

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y
AMBIENTAL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DOS ALTERNATIVAS
DE DISIPADORES DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL
DE DESVÍO DEL PROYECTO SOPLADORA II**

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

CASTILLO CASTRO SANTIAGO FERNANDO

santy_crv@hotmail.com

DIRECTOR: ING. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE

ximena.hidalgob@gmail.com

QUITO, SEPTIEMBRE 2011

DECLARACIÓN

Yo, Santiago Fernando Castillo Castro, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional; y, que he 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.

Santiago F. Castillo C.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Santiago Fernando Castillo Castro, bajo mi supervisión.

Ing. Ximena Hidalgo B.

DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiar cada uno de mis pasos, llenarme de sus bendiciones y estar siempre presente en la adversidad y momentos difíciles.

A mi familia, mis padres Hugo e Isabel, por haberme brindado la oportunidad de estudiar pese a los sacrificios que esto representó y enseñarme a apuntar siempre hacia arriba; mis hermanos Cristina y Daniel por el apoyo brindado durante todos estos años de estudio; a mis abuelitos Papa Polo, Mama Amada y Abuelita Beba por todas esas palabras de ánimo y consejos de bien que me fueron brindados en los momentos oportunos; a mis tías y demás familiares que fueron parte de este objetivo ya que pese a la distancia siempre estuvieron presentes.

A mi hijo Francisco Josué y su madre Nelly por ser la fuente de inspiración para concluir mi carrera, ya que todo lo hecho durante estos años fue por ellos y para ellos, sepan que intentaré no defraudarles nunca.

A la Ing. Ximena Hidalgo, Dr. Marco Castro e Ing. Marcelo Hidalgo quienes han sido parte de este proyecto y han compartido sus conocimientos y experiencia para la conclusión de este trabajo.

A mis amigos, Rómulo, José, Andrés, Roberto y demás amigos por su amistad desinteresada, momentos agradables y palabras de ánimo en los momentos difíciles de mi vida.

DEDICATORIA

Siendo éste el primero de muchos logros se lo dedico a las personas quienes hicieron posible esto, mis padres, hermanos, mi hijo, esto es por ti mi amor.

Santiago F. Castillo C.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES.....	1
1.1 OBJETIVOS, ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	1
1.1.1 Objetivo General	1
1.1.2 Objetivos Específicos	1
1.1.3 Alcance	2
1.1.4 Justificación	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
1.2.1 Descripción de la Estructura de Disipación de Energía propuesta en el Diseño Original	4
1.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO	5
1.4 LA MODELACIÓN FÍSICA COMO HERRAMIENTA PARA EL PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES A LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	12

2.1	PROCESOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y TIPOS DE ESTRUCTURAS MÁS UTILIZADAS	12
2.1.1	Estructuras más usadas para la Disipación de Energía.....	14
2.1.1.1	Resalto Hidráulico.....	14
2.1.1.1.1	Tipos De Resalto Hidráulico.....	18
2.1.1.2	Deflectores en los Cuencos.....	24
2.1.1.3	Deflectores de Impacto (Chute Blocks).....	25
2.1.1.4	Deflectores de Solera.....	27
2.1.1.5	Umbrales ó Bordillos Terminales	30
2.1.1.6	Cuenca disipador SAF (San Anthony Falls).....	32
2.1.1.7	Cuenca I (Resalto Hidráulico en Plataformas Horizontales).....	35
2.1.1.8	Cuenca II (Para Vertederos de Presas Altas y grandes Estructuras de Canal).....	35
2.1.1.9	Cuenca III (Cuenca Corto para Estructuras en Canales, Pequeñas Descargas y Pequeños Vertederos).....	38
2.1.1.10	Cuenca IV (Cuencos disipadores para estructuras de canal y descargas).....	40
2.1.1.11	Cuenca V (Estructura de Impacto para Tuberías ó Descargas de Canales).....	41
2.1.1.12	Cuenca VI (Diseño Hidráulico de Chorros Huecos).....	43
2.1.1.13	Cuenca VII(Plataforma Dentada para Rampas).....	44
2.1.1.14	Salto en Esquí.....	46
2.2	DESCRIPCIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA ALCANZADA EN LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA EN LAS FASES I, II Y III EN EL PROYECTO SOPLADORA II.....	47
2.3	ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA MEJORAR EL GRADO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA ALCANZADO.....	57

