
Bandeja No. 2	0.601	1.25	0.050	0.040	1.38	1.58	0.177	0.425	0.18	70.6%
Bandeja No. 3	0.677	1.67	0.070	0.042	1.31	1.44	0.175	0.502	0.17	74.1%
Bandeja No. 4	0.675	1.67	0.070	0.042	1.31	1.44	0.175	0.500	0.17	74.1%
Q (ft/seg)	46.6									
Canal + Bandeja No. 1	0.144	1.00	0.096	0.096	0.97	0.97	0.144	0.000	0.00	0.0%
Bandeja No. 2	0.644	1.33	0.108	0.081	1.15	1.31	0.195	0.449	0.19	69.7%
Bandeja No. 3	0.695	1.82	0.143	0.079	1.18	1.28	0.227	0.468	0.23	67.4%
Bandeja No. 4	0.727	1.82	0.142	0.078	1.19	1.29	0.227	0.500	0.23	68.8%
Q (ft/seg)	65.3									
Canal + Bandeja No. 1	0.180	1.00	0.120	0.120	1.09	1.09	0.180	0.000	0.00	0.0%
Bandeja No. 2	0.680	1.43	0.198	0.139	0.94	1.06	0.255	0.425	0.26	62.5%
Bandeja No. 3	0.755	2.00	0.240	0.120	1.09	1.16	0.308	0.447	0.31	59.1%
Bandeja No. 4	0.808	2.00	0.240	0.120	1.09	1.16	0.308	0.500	0.31	61.8%
Q (ft/seg)	75.5									
Canal + Bandeja No. 1	0.199	1.00	0.132	0.132	1.14	1.14	0.199	0.000	0.00	0.0%
Bandeja No. 2	0.699	1.54	0.224	0.146	1.04	1.15	0.292	0.407	0.29	58.3%
Bandeja No. 3	0.792	2.22	0.350	0.158	0.96	1.00	0.401	0.390	0.40	49.3%
Bandeja No. 4	0.901	2.22	0.320	0.144	1.05	1.10	0.381	0.520	0.38	57.7%

Tabla de Resumen:

Caudal (ft/seg)	Q/Q _{max}	Energía Total (m)	Pérdida Total (m)	Eficiencia (%)
10,2	0,14	1,552	1,48	95,2%
27,5	0,36	1,601	1,43	89,1%
46,6	0,62	1,644	1,42	86,2%
65,3	0,86	1,680	1,37	81,6%
75,5	1,00	1,699	1,32	77,5%

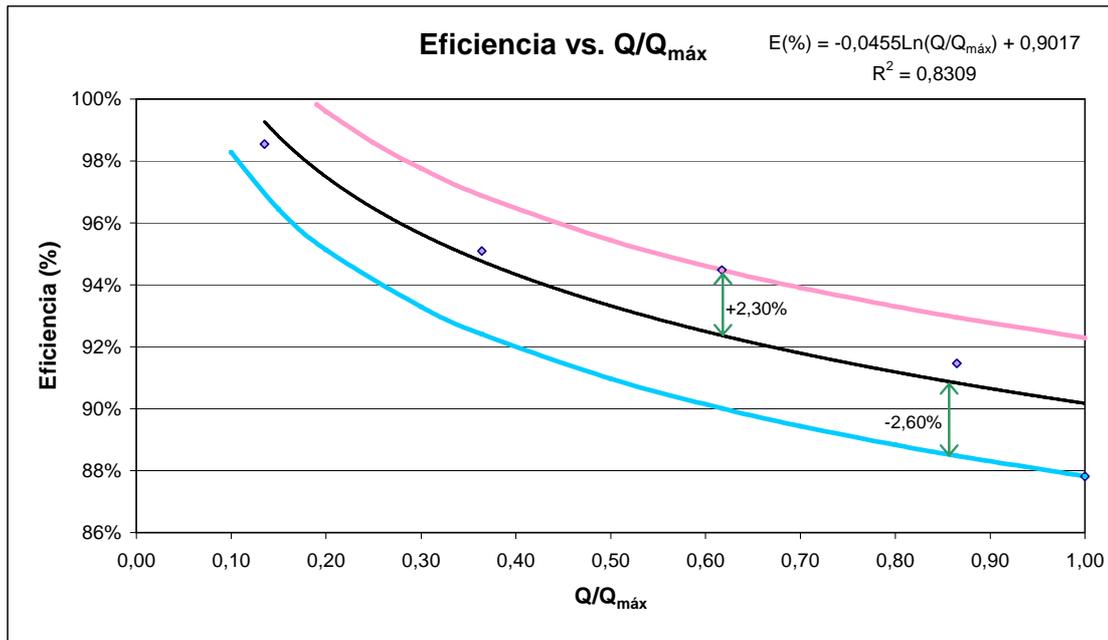


Gráfico No. 4.7: Curva de tendencia de $Q/Q_{máx}$ en función de la eficiencia de la estructura.

4.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.5.1 POZO DE BANDEJAS REJA - ORIFICIO

- ◆ El orificio en la bandeja deja un área libre para el paso de un caudal relativamente grande. La reja no ejerce control en el flujo ya que trabaja como un deflector que no favorece la conformación de un colchón de aguas ni siquiera para los caudales más bajos.
- ◆ Las altas velocidades con las que circula el flujo sobre las bandejas no permiten el adecuado funcionamiento de la reja.
- ◆ Los chorros que descarga la reja tienen una componente de velocidad horizontal alto por lo que se requiere una mayor longitud de reja. De este modo se impone un control adecuado en el flujo y este no descarga totalmente en el orificio.

- ◆ Por la alta velocidad con la que el flujo descarga por el orificio genera que el agua impacte directamente sobre las paredes verticales del interior de la estructura. Exponiéndolas a un continuo desgaste por abrasión.
- ◆ La velocidad del flujo se incrementa con su descenso indicando que el nivel de disipación es mínimo y se produce a costo de la estructura (desgaste).
- ◆ Los procesos de choque de los chorros de alta velocidad favorecen los procesos de introducción de aire que son mayores con el descenso del flujo transformándose en una mezcla agua – aire. En estas condiciones, no es posible aplicar el análisis característico de la hidráulica básica dado que el flujo que circula es pulsatorio e induce vibración en la estructura.
- ◆ A pesar de que el flujo de agua circula por la reja para caudales bajos, ésta no ejerce control en el flujo puesto que descarga directamente sobre las bandejas inferiores pueden producir desgaste en la estructura.
- ◆ En el Gráfico No. 4.7 se observa que el porcentaje de eficiencia de disipación de energía para los caudales permanentes de operación de la estructura están en el rango del 50% al 70%.
- ◆ La capacidad de descarga de la estructura es menor que el caudal de diseño previsto debido a la presencia de introducción de aire, deflexión de chorros y falta de ventilación, se generan presiones negativas sobre las paredes interiores de las bandejas. Este tipo de configuración de las bandejas no es recomendable para su uso en la práctica profesional.

4.5.2 POZO DE BANDEJAS CON REJA E INCLINACIÓN DEL 5%

- ◆ El ángulo de inclinación en contrapendiente de la bandeja favorece la formación de un colchón de aguas para la serie de caudales de operación. Se evita el impacto directo de los chorros de agua sobre las losas o bandejas.

- ◆ La inclinación de la bandeja influye en la aireación dentro de la estructura mejorando las condiciones de estabilidad de flujo. Para caudales altos se observa una deficiencia pequeña en la ventilación de la estructura.
- ◆ El impacto e introducción de los chorros en el colchón de agua facilita la generación de procesos turbulentos que mejoran la disipación de energía.
- ◆ En el Gráfico No. 4.7 se observa que el porcentaje de eficiencia de esta estructura para los caudales de operación permanentes se encuentra entre el 80% y 95%, superando el rango de eficiencia de la estructura pozo de bandejas reja – orificio.
- ◆ Se recomienda incluir en el diseño de la estructura una cámara de disipación de energía residual al pie del pozo de bandejas para garantizar la entrega de flujo en condiciones adecuadas hacia el colector de salida o curso receptor ya que actualmente el diseño contempla a la estructura de disipación hasta la penúltima bandeja.

4.5.3 OTRAS INVESTIGACIONES

Paralelamente al trabajo realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la EPN se efectuó una investigación en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Central del Ecuador contemplando otra variante para el pozo de bandejas. La variante consiste en la ubicación de cuerpos de impacto o dientes en la sección aguas abajo y aguas arriba de la reja, alternadamente, manteniendo la geometría de bandeja reja – orificio.

De los resultados experimentales se concluye:

- ◆ Los cuerpos de impacto actúan como deflectores provocando un desprendimiento del flujo aguas abajo de los dientes; dificultando la descarga a través de la reja.



Fotografía No. 4.10: Desprendimiento del flujo en los cuerpos de impacto.

- ◆ En las bandejas intermedias se observa gran introducción de aire y presencia de caudales pulsatorios. Por otro lado, la configuración de las bandejas no favorece la formación del colchón de aguas para recibir el flujo.
- ◆ El funcionamiento de la estructura no es aceptable. En el interior de la estructura se generan una serie de chorros aleatorios con introducción de aire, deficiente capacidad de descarga en las rejillas puesto que se encuentran obstruidas por los cuerpos de impacto.
- ◆ La ubicación y el tamaño requerido de los cuerpos de impacto, no mejoran el funcionamiento de la estructura. Esta variante tiene menor eficiencia que aquella descrita en el numeral anterior.

CAPÍTULO 5

MANUAL BÁSICO PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS

5.1 BASES PARA LA UBICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

El diseño de estructuras especiales de disipación de energía, en un sistema de alcantarillado, debe realizarse para resolver básicamente tres escenarios:

- Superar desniveles mayores a los 2.00 m
- Realizar cambios de dirección bruscos en zonas con limitaciones de espacio (falta de disponibilidad de área para desarrollar las curvaturas suaves que se recomiendan para controlar las condiciones del flujo).
- Realizar cambios simultáneos de nivel y dirección.

En las ciudades andinas, por sus características geográficas, topográficas y geológicas, se presentan con frecuencia estas condiciones de diseño en los sistemas de alcantarillado. Sin embargo para decidir el tipo de estructura que conviene implementar es necesario conocer adicionalmente las condiciones de aproximación del flujo en los colectores y las limitaciones de uso de la estructura.

5.2 MANUAL DE DISEÑO HIDRÁULICO DEL DESCARGADOR A VÓRTICE

En forma general, un descargador a vórtice es una estructura que recibe el flujo desde un canal de aproximación (entrada) con condiciones específicas de comportamiento; el flujo continúa por una cámara de entrada (caracol) y desciende en movimiento helicoidal por un pozo o tubo vertical hasta llegar a la cámara de disipación y de ahí a un colector de entrega hacia la salida del sistema.

5.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

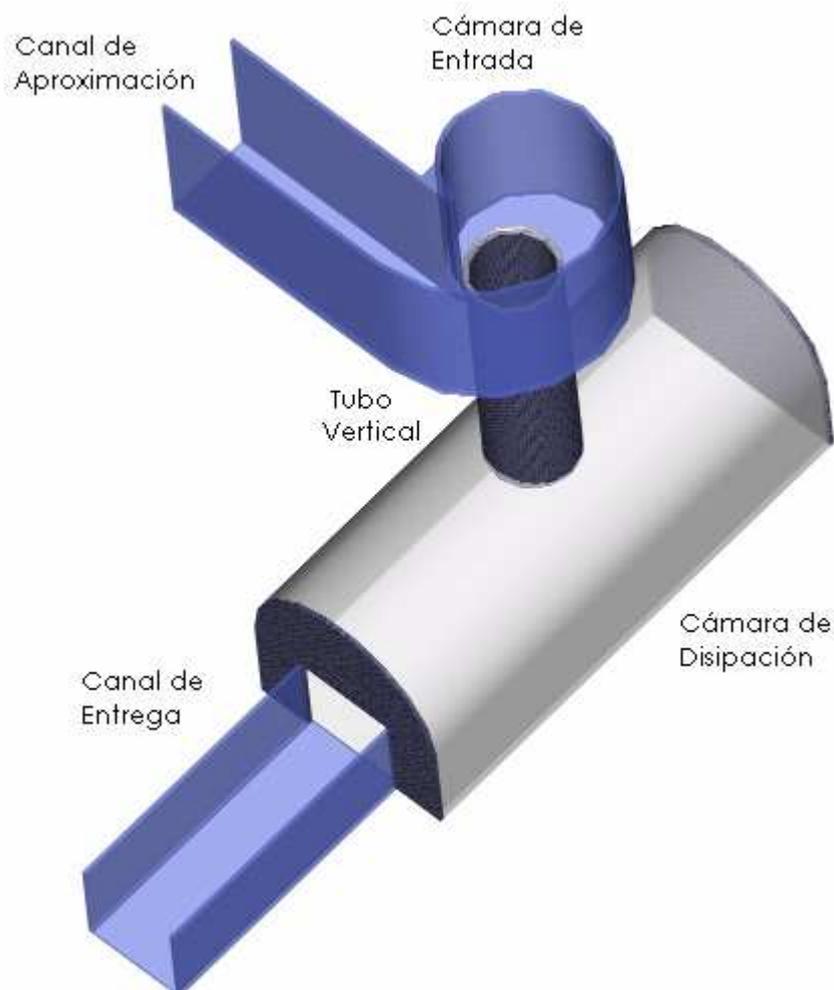


Gráfico No. 5.1: Elementos constitutivos del Descargador a Vórtice.

5.2.1.1 Canal de Aproximación

El tipo de flujo que circula por el canal de aproximación determina las características hidrodinámicas y geométricas del descargador a vórtice. La estabilidad del flujo en el canal se garantiza con las siguientes recomendaciones:

En el caso de **flujo subcrítico**, se requiere que el Fr sea menor que 0.75. Las características hidrodinámicas en el canal de aproximación serán controladas por la descarga en el tubo vertical, desde aguas abajo.

En el caso de **flujo supercrítico** se presenta una fuerte pendiente en el canal lo que permite alcanzar rápidamente altas velocidades produciendo una mezcla agua - aire cuyas características de flujo se diferencian notablemente de aquella en flujo subcrítico.

Para canales de entrada con flujo supercrítico se requiere de un Fr mayor que 1.30. En este caso es importante analizar la posibilidad de que las altas velocidades en el canal de aproximación den lugar a perturbaciones (sobreelevaciones) en la superficie libre del agua que pueden ser transportadas aguas abajo con la consecuente afectación al proceso de disipación de energía.

5.2.1.2 Cámara de Entrada

Para la serie de caudales (bajos, medios y altos) en **régimen subcrítico**, se produce una sobreelevación del flujo en la pared externa desde la base de la cámara, y cuya altura es menor mientras menor es el caudal de circulación.

La sobreelevación que se produce en el flujo se debe principalmente al efecto de la fuerza centrífuga ya que en esta estructura se genera el flujo helicoidal totalmente definido, observándose además la presencia de un núcleo de aire que garantiza el buen funcionamiento de la estructura.

Para caudales en **régimen supercrítico**, el cambio de pendiente en la cámara acelera el flujo principal por lo que se genera una considerable sobreelevación del nivel de superficie libre y la pérdida de contacto de la lámina con la pared interior de la margen izquierda.

El contorno de la cámara de entrada para flujo supercrítico no es límite para la masa de agua por lo que su configuración se diseña en forma de un tobogán con paredes altas que permiten controlar la sobreelevación del nivel de agua.

5.2.1.3 Tubo Vertical o Pozo

La formación del núcleo de aire perfectamente definida es una característica importante que se observa en el descargador a vórtice con **flujo subcrítico**. Los valores medidos de los diámetros del núcleo de aire para la serie de caudales de operación, permiten definir que a caudales altos, el diámetro relativo del núcleo de aire es menor.

La formación de flujo helicoidal bien definido que se presenta a lo largo del tubo vertical es el comportamiento fundamental de este elemento; aún en pruebas con caudales bajos, garantizando la disipación de energía.

El comportamiento del flujo en el tubo vertical para **régimen supercrítico** es similar al descrito anteriormente para régimen subcrítico ya que la cámara del vórtice supercrítico entrega un flujo con movimiento helicoidal con similares características a las del vórtice subcrítico.