CAPÍTULO 3.....	67
GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	67
3.1 INTRODUCCIÓN.....	67
3.2 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	67
3.3 SEMEJANZA HIDRÁULICA.....	68
3.4 RELACIÓN DE ESCALAS ENTRE LAS MAGNITUDES HIDRODINÁMICAS DE UN MODELO CON SIMILITUD DE FROUDE Y SU PROTOTIPO.....	71
3.5 CONSIDERACIONES SOBRE LA TRANSPOSICIÓN DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS OBTENIDAS EN MODELO.....	72
3.5.1 Velocidad.....	72
3.5.2 Viscosidad.....	72
3.5.3 Tensión superficial.....	72
3.5.4 Presión.....	73
3.6 CONCLUSIONES.....	73
CAPÍTULO 4.....	74
DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN	74
4.1 IMPLANTACIÓN DEL MODELO: ESTRUCTURAS PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS.....	74
4.1.1 Generalidades sobre la infraestructura.....	74
4.1.2 Dimensionamiento del modelo.....	74
4.1.2.1 Alternativas de disipadores de energía para la salida del túnel de desvío.....	76
4.2 INSTRUMENTACIÓN BÁSICA Y EQUIPAMIENTO	87
4.3 CURVAS DE DESCARGA PARA VERTEDEROS DE MEDIDA.....	89
4.3.1 Vertedero rectangular en el tanque de entrada al modelo general.....	90

4.3.2	Vertedero triangular en el tanque antes de la descarga intermedia.....	91
4.3.3	Vertedero triangular en el tanque de salida del modelo general.....	91
4.4	PLAN DE PRUEBAS Y DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE LAS FASES DE OPERACIÓN DEL MODELO.....	92
4.5	CONCLUSIONES.....	95
CAPÍTULO 5.....		96
ANÁLISIS EXPERIMENTAL SOBRE LA OPERACIÓN Y EFICIENCIA DE LOS DISIPADORES PROPUESTOS Y SUS MODIFICACIONES.....		96
5.1	IMPLANTACIÓN DEL MODELO: ESTRUCTURAS PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS.....	96
5.2	ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL DISEÑO Y SUS ALTERNATIVAS.....	96
5.2.1	Cuenca disipador tipo IV.....	96
5.2.2	Salto en esquí – variantes 1 y 2.....	104
5.3	DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL MODELO DE CADA ALTERNATIVA DE DISIPACIÓN.....	119
5.3.1	Disipador tipo IV – variante 2.....	119
5.3.2	Disipador salto de esquí – variante 3.....	122
5.3.3	Disipador salto de esquí – variante 4.....	124
5.4	ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS MODIFICACIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN.....	125
5.4.1	Disipador tipo IV – Variante 2.....	125
5.4.2	Salto de Esquí – Variante 3.....	133
5.4.3	Salto de Esquí – Variante 4.....	144

5.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS Y SUS MODIFICACIONES.....	153
5.5.1	Disipador Tipo IV.....	153
5.5.2	Salto de Esquí.....	155
	CAPÍTULO 6.....	159
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	159
6.1	CONCLUSIONES GENERALES	159
6.2	CONCLUSIONES CUENCO TIPO IV.....	159
6.3	CONCLUSIONES SALTO EN ESQUÍ.....	161
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	164
	ANEXOS.....	166

RESUMEN

En la presente Tesis se expone el estudio realizado en modelo hidráulico de las obras de disipación y entrega de caudales de la descarga del túnel de desvío del proyecto de **“Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras de Interconexión entre las Centrales Hidroeléctricas Molino – Sopladora”** debido a la poca eficiencia obtenida con el diseño original del tipo de disipador propuesto.

En este trabajo de titulación se hará una descripción de los antecedentes por los cuales se decidió realizar este estudio, además se expondrá las bases y criterios teóricos en base a los cuales se respalda este trabajo, se detalla información acerca de lo que involucra la disipación de energía como los tipos de disipadores como resalto hidráulico, deflectores y estructuras normalizadas, además de el funcionamiento de la estructura de salto de esquí y lo que involucra su diseño. Además se hará referencia a la alternativa de disipación que estaba definida en el proyecto original. Se abordará además el tema de la modelación física, misma que es la fundamental para un estudio de esta índole, ya que se planteará teorías para adopción de escalas, semejanzas y las restricciones que implica el dimensionamiento de las estructuras a ser implantadas en el modelo.

Posteriormente se efectuará un análisis del funcionamiento hidráulico de los diseños originales de las dos alternativas de disipación presentadas en este trabajo, análisis de los resultados obtenidos en las pruebas y las recomendaciones para las modificaciones que se efectuarán a cada uno de los casos. Además se analizará todas las variantes efectuadas en cada disipador con el fin de mejorar el funcionamiento para cada caso, para posteriormente hacer un análisis de los resultados de los mismos y de esta manera estar en capacidad para hacer una comparación profunda de las alternativas originales con cada una de sus variantes para finalmente poder brindar recomendaciones de carácter general a ser tomadas en cuenta en el diseño, construcción y mantenimiento de las estructuras de disipación del proyecto.