5.2.1.4 Cámara de Disipación

El flujo en la cámara de disipación presenta características hidrodinámicas definidas para la serie de caudales considerados. En caso de caudales altos, se observa una mezcla violenta que provoca una gran macroturbulencia con considerable introducción de aire; mientras que para caudales bajos y medios, el control que se coloca al final de la cámara permite la formación de un colchón de aguas que permite la disipación de la energía residual.

Los principales objetivos que son satisfechos en esta cámara al pie del tubo vertical son los siguientes:

- Garantizar la estabilidad del flujo helicoidal de caída proporcionando la ventilación suficiente del núcleo de aire en el tubo vertical.

- Disipar la energía residual al pie del tubo vertical (generalmente se coloca un estrechamiento a la salida de la cámara de disipación para asegurar la formación de un colchón de aguas).
- Permitir que el flujo de ingreso al canal de entrega al pie de la estructura, sea homogéneo y estable.
- Permitir el cambio de dirección entre los canales de llegada y de salida del descargador a vórtice.
- Ofrecer la posibilidad de inspección de la estructura de cambio de nivel.

5.2.1.5 Canal de Entrega

El canal de entrega puede tener cualquier forma regular en su sección transversal. La transición entre la pared de aguas abajo de la cámara y el canal debe garantizar un flujo controlado.

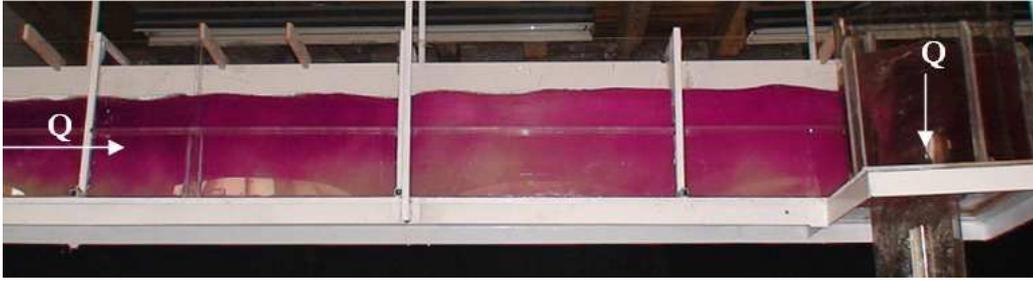
De igual modo, se debe garantizar en el canal de entrega, que para todos los caudales, el flujo no presente caudal pulsatorio de la mezcla de agua y aire; permitiendo entregar al colector un flujo tranquilo y seguro para la conducción.

5.2.2 DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO

5.2.2.1 Canal de Aproximación

El canal de entrada debe tener una sección rectangular para facilitar la transición adecuada al flujo helicoidal en la cámara de entrada. En determinados casos, el ancho del canal puede ser variable, con sección menor al final, para:

- Provocar una aceleración que permita condiciones aceptables al inicio del movimiento helicoidal.
- Que la lámina de agua, para caudales pequeños, se mantenga adherida a la pared interior del tubo vertical.



Fotografía No. 5.1: Flujo régimen subcrítico en el canal de aproximación.

5.2.2.2 Cámara de Entrada

a) Dimensionamiento geométrico para **régimen subcrítico**:

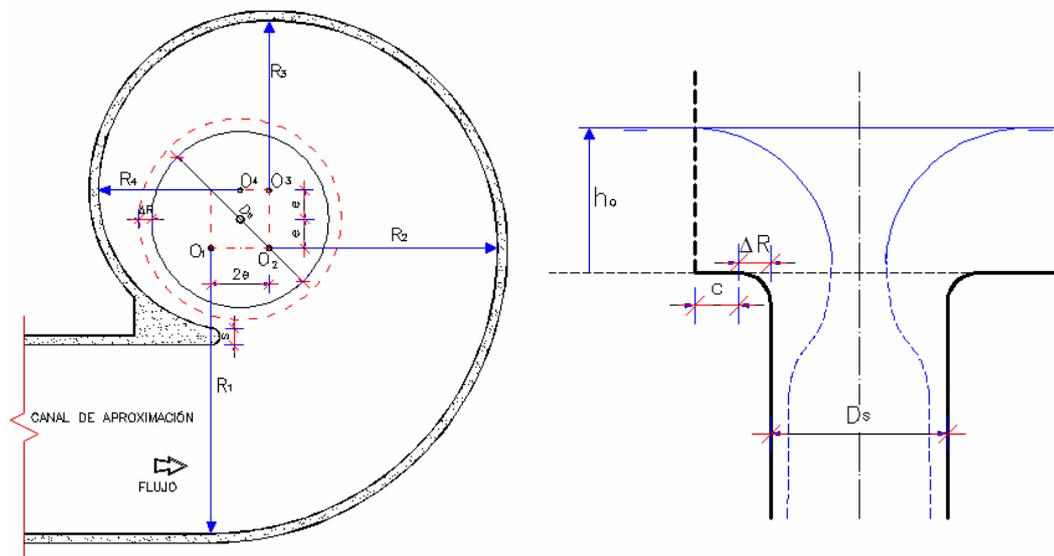


Gráfico No. 5.2: Geometría de la cámara de entrada para flujo subcrítico.

La magnitud base para la configuración de este tipo de cámara es el diámetro D_s del tubo vertical, cuya apertura controla las características del flujo de aproximación subcrítico.

Las dimensiones geométricas de la cámara se obtienen utilizando las expresiones:

$$a = 0.5D_s + \Delta R + c + s + 0.5b$$

$$R_4 = 0.5D_s + \Delta R + c + e$$

$$R_3 = R_4 + e$$

$$e = (b + s) / 7$$

$$R_2 = R_4 + 3e$$

$$R_1 = R_4 + 5e$$

Donde: b = ancho del colector de entrada
 D_s = diámetro del tubo vertical o pozo
 $\Delta R, s, c$ = dimensiones estructurales

Se debe satisfacer además: $1 \leq a / D_s \leq 1,25$



Fotografía No. 5.2: Vista superior de la cámara de entrada del DV para flujo subcrítico.

b) Dimensionamiento geométrico para régimen supercrítico:

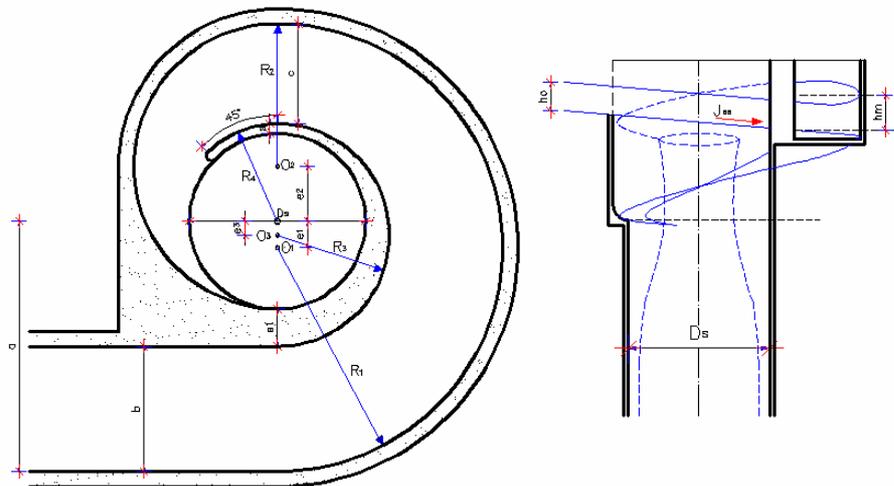


Gráfico No. 5.3: Geometría de la cámara de entrada para flujo supercrítico.

Las dimensiones geométricas de la cámara se obtienen utilizando las expresiones:

$$R4 = 0.5D_s + s$$

$$e1 = a - R1$$

$$R3 = (0.5D_s + s + a - b) / 2$$

$$e2 = 0.5D_s + s + c - R2$$

$$R2 = (D_s + s + c) / 2$$

$$e3 = a - b - R3$$

$$R1 = (0.5D_s + s + a + c) / 2$$

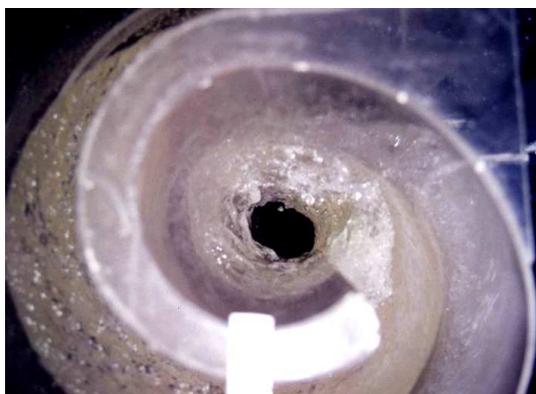
$$s1 = a - b - 0.5D_s$$

Se deben satisfacer adicionalmente: $(0.5D_s + s + c) \leq a \leq (1.5D_s + s)$

$$0.4D_s \leq b \leq D_s$$

$$0.4D_s \leq c \leq D_s.$$

El valor de la pendiente J_{se} es mayor que el de la J_{so} y varía entre el 5% al 30%; mientras que las magnitudes a , c , s , J_{se} son parámetros definidos por el cálculo estructural.



Fotografía No. 5.3: Vista superior de la cámara de entrada del DV para flujo supercrítico.

5.2.2.3 Tubo Vertical o Pozo

El diámetro del tubo vertical se calcula mediante la relación empírica:

$$D_s = \eta \cdot \left(\frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5}$$

Donde el factor η depende de la geometría de la cámara de entrada y varía entre 0,83 hasta 2. En el caso de los modelos ensayados en la EPN, se determinó que el valor de $\eta = 1,25$ es recomendable para los dos tipos de flujo de aproximación (23).

El valor Q_d representa el caudal de diseño, para el cual queda determinada toda la geometría de la estructura. La selección de este caudal obedece a los requerimientos de cada proyecto en particular. El valor de caudal máximo $Q_{m\acute{a}x}$

representa el gasto para el cual se cierra el núcleo de aire y se presenta caudal no permanente con graves fluctuaciones de presión interna.

En caso del flujo de **aproximación subcrítica**, $Q_{m\acute{a}x}$ se calcula con la expresión:

$$Q_{m\acute{a}x} = 4 \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{5g}{b}}$$

Para caudales inferiores al valor de $Q_{m\acute{a}x}$, es posible determinar la curva de descarga con respecto a la profundidad de flujo en el canal de entrada, mediante la relación:

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{\pi \cdot \sqrt{2y}}{\sqrt{\frac{1}{\mu^2} - \left(\frac{\pi \cdot D_s}{2 \cdot a \cdot y} \right)^2}}$$

Donde: $Q_o = \sqrt{\frac{g \cdot a}{b} \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^5}$ y $y = \frac{h}{h_o}$ siendo $h_o = \frac{a \cdot D_s}{2b}$

μ = coeficiente de contracción característico del tipo de cámara de entrada.

Por razones de estabilidad del flujo helicoidal de caída, se recomienda que el diámetro seleccionado para la construcción de la estructura esté siempre en el rango: $D_s \leq D_{efec} \leq 1.5D_s$.



Fotografía No. 5.4: Tubo vertical en el DV con aproximación subcrítica.

Para el caso del flujo de aproximación supercrítico, debe considerarse que el control desde la entrada al tubo vertical desaparece y que las condiciones hidrodinámicas dependen exclusivamente del radio de curvatura de las paredes de la cámara espiral. En este caso, aparece una onda permanente en la pared interior, ubicada en la sección α_M , que produce una elevación de la superficie libre igual a h_M , como se esquematiza en el Gráfico No. 5.4.

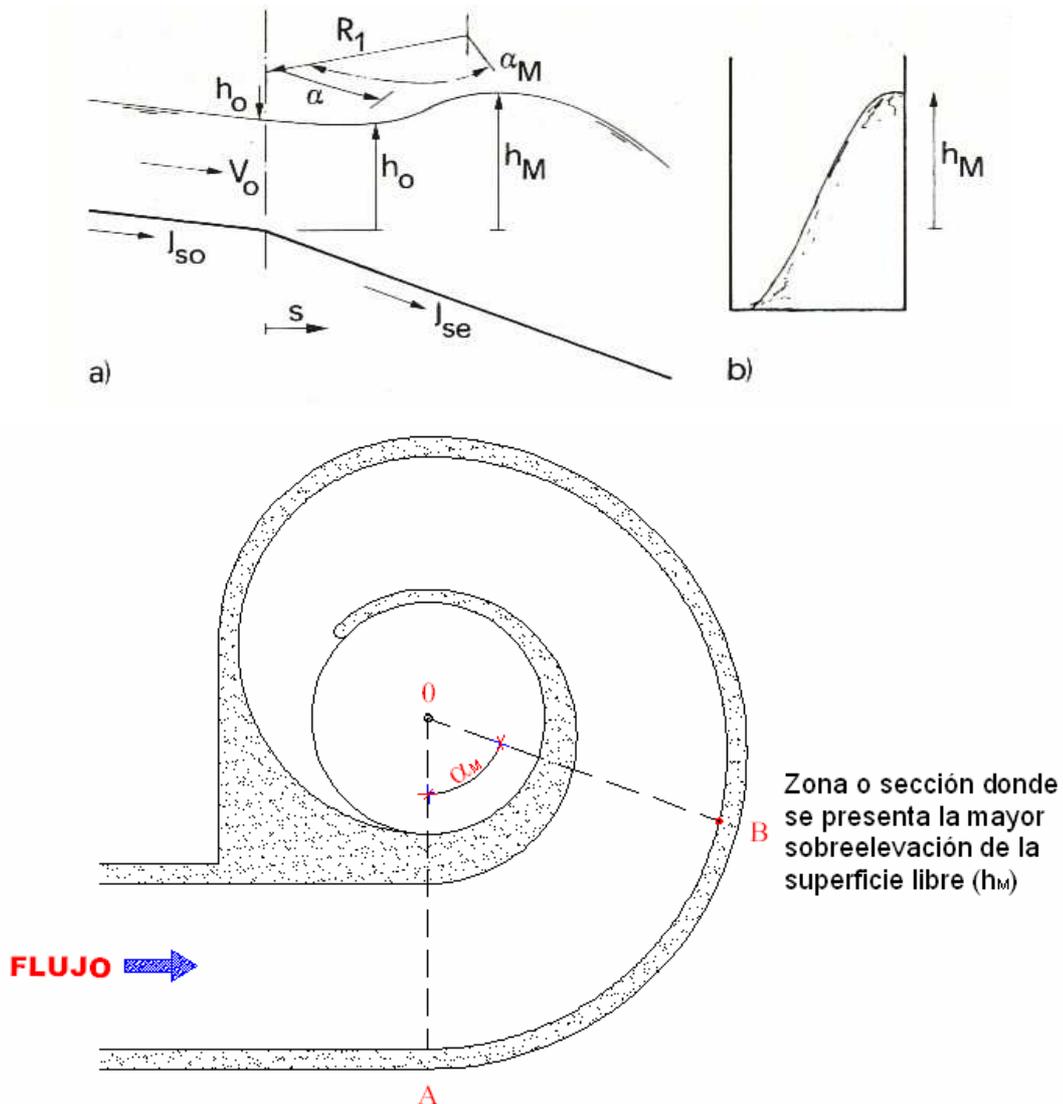


Gráfico No. 5.4: (a) Perfil longitudinal; (b) Sección transversal del flujo supercrítico en la cámara espiral; (c) Identificación en planta de α_M para el descargador a vórtice supercrítico.

El valor de la sobre elevación h_M se evalúa con la relación experimental:

$$\frac{h_M}{R_1} = (0.15 \cdot Fr_o + 1.10) \cdot \left(\frac{2bh_o^2 \cdot Fr_o}{R_1^3} - \frac{J_{so}}{2} \right)$$

La ubicación de la sobreelevación se determina por: $\frac{\alpha_M}{Fr_o} = 75 \cdot \sqrt{\frac{h_o}{R_1}}$



Fotografía No. 5.5: Tubo vertical en un descargador a vórtice con aproximación supercrítica.

Para evaluar el porcentaje de disipación de energía se calcula, en primer lugar, la velocidad V_{fin} que alcanza el flujo en la sección final del tubo vertical, bajo la estimación correcta del coeficiente λ de fricción o del coeficiente n de la ecuación de Manning, que consideren el movimiento helicoidal, estable, con cambio continuo de alineación y con introducción de aire.

$$V_{fin} = \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{3/5} \cdot \left(\frac{Q}{\pi \cdot D_s} \right)^{2/5} \right] \cdot \left[Tgh \left(6 \cdot \frac{L_s}{L_{s\ ext}} \right) \right]$$

El valor de L_s representa la longitud efectiva del tubo vertical. El valor de $L_{s\ ext}$ representa la longitud del tubo vertical, a partir de la cual se descuelga el flujo del contorno y desaparece el movimiento helicoidal del flujo principal.

$$L_{s\ ext} = \left(\frac{3}{g}\right) \cdot \left[\left(\frac{1}{n}\right)^{6/5} \cdot \left(\frac{Q}{P \cdot D_s}\right)^{4/5}\right]$$

Para completar el diseño del tubo vertical se debe considerar el caudal de aire Q_a requerido para garantizar una completa ventilación del flujo de agua en su caída vertical, mediante la siguiente relación:

$$Q_a = 0.04 \cdot \left(\frac{L_s}{D_s}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{V_{fin} \cdot \pi \cdot D_s^2}{4} - Q\right) \quad \text{para } Q \leq Q_{m\acute{a}x}$$

Si se expresa la relación $\beta = \frac{Q_a}{Q}$ en función del parámetro $q_s = \frac{Q \cdot n}{\pi \cdot D_s^{8/3}}$ se obtiene la curva señalada en el Gráfico No. 5.5 (válida para diseño), que permite la valoración de la eficiencia de una determinada longitud L_s de tubo vertical.

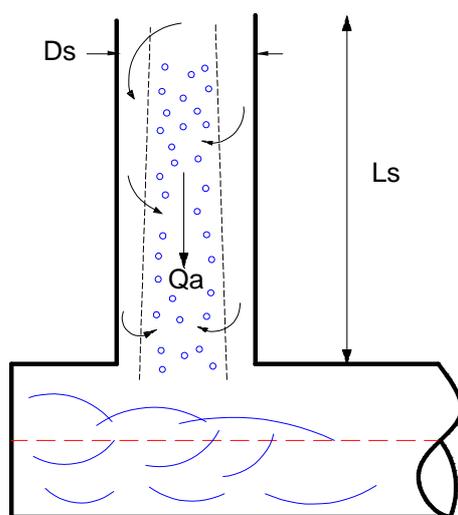


Gráfico No. 5.5: Notación de parámetros de cálculo

Para la consideración de Q_a se puede utilizar ábacos de diseño como el que se muestra en el Gráfico No. 5.6. Estos ábacos pueden generarse utilizando la expresión:

$$\beta = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{-q \cdot \left(1 + 66 \cdot \frac{D_s}{L_s}\right)^{1/2}}{\pi} \right]^{-1/2} - 1$$

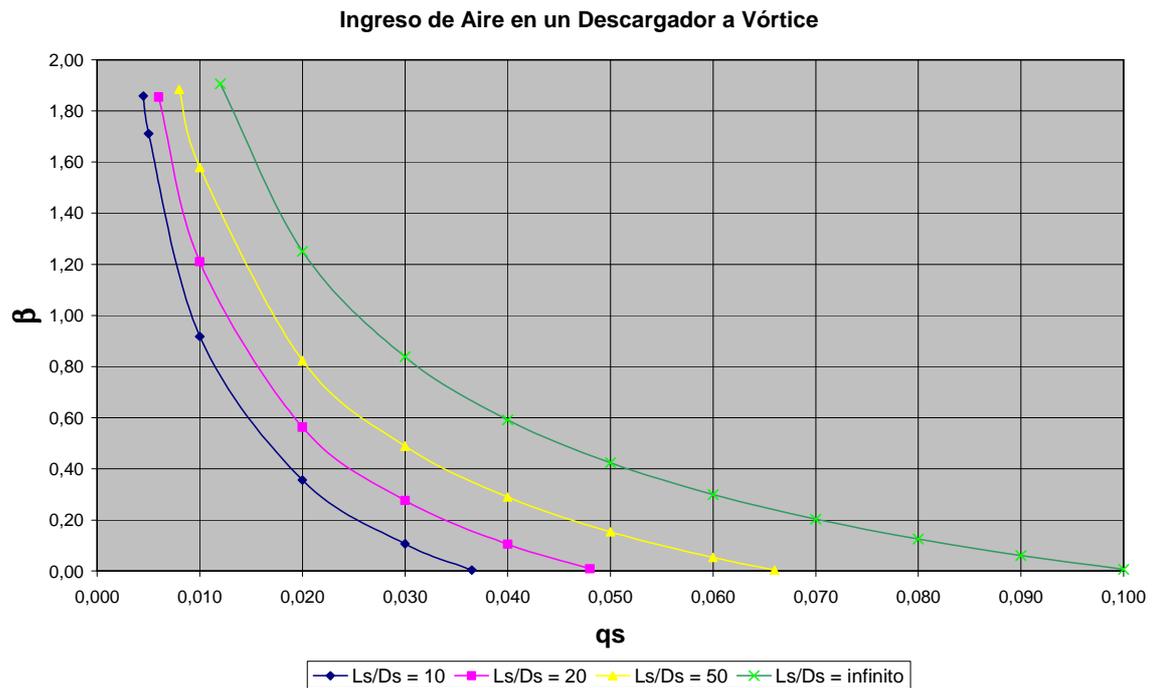
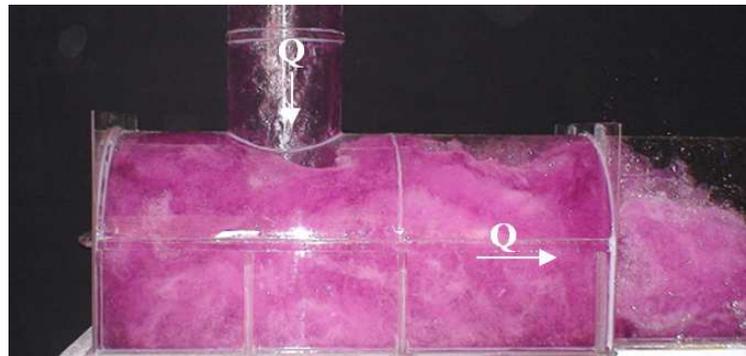


Gráfico No. 5.6: Variación del parámetro de ventilación $\beta = Q_a/Q$ en función de la longitud relativa del tubo vertical

5.2.2.4 Cámara de Disipación al pie



Fotografía No. 5.6: Cámara de disipación con el caudal de diseño.

La geometría básica de la cámara, esquematizada en el Gráfico No. 5.7, se basa en las siguientes expresiones:

$$4 \leq St/D_s < 6$$

$$2 \leq Bt/D_s < 3$$

$$2 \leq Tt/D_s < 3$$

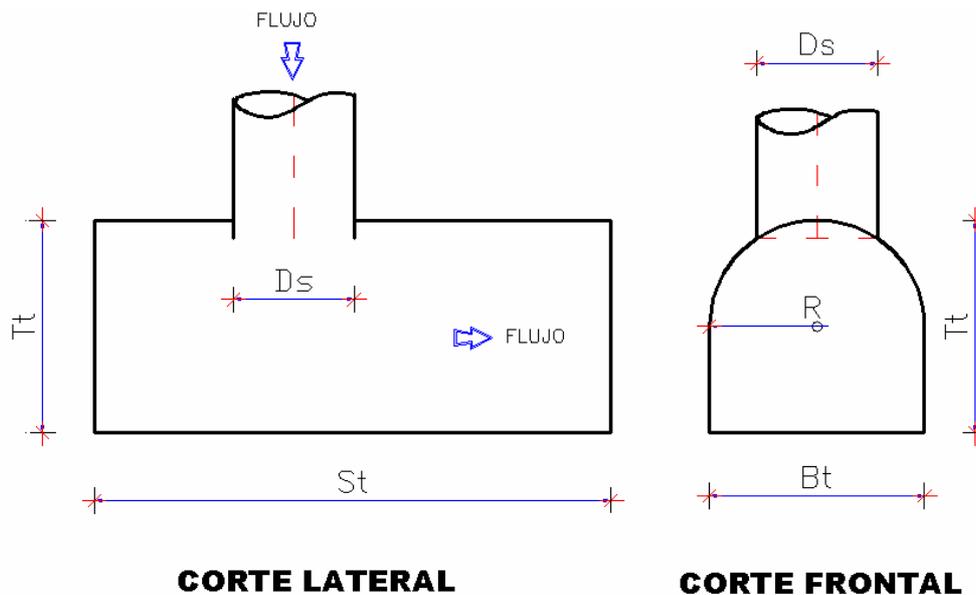


Gráfico No. 5.7: Esquema de la cámara al pie del tubo vertical.

En cada caso particular, es necesario identificar la presencia de estructuras complementarias que deben ser colocadas al interior de la cámara al pie que mejoran el grado de disipación de energía.

El dimensionamiento y ubicación de estas estructuras obedece a la condición final en el canal de entrega, respecto del grado de disipación de energía residual.

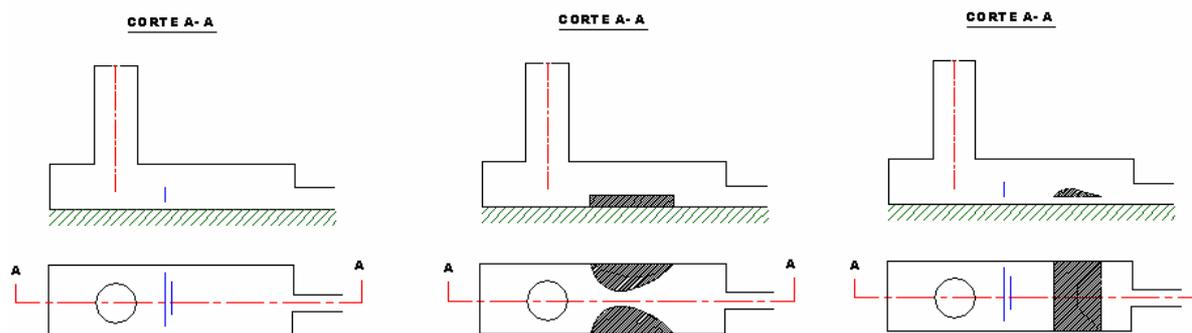


Gráfico No. 5.8: Estructuras complementarias.

El diseño geométrico obedece a los criterios señalados en los Manuales de Hidráulica Básica.

5.2.2.5 Canal de Entrega

El canal de entrega puede tener una forma regular de sección transversal, preferiblemente de base rectangular. En determinadas ocasiones se dispone de un estrechamiento en la sección final de la cámara y de tipo abocinada con ventilación suficiente para mejorar el flujo en el canal de entrega.



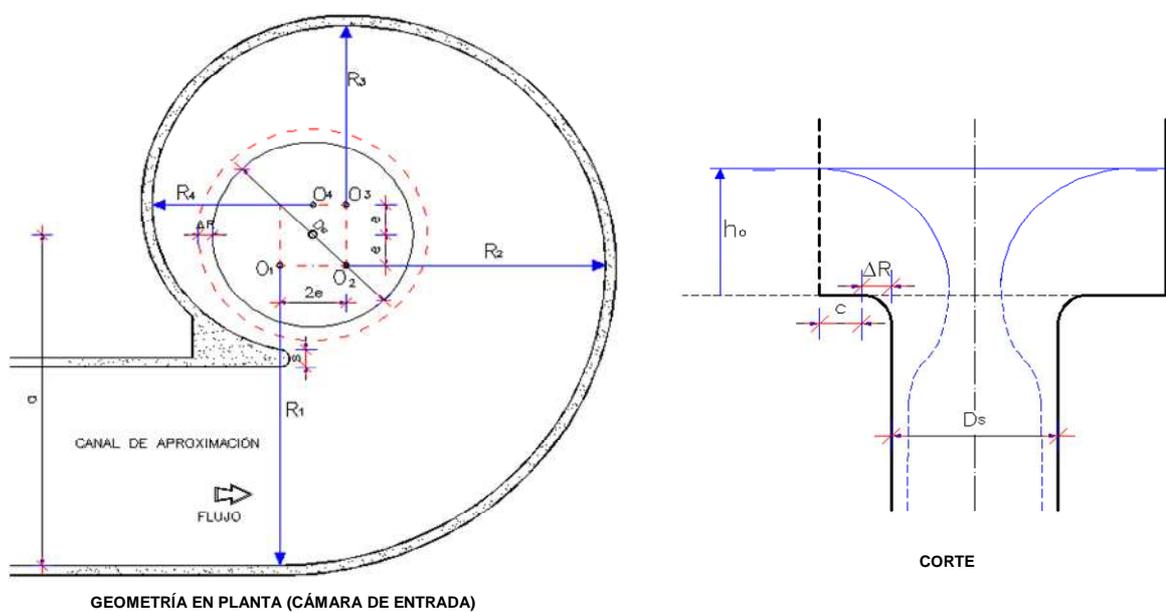
Fotografía No. 5.7: Canal de entrega.

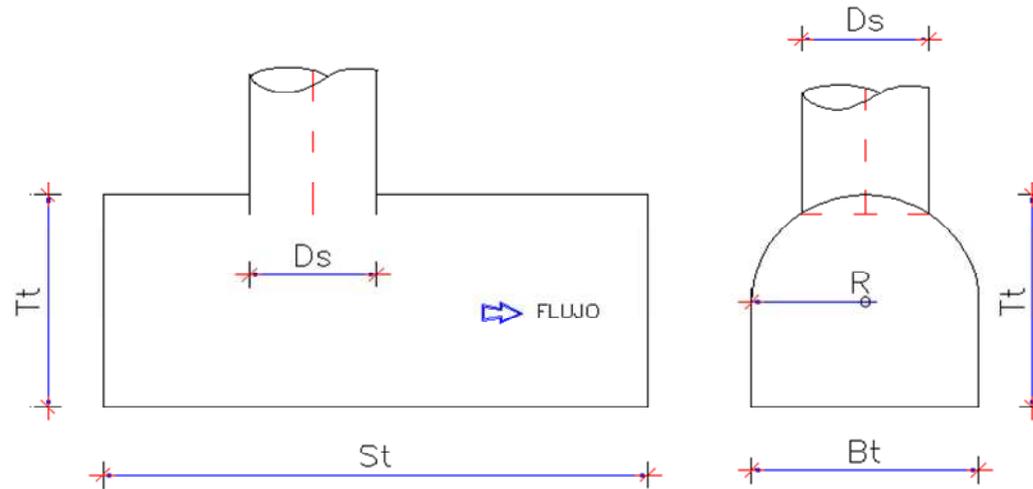
5.2.3 ELABORACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO

5.2.3.1 Descargador a Vórtice con Flujo Subcrítico

GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA

Geometría del Descargador a Vórtice:





GEOMETRÍA DE LA CÁMARA DE DISIPACIÓN

Datos de diseño:

Descripción	Símbolo	Unidad
Caudal de diseño	Q_d	m^3/s
Factor η	η	-
Ancho del canal de aproximación	b	m
Dimensiones constructivas	ΔR	m
	c	m
	s	m

Valores calculados:

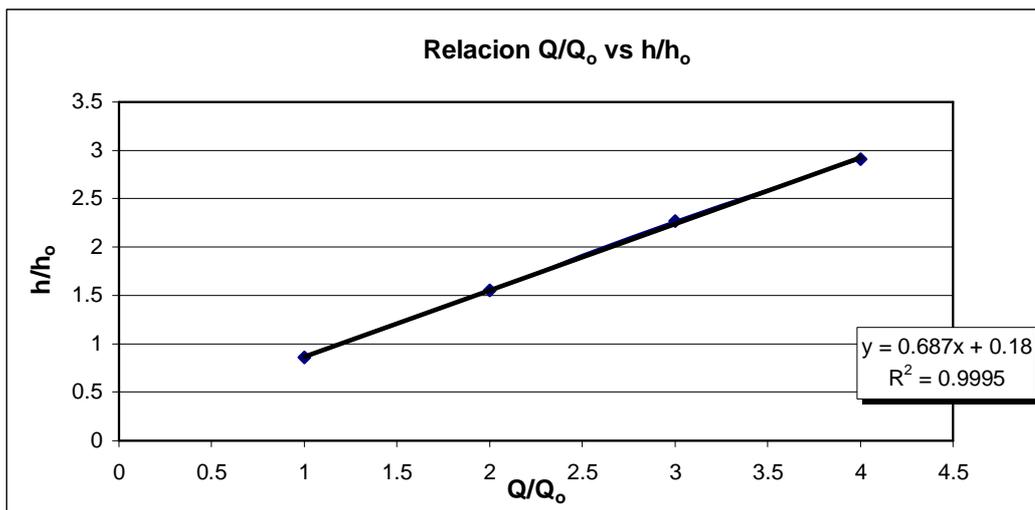
Descripción	Símbolo	Unidad
Caudal unitario	q	m^2/s
Diámetro del pozo	D_s	m
Cámara de entrada	a	m
	e	m
Radios de Curvatura	$R1$	m
	$R2$	m
	$R3$	m
	$R4$	m
Cámara de disipación	S_t	m
	B_t	m
	T_t	m
Caudal referencial	Q_o	m^3/s
Caudal máximo	$Q_{m\acute{a}x}$	m^3/s
Profundidad referencial	h_o	m
Profundidad de flujo en la cámara	h	m

EXPRESIONES DE CÁLCULO

	Símbolo	Expresión de Cálculo	Observaciones
Datos	Q_d		Datos de diseño que dependen de las características de cada proyecto
	b		
	η		
	ΔR		Dimensiones constructivas
	c		
	s		
	q	$q = \frac{Q_d}{b}$	
Tubo Vertical	D_s calculado	$D_s = \eta \cdot \left(\frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5}$	El valor obtenido con la expresión anterior es mínimo y puede ajustarse a dimensiones constructivas.
	D_s		
Cámara de Entrada	a	$a = 0.5 \cdot (D_s + b) + \Delta R + c + s$	La relación a/Ds depende de algunos parámetros que pueden revisarse como: b, ΔR, c, s y Ds.
	$1 \leq a/D_s \leq 1.25$	$= \text{si}(a/D_s < 1.00; \text{"Cambiar parámetros"}; \text{si}(a/D_s < 1.25; \text{"ok"}; \text{"Cambiar parámetros"}))$	
	e	$e = \frac{b + s}{7}$	
	$R4$	$R4 = 0.5 \cdot D_s + \Delta R + c + e$	
	$R3$	$R3 = R4 + e$	
	$R2$	$R2 = R4 + 3e$	
	$R1$	$R1 = R4 + 5e$	
Cámara de Disipación	St (m)	$4 \cdot D_s \leq St < 6 \cdot D_s$	
	Bt (m)	$2 \cdot D_s \leq Bt < 3 \cdot D_s$	
	Tt (m)	$2 \cdot D_s \leq Tt < 3 \cdot D_s$	
Capacidad de la estructura	Q_o	$Q_o = \left[\frac{g \cdot a}{b} \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^5 \right]^{1/2}$	
	$Q_{máx}$	$Q_{máx} = 4 \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^3 \cdot \left(\frac{5g}{b} \right)^{1/2}$	
	h_o	$h_o = \frac{a \cdot D_s}{2b}$	
	h	$h = h_o \left(0.687 \cdot \frac{Q}{Q_o} + 0.18 \right)$	Para la expresión Q/Qo se considera el valor del caudal de diseño. (*)

(*) Ecuación proveniente de la **Curva de Descarga** que se detalla a continuación:

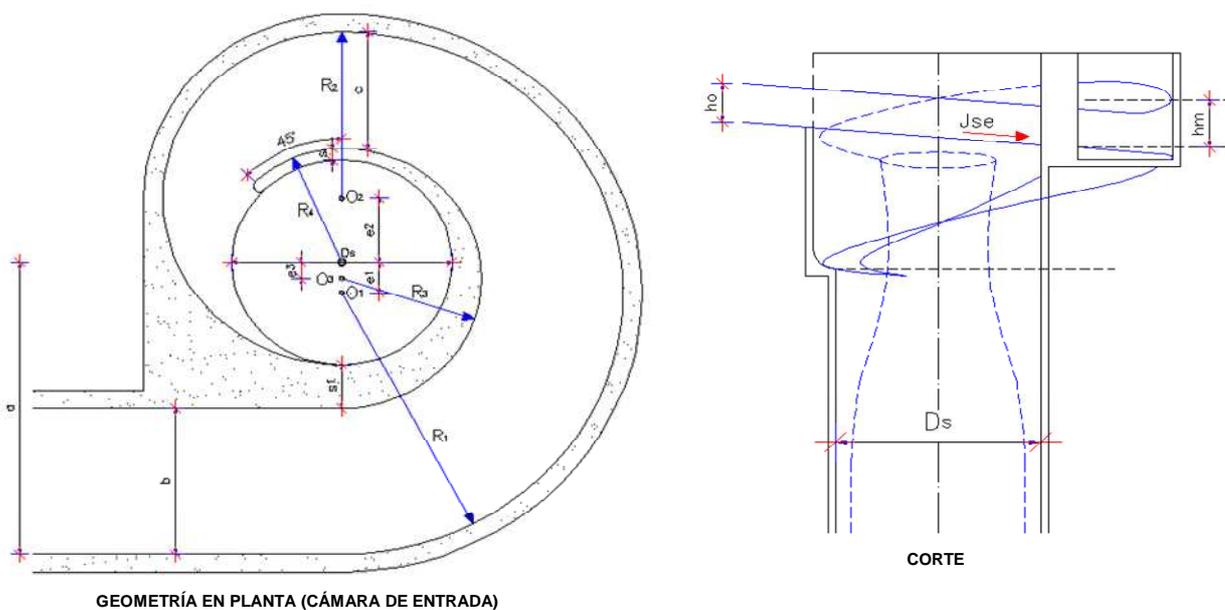
h/h_o	Q/Q_o
1	0.86
2	1.55
3	2.27
4	2.91

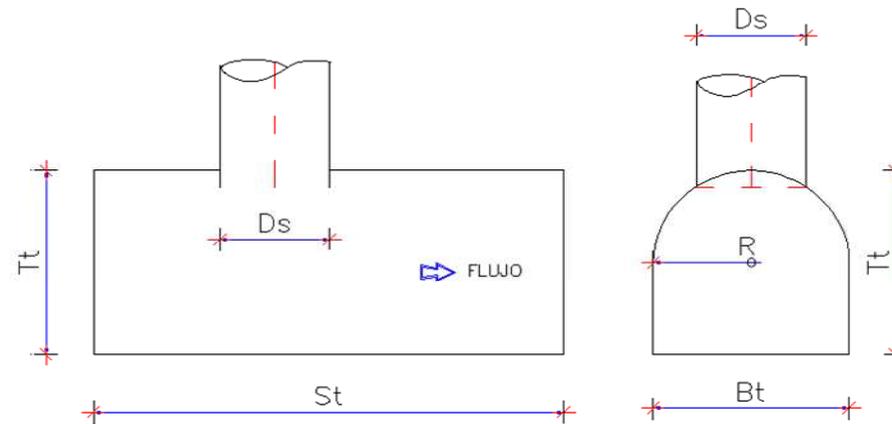


5.2.3.2 Descargador a Vórtice con Flujo Supercrítico

GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA

Geometría del Descargador a Vórtice Supercrítico:





**GEOMETRÍA DE LA
CÁMARA DE DISIPACIÓN**

Datos de diseño:

Descripción	Símbolo	Unidad
Caudal de diseño	Q_d	m^3/s
Factor η	η	-
Ancho del canal de aproximación	b	m
Pendiente del canal de aproximación	J_{so}	m/m
Dimensiones constructivas	c	m
	s	m
	s_1	m
Pendiente de la cámara de entrada	J_{se}	m/m

Valores calculados:

Descripción	Símbolo	Unidad
Caudal unitario	q	m^2/s
Profundidad en el canal de aproximación	h_o	m
Froude del flujo de aproximación	Fr	-
Diámetro del pozo	D_s	m
Cámara de entrada	a	m
	e_1	m
	e_2	m
	e_3	m
Radios de Curvatura	R_1	m
	R_2	m
	R_3	m
	R_4	m
Sobreelevación en la cámara de entrada	h_m	m
Cámara de disipación	St	m
	Bt	m
	Tt	m

EXPRESIONES DE CÁLCULO

	Símbolo	Expresión de Cálculo	Observaciones
Datos	Q_d		Datos de diseño que dependen de las características de cada proyecto
	η		
	b		
	J_{so}		
	J_{se}		
	c		Dimensiones constructivas
	s		
	s_1		
	q	$q = \frac{Q_d}{b}$	
	h_o		Calculado con condiciones de flujo uniforme
Fr	$Fr = \frac{V}{\sqrt{2gh_o}}$	La velocidad se calcula con cualquier ecuación de flujo uniforme	
Tubo Vertical	D_s calculado	$D_s = \eta \cdot \left(\frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5}$	
	D_s		El valor obtenido con la expresión anterior es mínimo y puede ajustarse a dimensiones constructivas.
Cámara de Entrada	a	$a = b + s_1 + \frac{D_s}{2}$	
	$(0,5D_s + s + c) \leq a \leq (1,5D_s + s)$	$= si(a < (0,5 \cdot D_s + s + c); "Cambiar parámetros"; si(a < (1,5 \cdot D_s + s); "ok"; "Cambiar parámetros"))$	El valor de "a" depende de algunos parámetros que pueden revisarse como: b, s1 y Ds.
	$0,4D_s \leq b \leq D_s$	$= si(b < (0,4 \cdot D_s); "Ajustar D_s"; si(b < D_s; "ok"; "Ajustar D_s"))$	
	$0,4D_s \leq c \leq D_s$	$= si(c < (0,4 \cdot D_s); "Ajustar D_s"; si(c < D_s; "ok"; "Ajustar D_s"))$	
	R_4	$R_4 = 0,5 \cdot D_s + s$	
	R_3	$R_3 = (0,5 \cdot D_s + s + a - b)/2$	
	R_2	$R_2 = (0,5 \cdot D_s + s + c)/2$	
	R_1	$R_1 = (0,5 \cdot D_s + s + a + c)/2$	
	e_1	$e_1 = a - R_1$	
	e_2	$e_2 = 0,5 \cdot D_s + s + c - R_2$	
e_3	$e_3 = a - b - R_3$		
h_m	$h_m = (0,15Fr + 1,1) \cdot \left(\frac{2bh_o^2}{R_1^3} - \frac{J_{so}}{2} \right) R_1$		
Cámara de Disipación	St (m)	$4 \cdot D_s \leq St < 6 \cdot D_s$	
	Bt (m)	$2 \cdot D_s \leq Bt < 3 \cdot D_s$	
	Tt (m)	$2 \cdot D_s \leq Tt < 3 \cdot D_s$	

5.2.4 EJEMPLOS DE CÁLCULO

5.2.4.1 Descargador a Vórtice con Flujo Subcrítico

EJEMPLO DE CÁLCULO

No.	Denominación	Símbolo	Unidad	Diseño	Control
1	Caudal de diseño	Q_d	m^3/s	0,08	
2	Ancho del canal de aproximación	b	m	0,30	
3	Caudal unitario	q	m^3/ms	0,27	
4	Factor η	η	-	1,25	
5	Dimensiones constructivas	ΔR	m	0,02	
6		c	m	0,02	
7		s	m	0,02	
8	Diámetro del pozo	$D_{s_{calc}}$	m	0,29	
9	Diámetro del pozo ajustado	D_s	m	0,28	
10	Cámara de entrada	a	m	0,35	
11		a/D_s	-	1,25	ok
12		e	m	0,05	
13		R_4	m	0,23	
14		R_3	m	0,27	
15		R_2	m	0,36	
16	R_1	m	0,45		
17	Cámara de disipación	St	m	1,68	
18		Bt	m	0,84	
19		Tt	m	0,84	
20	Capacidad de la estructura	Q_o	m^3/s	0,02	
21		$Q_{m\acute{a}x}$	m^3/s	0,14	
22		Q/Q_o	-	3,22	
23		h_o	m	0,16	
24		h	m	0,39	

Observaciones:

- 11 Si los datos de diseño no se encuentran dentro del rango recomendable se sugiere igualar la relación a/D_s a los límites máximo y mínimo para ajustar los parámetros que influyen en el cálculo.

	Datos de diseño
	Valor ajustado a dimensiones constructivas
	Parámetros para control

5.2.4.2 Descargador a Vórtice con Flujo Supercrítico

EJEMPLO DE CÁLCULO

No.	Denominación	Símbolo	Unidad	Diseño	Control
1	Caudal de diseño	Q_d	m^3/s	0,13	
2	Ancho del canal de aproximación	b	m	0,25	ok
3	Caudal unitario	q	m^3/ms	0,52	
4	Pendiente del canal de aproximación	J_{so}	m/m	0,02	
5	Pendiente de la cámara de entrada	J_{se}	m/m	0,18	
6	Profundidad en el canal de aproximación	h_o	m	0,19	
7	Froude del flujo de aproximación	Fr	-	1,42	
8	Factor η	η	-	1,25	
9		c	m	0,20	ok
10	Dimensiones constructivas	s	m	0,02	
11		s_1	m	0,08	
12	Diámetro del pozo	$D_{s_{calc}}$	m	0,35	
13	Diámetro del pozo ajustado	D_s	m	0,35	
14	Cámara de entrada	a	m	0,51	ok
15		$0,5D_s + s + c$	m	0,28	
16		$1,5D_s + s$	m	0,55	
17		$0,4D_s$	m	0,14	
18		R_4	m	0,20	
19		R_3	m	0,23	
20		R_2	m	0,20	
21		R_1	m	0,45	
22		e_1	m	0,06	
23		e_2	m	0,20	
24		e_3	m	0,03	
25	h_m	m	0,11		
26	Cámara de disipación	St	m	2,10	
27		Bt	m	1,05	
28		Tt	m	1,05	

Observaciones:

- 6 El valor de h_o fue calculado utilizando la ecuación de Manning, utilizando un coeficiente de rugosidad (n) de 0,009
- 15 Cálculo de parámetros de control
- 16 Cálculo de parámetros de control
- 17 Cálculo de parámetros de control

	Datos de diseño
	Valor ajustado a dimensiones constructivas
	Parámetros para control

5.3 MANUAL DE DISEÑO HIDRÁULICO DEL DISIPADOR EN BANDEJAS MODIFICADO

En forma general, un pozo de bandejas es una estructura que recibe el flujo desde un canal de aproximación (entrada) hacia la primera bandeja que se constituye en una extensión del canal, el flujo desciende de manera alternada por el pozo de bandejas hasta la cámara de disipación de energía residual y de ahí a un colector de entrega hacia la salida del sistema.