ABSTRACT

In this final project is exposed hydraulic model study of the energy dissipators and of water discharge diversion tunnel of the project "Hydraulic Model Study of interconnection works between Hydro Molino - Sopladora" due to the low efficiency obtained with the original design of the proposed dissipator.

In this graduation work will be a description of the record on which it was decided to make, this study also will be presented the theoretical bases and criteria which supports this work, detailed information about what is involved in the dissipation energy and the types of dissipaters like hydraulic jump, baffles and standard structures, in addition to the operation of the ski jump structure and involved in their design. Also make reference to the alternative of dissipation that was defined in the original project. It will also address of physical modeling topic wich is fundamental for a study of this nature, and theories that will arise for adoption of scales, similarities and restrictions implied by the design of structures to be implemented in the model.

Subsequently carried out an analysis of the hydraulic operation of two alternatives designs presented in this work, analysis of test results and recommendations for the modifications made to each of the cases. Also be analyzed all variants made at each dissipater in order to improve performance for each case, before make an analysis of the results thereof and thereby be able to make a thorough comparison of the original alternatives for each one of its variants to finally provide general recommendations to be taken into account in the design, construction and maintenance of the structures of dissipation of the project.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

1.1 OBJETIVOS, ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia y las características de operación de dos estructuras de disipación de energía que se acoplen a las condiciones del flujo en la descarga del túnel de desvío del proyecto **“Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras de Interconexión entre las Centrales Hidroeléctricas Molino – Sopladora”**.

Se busca analizar en el modelo físico el funcionamiento hidráulico de los disipadores de energía que reciben el flujo supercrítico o rápido y realizar las modificaciones necesarias para alcanzar un buen funcionamiento de las estructuras.

El funcionamiento del Túnel de Desvío y del Túnel de Descarga Intermedia, con sus correspondientes estructuras de entrada y conducción principal no son objeto del estudio realizado en este proyecto de titulación.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Definir el tipo de disipadores de energía y la escala geométrica seleccionada para la investigación experimental.
- ii. Analizar el marco conceptual que manejan los dos disipadores de energía propuestos en este estudio para las condiciones de operación.
- iii. Verificar experimentalmente la eficiencia hidráulica de las estructuras diseñadas.
- iv. Evaluar el funcionamiento hidráulico, flujo a superficie libre y en régimen supercrítico que reciben las dos alternativas de disipadores de energía a evaluarse.

1.1.3 ALCANCE

El modelo físico reproducirá el patrón de flujo tanto en las obras de entrada a los túneles, a lo largo de los mismos y en su paso por las estructuras de entrega y disipación de energía, permitiendo verificar su dimensionamiento y operación. En este proyecto de titulación se estudiará el comportamiento del flujo en las estructuras de entrega y disipación de energía. No se considerará las estructuras del Túnel de Desvío, del Túnel de Descarga Intermedia y de las estructuras de entrada.

1.1.4 JUSTIFICACIÓN

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la Hidráulica son complejos por lo que no es fácil tratarlos únicamente con modelación matemática. Por esta razón es necesario recurrir al empleo de técnicas experimentales, como una medida adecuada para la obtención de soluciones prácticas en problemas específicos. La modelación física permite la visualización y comprensión de fenómenos más complejos, permitiendo encontrar una solución adecuada. El caso de estudio trata de la disipación de energía en un flujo supercrítico con altas velocidades y presencia de ondas.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El desarrollo del sistema hidroeléctrico Sopladora aprovechará un salto bruto de 385.52 m, en el río Paute, entre las elevaciones 1.314,07 y 928,55 msnm, aguas abajo de la central Molino. La futura central captará las aguas turbinadas que circulan por los túneles de descarga, antes de la restitución al río Paute. La central Molino tiene dos sistemas de conducción independientes (Fases AB y C), construidos entre 1975 y 1991, cada uno para un caudal de diseño de 100 m³/s. Según el diseño propuesto por el Consorcio Gerencia Mazar - CGM -, la captación para la central Sopladora se realizará mediante un sistema de túneles y una cámara de interconexión subterránea localizados en la margen izquierda del río Paute, según plano No PL-1, 2 y 3. La central subterránea de Sopladora sin embargo, se ubicará en la margen derecha del río Paute, entre las quebradas Sopladora y Palmira, previéndose cruzar el río Paute mediante un paso subfluvial. Los estudios de optimización de potencia de la central Sopladora definen la instalación de

tres unidades generadoras tipo Francis, de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, cada una, para una altura neta de 362,56 m. La potencia instalada de la central será 487 MW y permitirá generar anualmente 2.745 GWh al Sistema Nacional Interconectado. Las “Obras de Interconexión” conectan hidráulicamente las Centrales Hidroeléctricas Paute - Molino y Sopladora. Se considera que la conexión directa asegura que la calidad de las aguas se mantiene, evitando que los sedimentos procedentes tanto de la cuenca intermedia Amaluza - Guarumales como del dragado del embalse de Amaluza puedan llegar hasta la Central Sopladora. El objetivo principal de las obras de interconexión es obtener la conexión hidráulica apropiada entre los sistemas de las centrales Molino-Sopladora.