5.3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

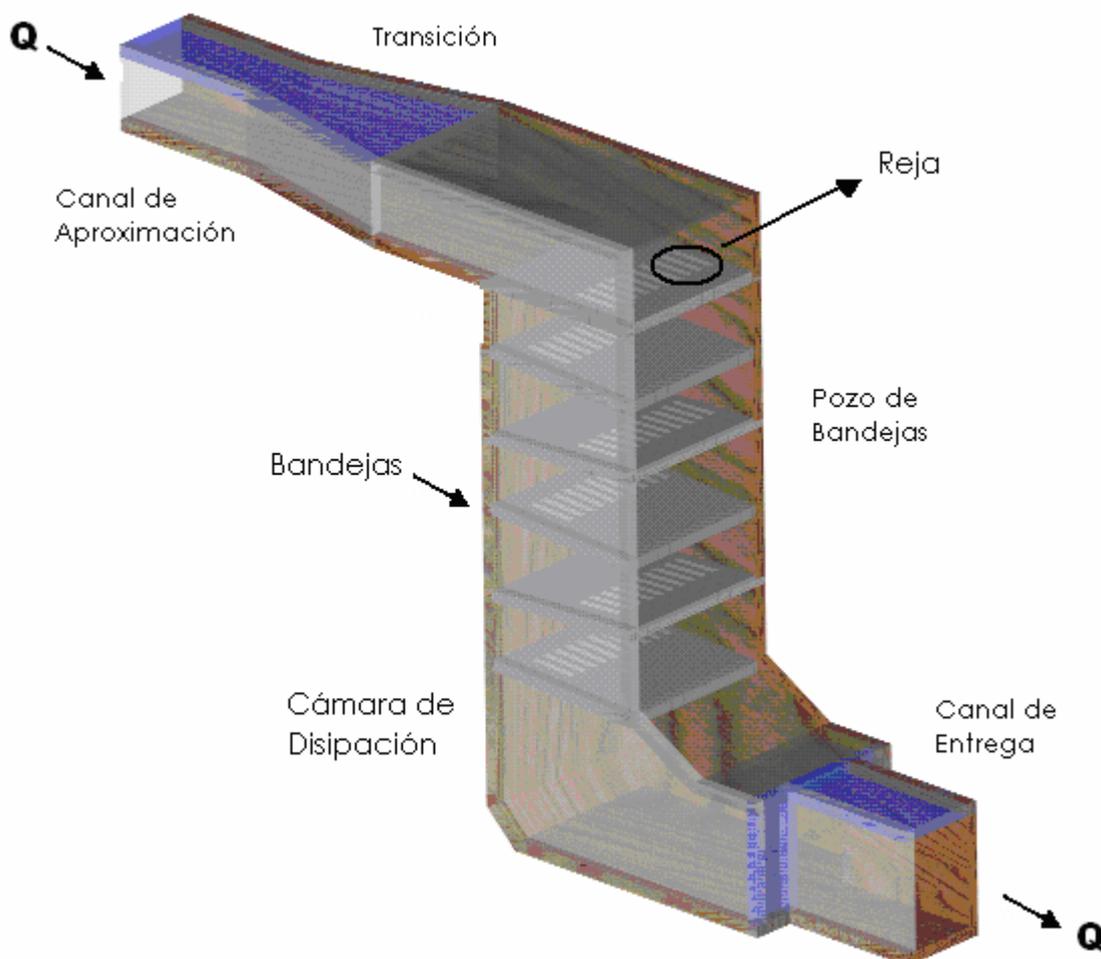


Gráfico No. 5.9: Elementos constitutivos de un dissipador en Bandeja – Reja.

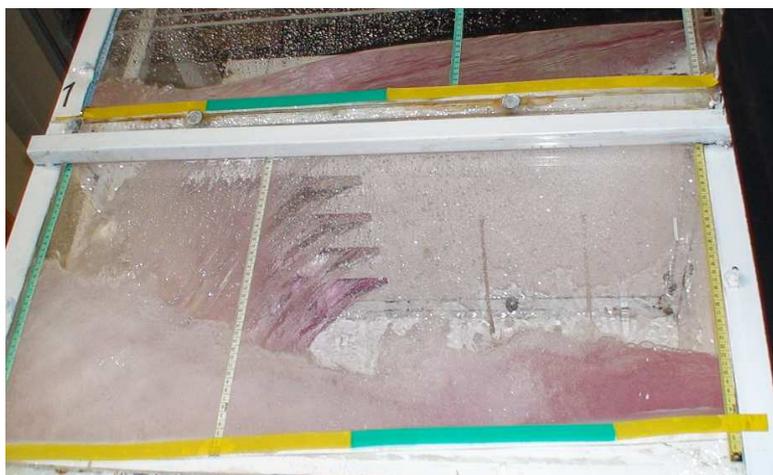
5.3.1.1 Canal de Aproximación

A diferencia del descargador a vórtice, el uso del disipador en Bandejas está limitado únicamente a una aproximación subcrítica. Es decir que para flujos rápidos de aproximación se debe prever una estructura de cambio de régimen aguas arriba. Se recomienda que el **flujo subcrítico** en el canal de aproximación tenga números de Froude menores que 0.90.

5.3.1.2 Análisis en cada Bandeja

El efecto de las rejas longitudinales permite evitar ondulaciones en el flujo antes de la caída, donde la lámina vertiente se separa en varios segmentos largos y delgados que caen verticalmente en el estanque ubicado abajo, donde la disipación de energía se hace por turbulencia.

La inclinación dispuesta para cada bandeja ofrece por una parte, la introducción de aire en la estructura y también ayuda a mejorar las condiciones de flujo. Al formarse un colchón de agua, por la presencia de la inclinación en las bandejas, el flujo de caída libre choca contra esta masa de agua, provocando una disminución de su velocidad y estableciendo un flujo con régimen subcrítico sobre las bandejas.



Fotografía No. 5.8: Caída del flujo a través de la reja

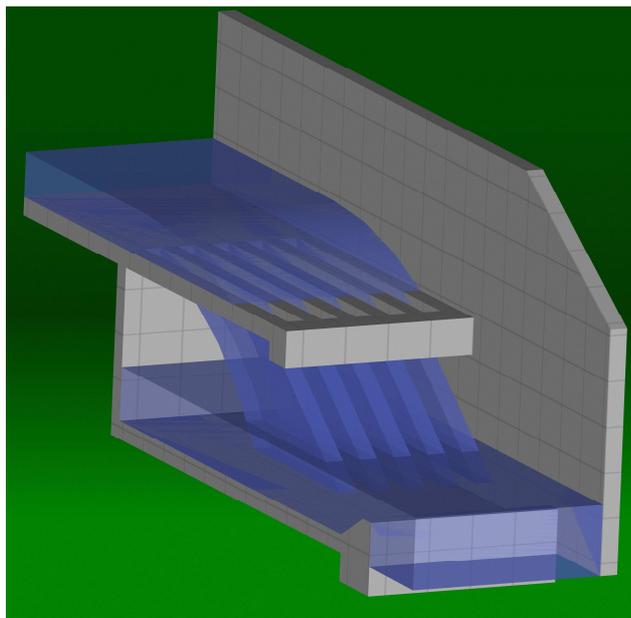


Gráfico No. 5.10: Esquema en 3D del flujo de caída en la bandeja con rejas. (Fuente: “Diseño de Presas Pequeñas”, Bureau of Reclamation)

Según las investigaciones realizadas, el flujo de caída en cada bandeja, presenta un comportamiento similar después de la tercera bandeja hasta antes de la estructura de disipación al pie. Este último elemento debe ser introducido en la estructura para controlar la energía residual.

5.3.1.3 Análisis del flujo en la cámara de salida

El flujo en la cámara de disipación debe presentar características hidrodinámicas definidas; es decir, que el flujo antes de la entrega al canal de salida contenga mínima turbulencia y perturbaciones donde exista escasa cantidad de aire en la mezcla, para la serie de caudales de operación; garantizando la entrega de flujo hacia el colector.

En caso de caudales mínimos, la cámara de disipación al pie prevé un estrechamiento brusco de la sección transversal antes de la entrega al canal de salida. Para caudales de diseño y máximos, se observa una mezcla con una macroturbulencia media con introducción de aire que permite la disipación de la energía residual.

El dimensionamiento de la cámara al pie, al igual que en el caso del descargador a vórtice, persigue los siguientes objetivos.

- Permitir que el flujo de ingreso al canal de entrega al pie de la estructura sea homogéneo y estable.
- Ofrecer la posibilidad de inspección de la estructura de cambio de nivel.

Para casos en que se requiere cambio de dirección en la estructura, se puede modificar la geometría en planta de la cámara de disipación.

5.3.2 DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO

5.3.2.1 Dimensionamiento en Planta del Pozo de Bandejas

La ecuación general para el dimensionamiento del pozo de bandejas corresponde a la siguiente:

$$Li = 0.142 * K * Q_d^{2/5}$$

Donde: Q_d = Caudal de diseño en (l/s)

Li = Dimensiones del Pozo de bandeja (según tabla No. 5.1)

K = Constantes de dimensionamiento para cada Li .

Li	DESCRIPCION	K
A	Ancho del Pozo (m)	1.000
B	Separación de pared Frontal a Reja (m)	0.190
C	Largo de la Reja (m)	0.260
D	Separación entre Pared Lateral y Reja (m)	0.050
E	Ancho de la Reja (m)	0.046
H	Altura entre Bandejas (m)	0.750

Tabla No. 5.1: Constante K y descripción de los parámetros geométricos de las bandejas

En el Gráfico No. 5.11 se muestra un esquema con las dimensiones geométricas Li , del pozo de Bandejas.

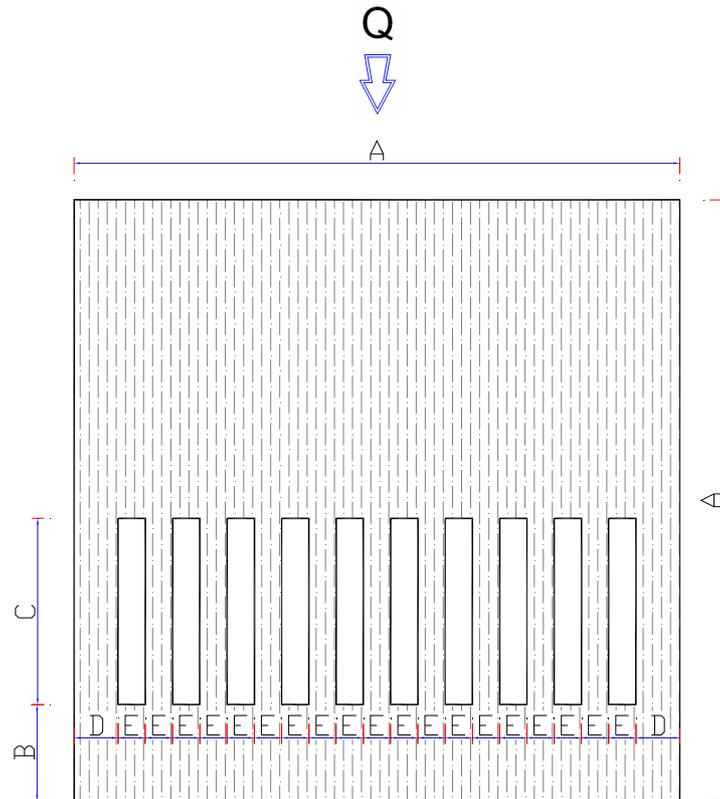


Gráfico No. 5.11: Variables de la geometría final recomendada del estudio experimental

Se han definido valores mínimos para cada dimensión L_i . Estos parámetros aseguran dimensiones constructivas y permiten la operación y mantenimiento de la estructura.

L_i	Dimensión Mínima (m)
A	3.30
B	0.53
C	1.02
D	0.24
E	0.15
H	1.65

Tabla No. 5.2: Valores mínimos para las dimensiones L_i de la geometría de la bandeja.

Se plantea la utilización de un ábaco, para simplificar los cálculos. El ábaco funciona exclusivamente para caudal de diseño, introduciendo en las abscisas dicho valor mientras los datos restantes se reflejan en las ordenadas mostradas en el Gráfico No. 5.16.

5.3.2.2 Dimensionamiento en Elevación del Pozo de Bandejas

La estructura en elevación consta de varias bandejas, dispuestas transversalmente en la vertical del pozo como se muestra en el Gráfico No. 5.12. Se recomienda que el número de bandejas sea siempre par, para asegurar el vertido posterior en la cámara de disipación al pie.

Para asegurar una correcta disipación de energía con caudales menores al 20% del caudal de diseño, en cada una de las bandejas se asigna una inclinación en contra pendiente de manera que se generen colchones de agua suficientes para amortiguar la energía en cada salto. La pendiente recomendada es del 5%, en dirección longitudinal a la dirección del flujo.

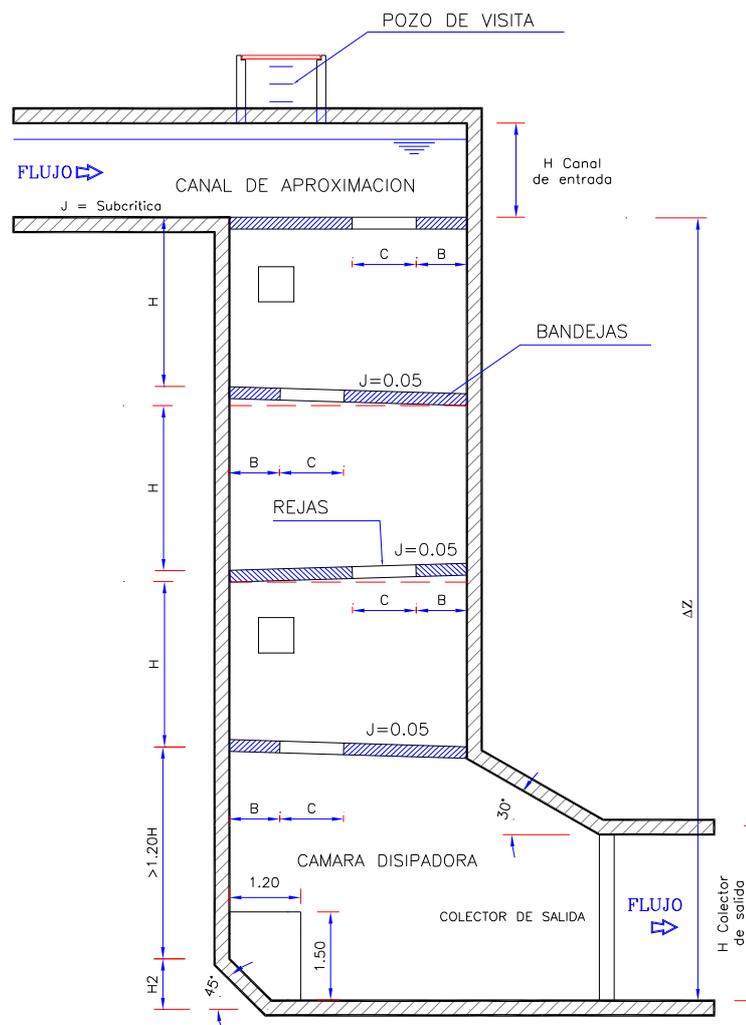


Gráfico No. 5.12: Variables de la Geometría recomendada en elevación

5.3.2.3 Cámara Disipadora al Pie

Para el diseño, se recomienda que la altura mínima de la cámara disipadora sea 1.20 veces la altura de las bandejas.

$$H_{\text{min cámara}} = 1.20 H$$

H = altura entre bandejas

Se recomienda adicionalmente una altura con pendiente de 45 grados para ajustar la altura total con una H2, de caída del pozo. Por lo tanto la altura total de la cámara de disipación se encuentra en los siguientes rangos:

$$1.20 \cdot H < H_t < 2.0 \cdot H$$

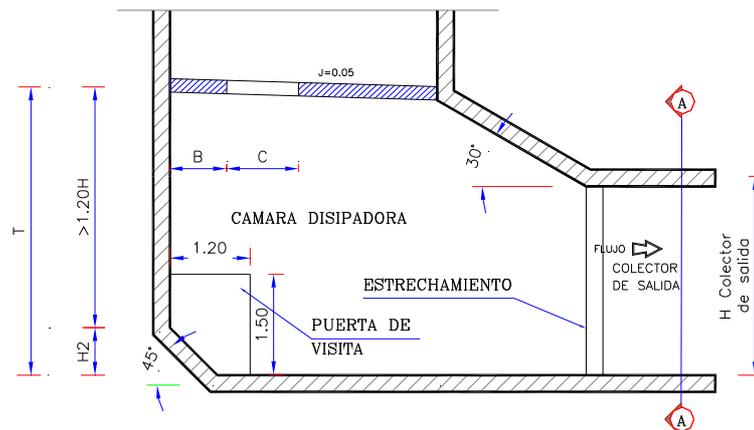


Gráfico No. 5.13: Corte Vertical de la cámara de disipación.

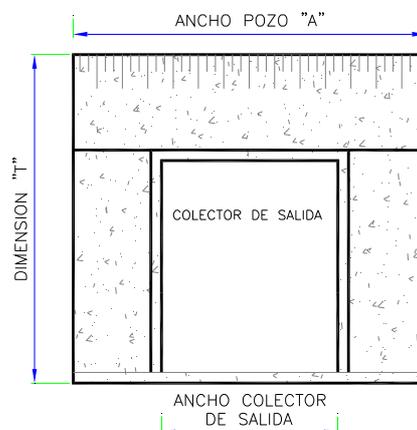


Gráfico No. 5.14: Corte A-A de la cámara de disipación.

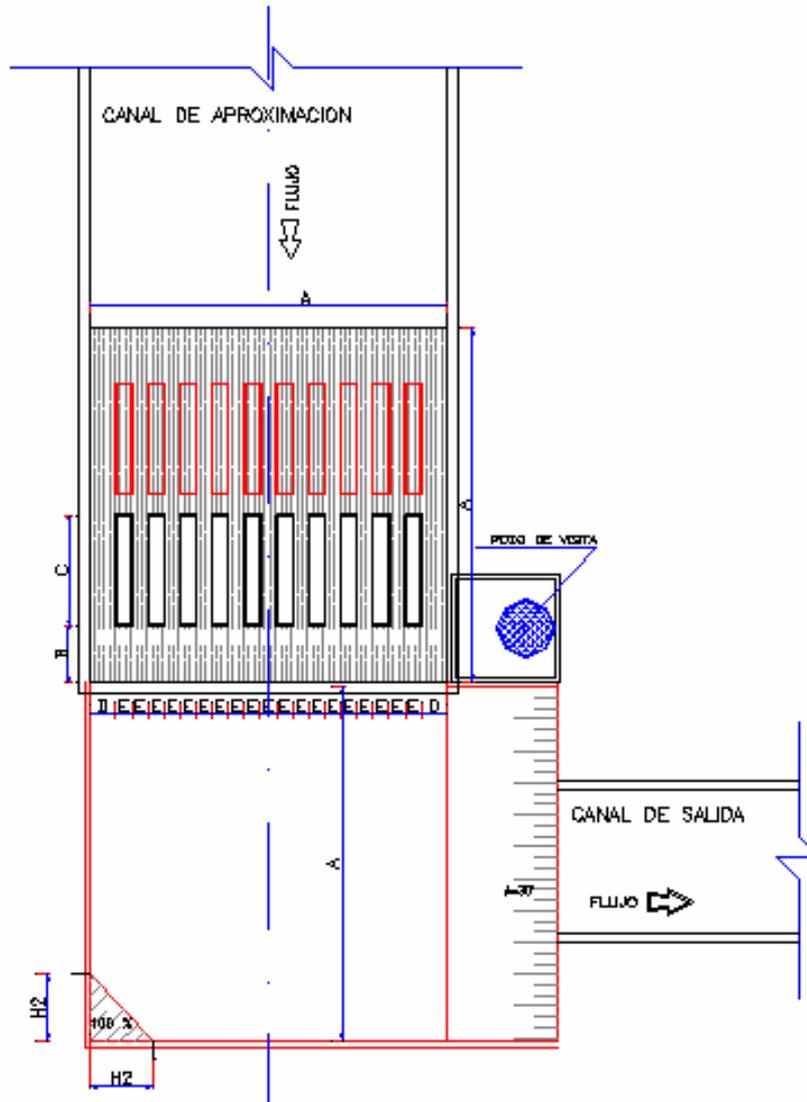


Gráfico No. 5.15: Vista en planta del modelo (los niveles inferiores tienen coloración roja).

ABACOS DE DISEÑO

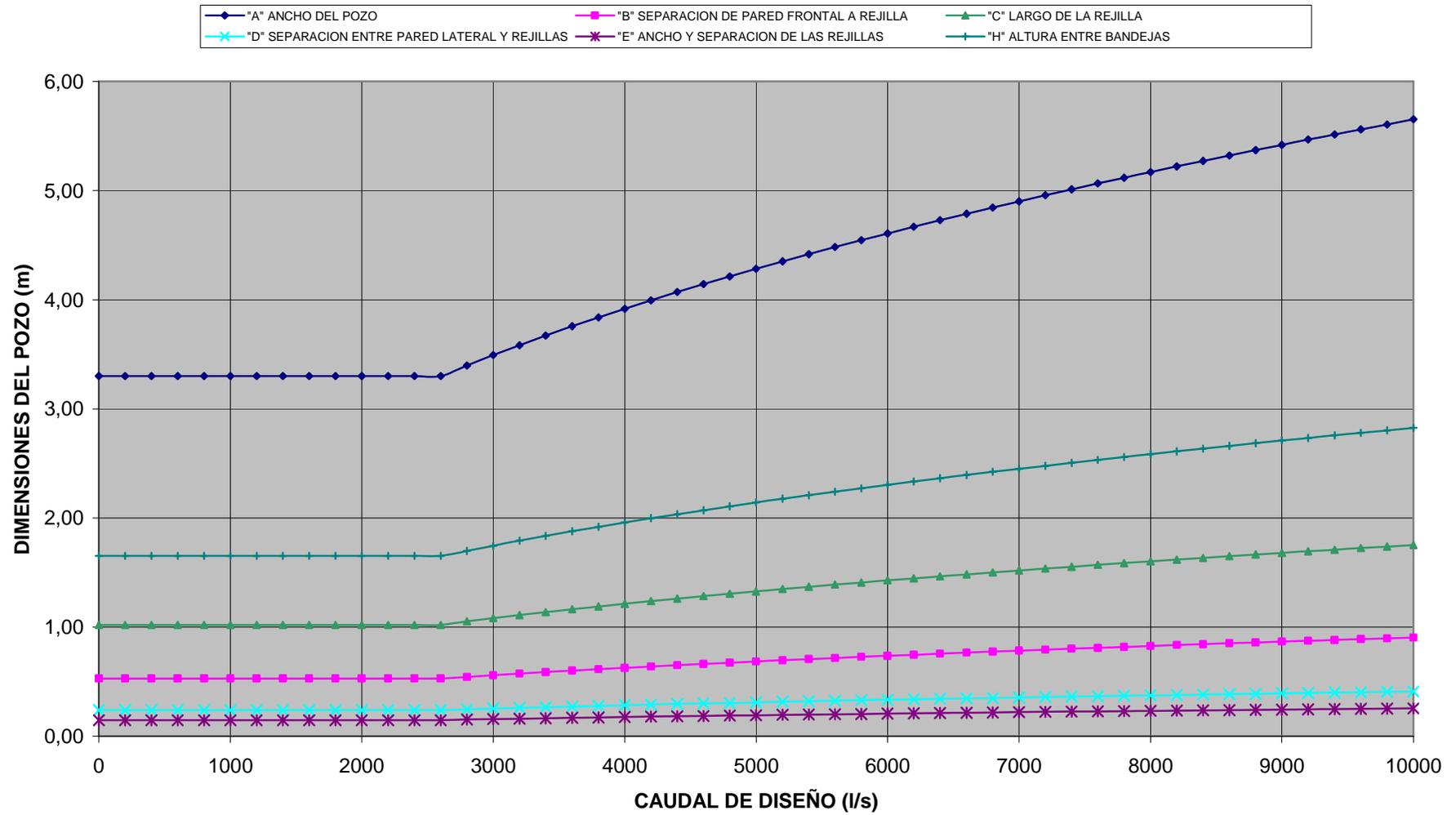
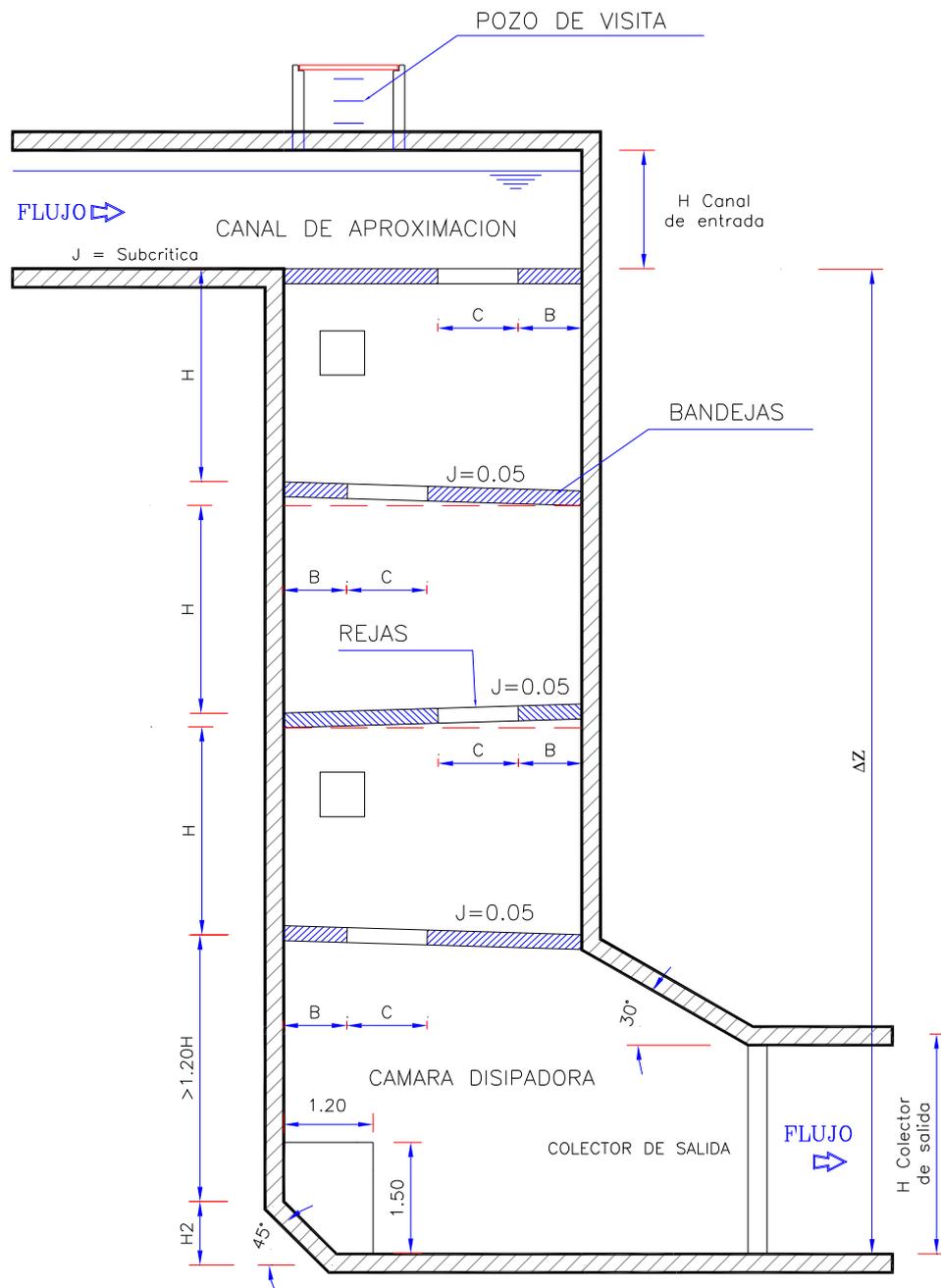
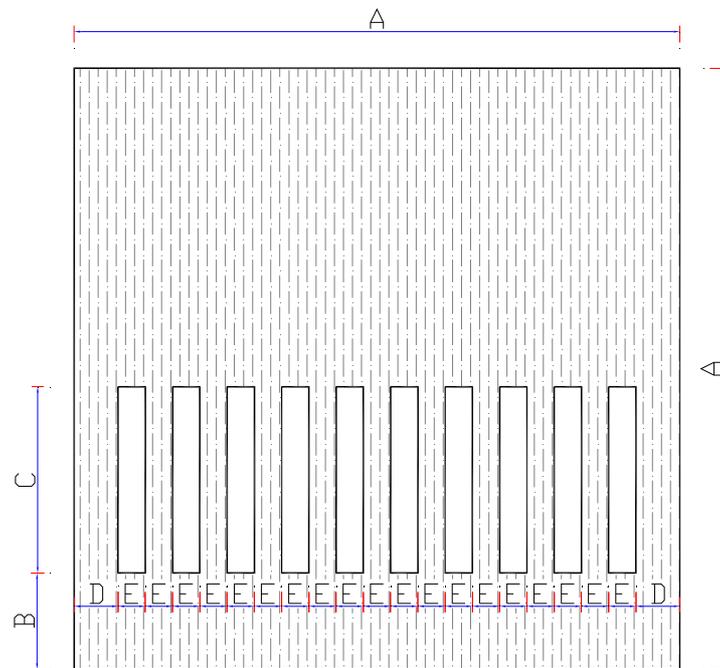


Gráfico No. 5.16: Ábaco de Diseño para el pozo de bandejas

5.3.3 ELABORACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO

GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA





MODELO DE BANDEJA

Valores calculados:

Descripción	Símbolo	Unidad
Caudal unitario	q	m ³ /ms
Número de bandejas	N	-
Ancho del pozo	A	m
Separación de la pared frontal a rejilla	B	m
Largo de rejilla	C	m
Separación entre pared lateral y rejilla	D	m
Ancho de rejilla	E	m
Altura entre bandejas	H	m
Altura total calculada	Ht	m
Dimensión constructiva	H2	m
Caudal máximo	Q _{máx}	l/s

EXPRESIONES DE CÁLCULO

	Símbolo	Expresión de Cálculo	Observaciones
Datos	Q_d		Datos de diseño que dependen de las características de cada proyecto
	b		
	Δz		
	J	5%	Valor constante
	q	$q = \frac{Q_d}{b}$	Para este cálculo es necesario tener en cuenta la compatibilidad de unidades
Pozo de Bandejas	Li	$Li = 0.142 \cdot K \cdot Q_d^{2/5}$	Li representa cada parámetro de la geometría de la bandeja (*)
	Límites	$= si(Li < Límite; Límite; 0.142 \cdot K \cdot Q_d^{2/5})$	El valor Límite de los parámetros se detalla a continuación (**)
	N	$N = \frac{\Delta z}{H}$	El número de bandejas debe aproximarse hacia un valor impar inferior
	Ht	$Ht = N \cdot H + 1.2H$	1,2H es el valor de altura de la última bandeja (cámara de disipación)
	$H2$	$H2 = \Delta z - Ht$	Valor cuyo cálculo se requiere cuando Ht es menor que Δz
Capacidad de la estructura	$Q_{máx}$	$Q_{máx} = 1.5 \cdot Q_d$	

(*) Valores de K para cada parámetro de geometría de la bandeja:

Li	Descripción	K
A	Ancho del pozo	1,00
B	Separación de la pared frontal a rejilla	0,19
C	Largo de rejilla	0,26
D	Separación entre pared lateral y rejilla	0,05
E	Ancho de rejilla	0,046
H	Altura entre bandejas	0,75

(**) Valores mínimos de los parámetros geométricos de las bandejas:

Li	Descripción	Límite
A	Ancho del pozo	3,30
B	Separación de la pared frontal a rejilla	0,53
C	Largo de rejilla	1,02
D	Separación entre pared lateral y rejilla	0,24
E	Ancho de rejilla	0,15
H	Altura entre bandejas	1,65

5.3.4 EJEMPLO DE CÁLCULO

No.	Denominación	Símbolo	Unidad	Diseño	Definitivo
1	Caudal de diseño	Q_d	l/s	10000	
2	Ancho del canal de aproximación	b	m	4,00	
3	Caudal unitario	q	m ³ /ms	2,50	
4	Desnivel entre colectores	Δz	m	20,00	
5	Inclinación de las bandejas	J	%	5%	
6	Ancho del pozo	A	m	5,65	5,65
7	Separación de la pared frontal a rejilla	B	m	1,07	1,07
8	Largo de rejilla	C	m	1,47	1,47
9	Separación entre pared lateral y rejilla	D	m	0,28	0,28
10	Ancho de rejilla	E	m	0,26	0,26
11	Altura entre bandejas	H	m	4,24	4,24
12	Número de bandejas	N	-	4,72	3,00
13	Altura total calculada	Ht	m	17,81	
14	Ajuste del desnivel	H2	m	2,19	
15	Caudal máximo	$Q_{m\acute{a}x}$	l/s	15000	

6 - 11 Valores que pueden ajustarse a dimensiones constructivas

	Datos de diseño
	Valor ajustado o que puede ajustarse a dimensiones constructivas mayores
	Parámetros para control
	Valor ajustado a un número impar inferior

5.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para escoger la estructura de disipación que se va a implementar se debe considerar algunos aspectos como:

Hidráulicos:

- Régimen del flujo en el colector de aproximación
- Entrega del flujo aguas abajo
- Caudal de diseño
- Eficiencia en la disipación

Sanitarios:

- Programas de operación y mantenimiento
- Capacidad de autolimpieza
- Aireación requerida

Estructurales:

- a) Esbeltez de la estructura (efectos de pandeo)
- b) Efectos de punzonamiento concentrados
- c) Estabilidad global
- d) Compresiones laterales y tensiones
- e) Efectos de abrasión
- f) Vibración

Económicos:

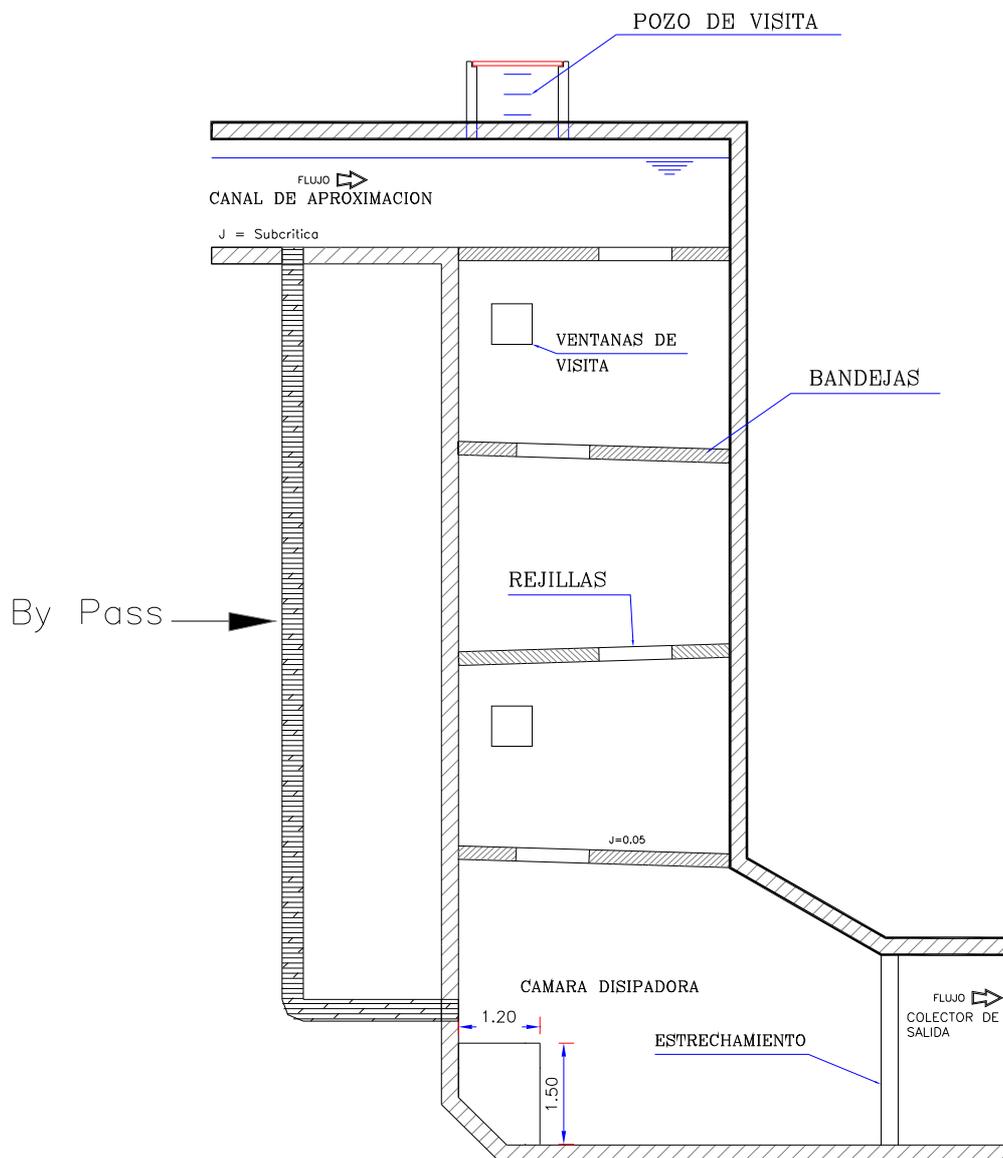
- a) Relación de costos
- b) Materiales de construcción
- c) Tecnología de construcción
- d) Operación y Mantenimiento

5.4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES HIDRÁULICAS Y SANITARIAS

- ◆ La optimización de las estructuras en estudio se realiza cuando éstas son consideradas para solucionar problemas simultáneos de cambio de nivel y de dirección. El descargador a vórtice presenta la ventaja de que la cámara disipadora puede colocarse en cualquier dirección alrededor de los 360°. El pozo de bandejas, en su configuración actual, permite la salida con giro a 90°.
- ◆ Para realizar operaciones de mantenimiento en los descargadores a vórtice se requiere un acceso lateral a la cámara de disipación como se indica en el Gráfico No. 1.9. En algunos casos, cuando las dimensiones del colector permiten el acceso de una persona, éste puede utilizarse como entrada a la cámara de disipación.
- ◆ Una ventaja que presenta el descargador a vórtice sobre el pozo de bandejas es su alta capacidad de autolimpieza para la gama de caudales de operación sin presentar obturaciones como en el caso de las rejas en las bandejas. El

buen funcionamiento del pozo de bandejas está condicionado a un adecuado plan de mantenimiento y limpieza periódicos.

- Para facilitar la limpieza y el mantenimiento de la estructura del pozo de bandejas se debe asegurar el ingreso a cada nivel de bandeja. Este ingreso puede implementarse a través de un pozo auxiliar de visita con puertas de sellado hermético en cada nivel o mediante la colocación de rejas móviles en cada plataforma. Se recomienda la colocación de un by pass en el pozo de bandejas que permita desviar el caudal sanitario durante las operaciones de mantenimiento como se muestra en el Gráfico No. 5.17.



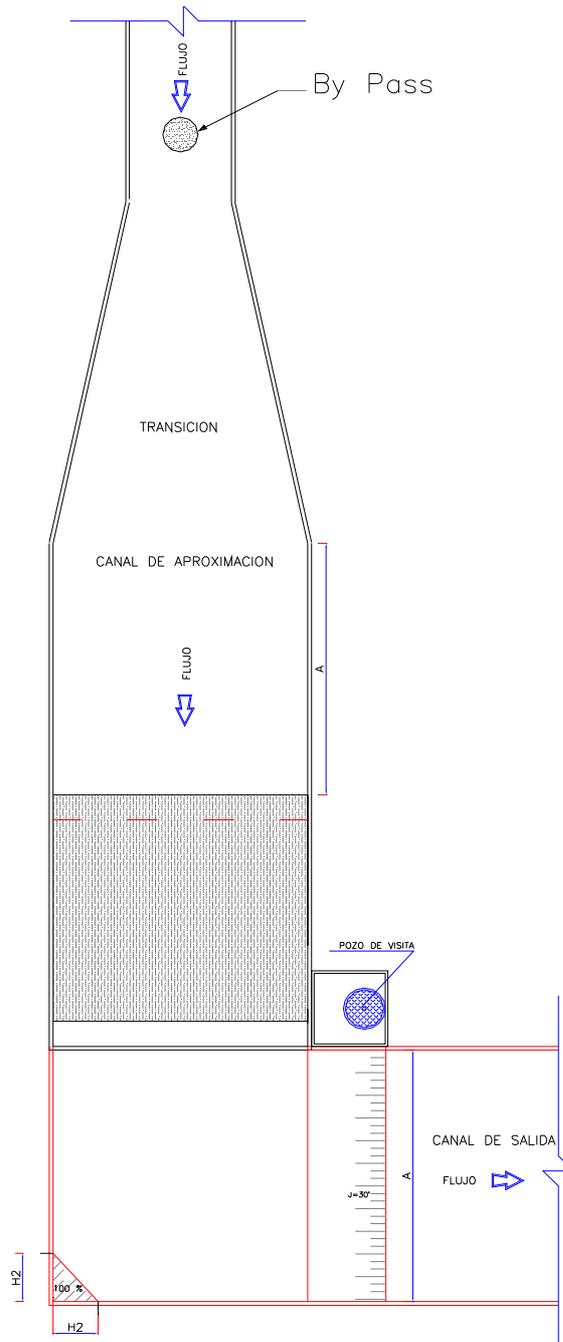


Gráfico No. 5.17: Ubicación del By Pass que permite desviar el caudal sanitario para mantenimiento en las bandejas.

- Para el adecuado funcionamiento de las estructuras de disipación (Descargador a Vórtice y Pozo de Bandejas) se debe prever un adecuado sistema de ventilación. En el caso del pozo de bandejas la ventilación puede proveerse a través de un pozo auxiliar (el mismo que puede utilizarse para inspecciones y mantenimiento). En el caso del descargador a vórtice debe

proveerse de ventilación en la parte posterior de la cámara de disipación, como se muestra en el Gráfico No. 5.18.

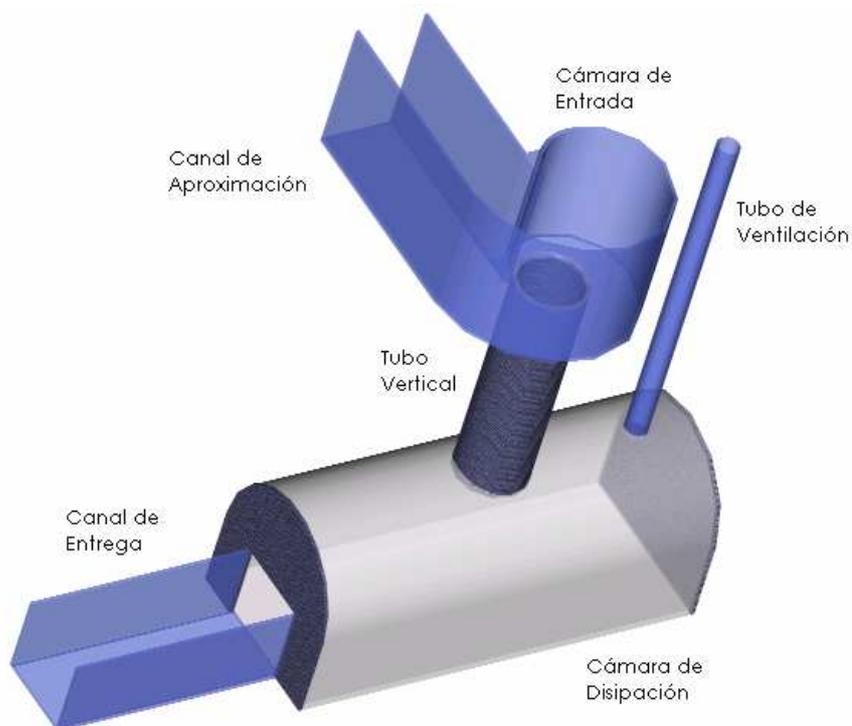


Gráfico No. 5.18: Ubicación del tubo de ventilación en la cámara de disipación del descargador a vórtice.

- ◆ Para realizar inspecciones de mantenimiento en los elementos que no permiten el acceso (como es el caso del tubo vertical en el descargador a vórtice) existen cámaras de video especiales que facilitan la supervisión del estado de funcionamiento de la estructura. Este procedimiento se utiliza actualmente para inspección de colectores. Sin embargo, de las observaciones realizadas en los modelos y en los prototipos registrados, estas visitas serán esporádicas si es que los materiales, durante la construcción, cumplieron con las especificaciones técnicas.
- ◆ Como se observa en el Gráfico No. 5.19, la eficiencia de las estructuras analizadas en el presente proyecto de titulación varía entre el 90% y el 100%. Para caudales menores al caudal de diseño, el descargador a vórtice tiene

mayor eficiencia que el pozo de bandejas, mientras que para la zona del caudal de diseño ($Q_d/Q_{m\acute{a}x} \approx 0.80$) las eficiencias son similares.

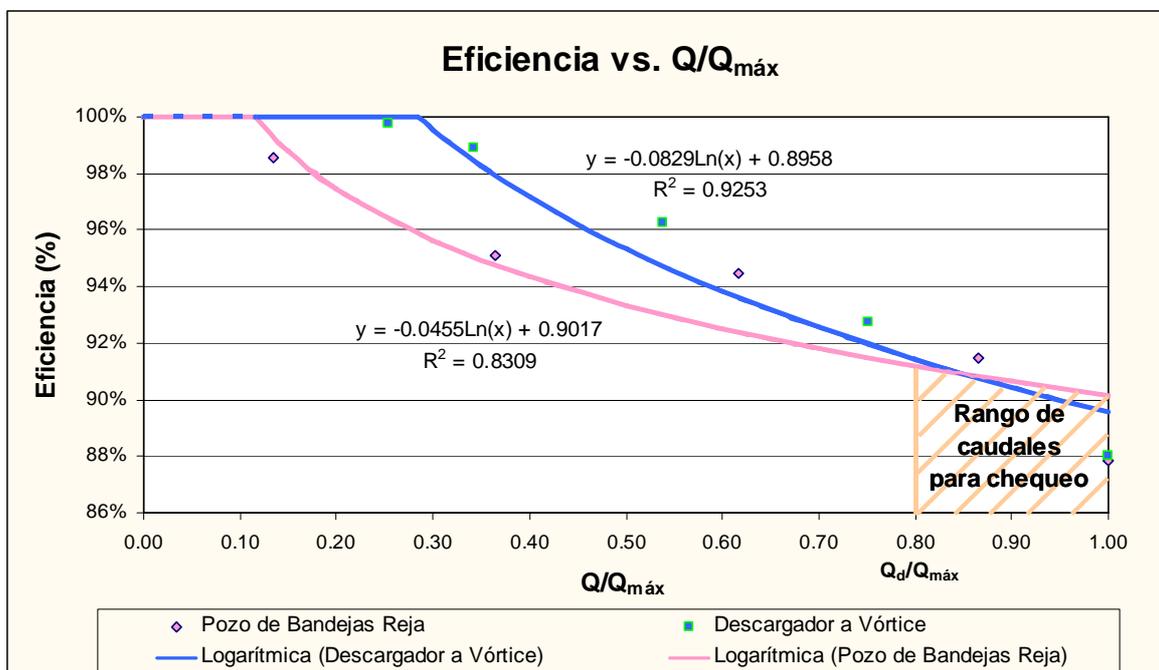


Gráfico No. 5.19: Eficiencia de las estructuras en función de la relación $Q/Q_{m\acute{a}x}$.

5.4.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ESTRUCTURALES

- ◆ Las estructuras con grandes dimensiones constituyen un problema económico y constructivo. En el pozo de bandejas como en el descargador a vórtice, grandes alturas pueden superar los límites de esbeltez y producir problemas de pandeo. En estructuras de hormigón armado, el pandeo puede ser solucionado mediante la implementación de anclajes y rigidizadores dependiendo de la ubicación de la estructura.
- ◆ La altura entre bandejas no debe ser superior a los 2.00 m. La norma ecuatoriana en sistemas de alcantarillado no permite estructuras de salto con altura superior a este valor.
- ◆ La ubicación de la reja en las bandejas debe ser tal que permita evitar el impacto directo del flujo en las paredes del pozo.

- ◆ En caso de requerirse una estructura de disipación de energía para flujo de aproximación supercrítico, se recomienda la utilización del descargador a vórtice. Debido a las características de esta estructura, debe disponerse de una altura mínima para garantizar su funcionamiento adecuado.
- ◆ El descargador a vórtice, por su configuración, elimina aristas rectas permitiendo la circulación del flujo sin cambios bruscos como aquellos que sufre el pozo de bandejas.
- ◆ No se recomienda apoyar el tubo vertical **directamente** sobre la cámara de disipación ya que las dimensiones de ésta así como la cantidad de material necesario para su construcción sería excesivo.
- ◆ Debido a las formas geométricas rectangulares que tiene el pozo de bandejas se presentan tensiones y compresiones combinadas lateralmente. Esta condición no se presenta en el descargador a vórtice que por su configuración circular se comporta reaccionando a compresión mientras que las fuerzas de tensión quedan minimizadas; este aspecto es favorable si se diseñan estructuras en hormigón armado.
- ◆ La forma de péndulo invertido que presenta el descargador a vórtice es una desventaja constructiva que debe ser controlada. Algunas soluciones que pueden adoptarse son la colocación de vigas rigidizadoras que sigan la forma de la cámara de disipación y permitan el anclaje del tubo vertical o la construcción de una torre que permita el anclaje superior de la estructura.
- ◆ El método que se empleará durante la construcción de un descargador a vórtice depende de la zona y las características del suelo en que se implementará. Además se debe considerar si la estructura quedará enterrada o vista para diseñar elementos adicionales que garanticen su estabilidad.
- ◆ El descargador a vórtice presenta problemas de punzonamiento en la losa superior de la cámara de disipación y en la losa inferior de la cámara de

entrada. Este problema puede ser solucionado utilizando métodos constructivos que permitan la transmisión uniforme de cargas al nivel inferior como en el caso de construcción de vigas rígidas en la losa. Estas vigas deben formar un sistema cerrado constituyéndose en parte de la geometría general de la cámara de disipación y de la cámara de entrada.

- ◆ En el pozo de bandejas se presentan problemas de punzonamiento en la losa inferior de apoyo de la cámara disipadora por lo que se recomienda la colocación de vigas de cimentación para que la carga sea repartida uniformemente.

Para solucionar problemas de cambio de nivel y/o dirección en sistemas de alcantarillado se presentan dos alternativas: el descargador a vórtice y el pozo de bandejas. Las configuraciones geométricas del descargador a vórtice permiten que esta estructura sea utilizada para solucionar la mayoría de problemas de cambio de nivel y dirección que se presentan en sistemas de alcantarillado. El pozo de bandejas es una estructura que presenta varias limitaciones de uso por lo que su implementación debe realizarse considerando todas las variables que pueden afectar su funcionamiento.

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES

6.1 ASPECTOS HIDRODINÁMICOS QUE REQUIEREN SER COMPLEMENTADOS

- Debido a las características especiales de las zonas andinas puede presentarse flujo supercrítico en algunos colectores. La estructura recomendable para solucionar el problema de cambios de nivel y/o dirección con aproximación supercrítica es el descargador a vórtice. No obstante, se debe poner especial atención a que el flujo supercrítico no es controlado en la sección aguas abajo y que debe garantizarse por lo tanto que el flujo de aproximación supercrítico sea estable, libre de ondulaciones, sin problemas de aireación forzada, entre otros.

- El pozo de bandejas con rejillas, según la configuración recomendada en el manual, no es recomendable para flujo supercrítico, la rejilla en la primera bandeja ejercerá control en el flujo, provocando resalto hidráulico inestable que puede ocasionar graves daños en el colector.

- El descargador a vórtice presenta un buen funcionamiento para toda la gama de caudales. Se recomienda realizar investigaciones para optimizar el diseño de la cámara de disipación, en cada caso particular.

- Para pequeños desniveles se recomienda realizar investigaciones en la configuración de la cámara de entrada del descargador a vórtice para disminuir el paso del movimiento helicoidal o el ángulo con el que desciende el flujo y así disminuir la altura máxima requerida del tubo vertical para lograr a la eficiencia adecuada de la estructura en el grado de disipación de energía. Las modificaciones podrían realizarse en la cámara de entrada tanto para flujo subcrítico como supercrítico.

- Se requieren estudios complementarios para definir el impacto que produce el flujo en la estructura pozo de bandejas. Se debe identificar zonas de altas presiones y velocidades, así como la vibración inducida en la estructura con el objeto de reformular el diseño estructural y garantizar así el funcionamiento de la estructura.
- En el caso de estructuras hidráulicas de control, la simulación del flujo de agua en un modelo físico a escala reducida exige que se cumplan los tres tipos de similitud: geométrica, dinámica y cinemática. Sin embargo, en la mayoría de los casos de modelos de estructuras de geometría compleja, como son el descargador a vórtice y el pozo de bandejas con rejillas, no es posible cumplir paralelamente con la similitud dinámica de todas las fuerzas que intervienen en el fenómeno físico y que han sido previamente identificadas por el ingeniero diseñador. En consecuencia, la aplicación de las leyes de similitud dinámica en el modelo se restringe únicamente a las fuerzas predominantes.

El análisis dimensional expuesto para discutir los criterios de similitud dinámica válidos para las estructuras motivo del presente trabajo de titulación, habrá de ser considerado en el procesamiento de los datos experimentales de laboratorio.

En particular, dentro de lo observado en los modelos de las estructuras descargadores a vórtice, con relación a la restricción de la “Similitud de Weber”, el fenómeno de introducción de aire en la masa de agua no es relevante siempre y cuando se mantenga el núcleo de aire prescrito en el dimensionamiento básico. Por lo contrario, dentro de lo observado en los modelos de las estructuras pozos de bandejas, el fenómeno de introducción de aire en la masa de agua es relevante y condiciona el grado de eficiencia del proceso de disipación de energía en la mezcla de agua – aire que se procura mantener en cada bandeja.

En el tratamiento de los datos experimentales existentes tanto para el descargador a vórtice como para el pozo de bandejas se tiene presente estos

requerimientos mencionados para la similitud dinámica y para el procesamiento de la información técnica, que es transcrita en la forma de bases o criterios de diseño hidráulico.

En base de lo mencionado en el Capítulo 2 del presente trabajo se han seleccionado los resultados experimentales de ensayos en laboratorio para los descargadores a vórtice y para los pozos de bandejas que cumplen los requisitos básicos antes señalados. En particular, se utilizan los resultados de aquellos modelos que han sido construidos en plexiglás, con rugosidad absoluta del orden de los 0.0010 mm, y escala de longitudes $L_r < 20$.

En ningún caso, se aceptarán resultados de modelos cuya escala de longitudes tenga valores superiores a 20 y se preferirán modelos con escala de longitudes inferiores a 10. Este requerimiento resulta en una importante restricción respecto de los caudales disponibles en los laboratorios de hidráulica de otras universidades del país.

6.2 SOBRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LA FORMA DE PRESENTACIÓN

- Si bien las estructuras descargador a vórtice y pozo de bandejas presentan una propuesta simple en su geometría para resolver un problema hidrodinámico complejo y muy frecuente, existen fenómenos hidráulicos en detalle, cuyo estudio y análisis ameritan el uso de la técnica de modelación física para que el ingeniero diseñador logre la variante óptima. El costo adicional que significa la construcción y la operación de un modelo hidráulico, que es utilizado para obtener los detalles en la configuración geométrica de una estructura DV o PB y se pueda así garantizar el dimensionamiento óptimo, es relativamente bajo, inferior al 2% del costo total de la estructura. De este modo, este rubro no es representativo en la inversión total.
- La técnica de modelación física de estructuras hidráulicas es ampliamente conocida y difundida en el medio técnico nacional e internacional. Sin

embargo, también es reconocido que la construcción y la operación de modelos físicos exigen del ingeniero diseñador, en primer lugar, un profundo conocimiento de las bases, de los criterios de similitud, de la tecnología en la construcción y en la operación de la estructura en el laboratorio y sobre todo, en segundo lugar, de una experiencia garantizada del ingeniero operador para la interpretación de las observaciones y del procesamiento de los resultados experimentales. Sobre todo se exige que el ingeniero diseñador utilice las bases de la Hidráulica Técnica en forma correcta tanto para el prediseño de la estructura como para el diseño del modelo.

- El análisis exhaustivo y profundo de los fenómenos hidráulicos tales como: las fluctuaciones turbulentas de la velocidad y de la presión, introducción de aire, vibraciones de la masa de la mezcla agua-aire y su interacción con la estructura, entre otros, requiere de equipamiento y de instrumentación especializadas para hacer viable y confiable su medición en el laboratorio. En la medida en que no se tenga experiencia con este tipo de instrumentos y equipos de laboratorio, el uso de los mecanismos tradicionales debe permitir también conseguir excelentes criterios para el diseño de las estructuras especiales como son el descargador a vórtice y el pozo de bandejas. Para ello es necesario que el ingeniero diseñador tenga adecuada y suficiente experiencia en el procesamiento, en el análisis y en la interpretación de las mediciones y de los resultados experimentales.
- Desde el punto de vista complementario a lo mencionado en el punto anterior, la sola utilización de equipos y de instrumentos de últimas generaciones o modernos no es garantía para que se hagan el análisis y la interpretación correctas de las medidas experimentales. Se requiere de un buen juicio y una excelente experiencia del ingeniero diseñador, como factor preponderante para lograr el diseño óptimo de la estructura. En este sentido, se reconoce que la modelación física de estructuras hidráulicas es considerada con mucha razón, como ciencia y como arte.

- A la fecha, para el dimensionamiento de las estructuras pozos de bandejas, se presentan diagramas con las bases de diseño expresadas en forma de parámetros con dimensiones. Esta forma de presentación de resultados experimentales adolece de restricciones importantes que impiden justificar su generalización y su extrapolación a dimensiones de prototipos comunes en los sistemas de alcantarillado. Se recomienda la urgente revisión del análisis dimensional presentado en el trabajo de titulación para lograr la derivación de los parámetros adimensionales, que permitan el uso generalizado y justificado de los diagramas y de los criterios de diseño hidráulico de la estructura pozo de bandejas, obtenidos en la investigación presente.
- De igual modo, se recomienda realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros adimensionales derivados frente a las potenciales variaciones de las mediciones de las diferentes magnitudes hidrodinámicas y frente a los “efectos de escala”. Únicamente así se podrán conocer los rangos de confiabilidad de los diagramas y de los criterios expuestos como bases para el diseño de las estructuras hidráulicas. Esta recomendación es, en particular muy importante, para el caso de los Pozos de bandejas con rejas.

6.3 SOBRE EL RANGO DE APLICACIÓN DEL MANUAL BÁSICO DE DISEÑO HIDRÁULICO

- Para escoger la estructura de disipación que se va a implementar se debe considerar algunos aspectos como:

Hidráulicos:

- a) Régimen del flujo en el colector de aproximación
- b) Entrega del flujo aguas abajo
- c) Caudal de diseño

Sanitarios:

- a) Programas de operación y mantenimiento
- b) Capacidad de autolimpieza

c) Aireación requerida

Estructurales:

- a) Esbeltez de la estructura (efectos de pandeo)
- b) Efectos de punzonamiento concentrados
- c) Estabilidad global
- d) Compresiones laterales y tensiones
- e) Efectos de abrasión
- f) Vibración

Económicos:

- a) Relación de costos
- b) Materiales de construcción
- c) Tecnología de construcción
- d) Operación y Mantenimiento

- Para ubicar un descargador a vórtice supercrítico debe disponerse de una altura mínima debido a que las características de la cámara de entrada requieren de dicha altura para su implementación. En alturas pequeñas, la longitud del tubo vertical resultaría insuficiente afectando la disponibilidad de espacio para su funcionamiento.
- El descargador a vórtice presenta la ventaja de que la cámara disipadora puede colocarse en cualquier dirección de giro alrededor de los 360°. El pozo de bandejas, en su configuración actual, permitiría la salida del flujo con cambio de dirección a 90°. Se recomienda ampliar los estudios para modificar la estructura para que permita conectar colectores alineados en otras posiciones del colector de salida.
- El diseño de pozo de bandejas está limitado a solucionar problemas de cambio de nivel y/o dirección en colectores de aproximación con flujo subcrítico. Se recomienda en principio, evitar colocar esta estructura para flujo supercrítico de aproximación.

Sobre la base de los modelos de las estructuras hidráulicas descargador a vórtice y pozo de bandejas, que han sido ensayados en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, se logró en el presente trabajo de titulación, la propuesta de Manuales de Diseño Hidráulico para dichas estructuras de cambio simultáneo de nivel y dirección.

La técnica de la modelación hidráulica es muy eficiente tanto para la preparación de los criterios de dimensionamiento como para la obtención y procesamiento de los parámetros adimensionales más relevantes en el proceso de optimización de estructuras con geometría simple pero que involucran fenómenos hidráulicos complejos. En el presente trabajo de titulación se hizo uso de esta tecnología y una vez más, se demuestra su eficiencia y la importancia de mantenerla como principal fuente de entrenamiento para lograr el correcto funcionamiento de obras hidráulicas.

En este sentido, es oportuno recordar las palabras de Leonardo Da Vinci: “Acuérdate cuando trates del agua, de alegar primero una experiencia después una razón”; expresadas hace varios siglos, que justifican el desarrollo semiempírico de la hidráulica técnica y que mantienen aún su vigencia, en estructuras como los descargadores a vórtice y los pozos de bandejas.

Finalmente, sin que sea menos importante, se debe señalar que el costo de la construcción y operación del modelo es relativamente inferior frente al beneficio que representa el dimensionamiento apropiado de la estructura y la garantía de que su funcionamiento, durante toda la vida útil del proyecto, cumplirá con los requerimientos técnicos planteados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Castro Marco, Hidalgo Ximena, Poveda Rafael, "Estructuras de Cambios de Nivel en Sistemas de Alcantarillado", X Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AEISA, Guayaquil, 2003.
2. Castro Marco, Hidalgo Ximena, Poveda Rafael, "Sobre la Modelación Hidráulica en Obras de Saneamiento", X Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AEISA, Guayaquil, 2003.
3. Naudascher E, Castro Marco, "Hidráulica de Canales y Estructuras Hidráulicas en canales", Traducción al español del texto de igual nombre en alemán. Editorial Limusa, 2000.
4. Vischer, D.L, Hager, W.H., "Energy Dissipators".
5. A.A. Balkema, Rotterdam, 1995. Hydraulic Structures Design Manual Nr 9.
6. Dominguez, F.J, "Hidráulica"
7. Peterka, R.: "Energy Dissipators", Monograph Nr. 29, US Bureau of Reclamation, USA, 1969.
8. Kobus, H, "Hydraulic Modeling", DWWK Heft Nr. 4, 1985
9. Ranga Raju, K.G, "Flow through Open Channels", Tata McGraw-Hill Co., 1981.

10. Hwang, N.H.C, "Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems", Prentice-Hall Inc, 1981.
11. Henderson, F.M, "Open Channel Flow", McMillan Publishing Co. 1966.
12. Rouse, H, "Engineering Hydraulics", John Wiley and Sons, Inc., 1950
Naudascher, E, "Hydrodynamic forces"
13. IAHR, Hydraulic Structures Design Manual No. 3, 1991.
14. Miller, D.S., "Discharge Characteristics" IAHR Hydraulic Structures Design Manual, Nr. 8, Editorial Verlag A. A. Balkema, Rotterdam, Holanda, 1994
15. Rouse, H, "Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers", Editorial Dover Publications, New York, USA, 1981
16. Wood, I.R, "Air Entrainment in Free-Surface Flows", IAHR, Monograph Series on Hydraulic Structures, Intern. Assoc. Hydraulic Research, 1987.
17. Hidalgo, M, "Introducción a la teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas", Escuela Politécnica Nacional, 1997.
18. Tesis Poveda Rafael, "Optimización de las Estructuras de Disipación de Energía en Pozos de Bandejas", Escuela Politécnica Nacional, 2005.
19. Tesis Feria María, Valencia Nathalia, "Estudio Experimental sobre el Pozo Modificado de Bandejas con Rejilla como Disipador de Energía", Escuela Politécnica Nacional, 2004.
20. Tesis Caizaluisa Víctor, "Estudio en Modelo Hidráulico de los Descargadores a Vórtice en los Colectores El Colegio y Ponceano", Escuela Politécnica Nacional, 2002.

21. Tesis Abarca Mirian, Romero Jorge, "Análisis del flujo de aproximación supercrítico hacia el Descargador a Vórtice", Escuela Politécnica Nacional, 1999.
22. Tesis Solano Edison,"Estudio Experimental de la conducción desde la Bocatoma del Río Verde por medio de un descargador a vórtice", Escuela Politécnica Nacional, 1996.
23. Proyecto No. PIC-CEREPS-072, "Análisis del Flujo en Estructuras para Cambios de Nivel y Dirección en Sistemas de Alcantarillado de Ciudades Andinas", Informes No.1, No.2, No.3, Escuela Politécnica Nacional, 2006.