Entre los principales componentes de este sistema de obras se incluye un “Túnel de Descarga Intermedia”, que entregará sus aguas al río Paute y que operando conjuntamente con los vertederos de los túneles de descarga de la Central Molino permitirá que este aprovechamiento continúe funcionando normalmente, a pesar de que la Central Sopladora haya dejado de operar. Por otro lado, con el propósito de prevenir y evitar la potencial inundación de la Central Hidroeléctrica Paute ante un eventual fenómeno de deslizamiento de tierras, en el sector de la casa de máquinas de la central Molino, se prevé la construcción del “Túnel de Desvío” del río Paute.

El caudal de diseño utilizado para el dimensionamiento del túnel es de a $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al caudal de crecida con un período de retorno de 10 años, afectado por la laminación que sufriría en los embalses Mazar y Amaluza, más los caudales de crecida de la cuenca intermedia, con el mismo período de retorno, entre la presa Amaluza y el sitio de casa de máquinas de la Central Molino – Cosnsorcio Gerencia Mazar. En el caso de presentarse un deslizamiento en el sector de Guarumales, se tendrá que trabajar inmediatamente para despejar el cauce del río; labores que podrán durar varias semanas, dependiendo del volumen deslizado. Durante estos eventos todo el caudal del río ingresaría al túnel y las centrales Molino y Sopladora podrían continuar operando normalmente.

1.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO

En general la investigación experimental sobre la calidad del funcionamiento hidráulico del túnel de desvío y su obra de disipación de energía fue desarrollada en tres etapas. Las principales observaciones planteadas se resumen a continuación:

En la primera fase¹, el análisis experimental de los diseños originales entregados por el Consorcio Gerencia Mazar a la Escuela Politécnica Nacional permitió verificar lo siguiente:

- En el tramo final del Túnel de Desvío, antes de la descarga hacia el dissipador de energía, la sección transversal circular es insuficiente para los caudales máximos, debido al efecto de control, producido por la presencia de la estructura tipo Kumin a una corta distancia aguas abajo de la sección transversal del túnel.
- La eficiencia del dissipador tipo Kumin es baja para la serie de caudales ensayados como se presenta en la siguiente figura en donde se observa que los valores mayores de disipación de energía se obtienen para los caudales más bajos. Sin embargo el porcentaje de disipación de energía alcanza como máximo un 50% para $Q=100\text{m}^3/\text{s}$, 46% para $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ y 30% para $Q=950\text{m}^3/\text{s}$.

¹ Informe de la Primera Fase del Proyecto de “Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras de Interconexión entre las Centrales Hidroeléctricas Molino – Sopladora”

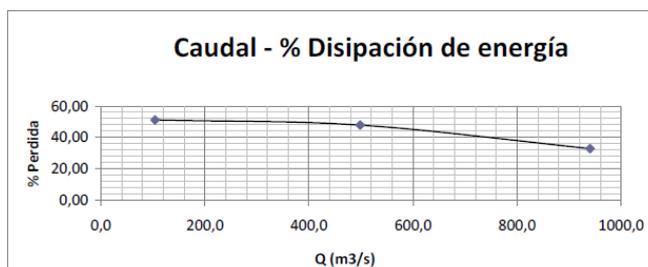


Figura No. 2.- Curva representativa de la disipación de energía obtenida con el dissipador kumin en función del caudal.

- Las velocidades de flujo a la salida del dissipador superan los valores admisibles para garantizar la estabilidad del enrocado de protección así como de las márgenes y cauce natural del río Paute. Existe una distribución no uniforme del caudal y velocidades en el ancho de la sección transversal, lo que dificulta la operación de la estructura de disipación. En conclusión el dissipador de impacto tipo Kumin, resultó poco efectivo para las características hidrodinámicas del flujo a la salida del túnel de desvío.



Fotografía No. 1.- Vista frontal del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de 1.022 m³/s.

En la segunda Fase², se efectuaron los cambios en la geometría del disipador que se presentan a continuación con los resultados observados:

- Se aumenta la altura de la estructura tipo Kumin para de esta manera mejorar el porcentaje de disipación de energía a la salida. El control que ejerce la estructura kumin para los caudales mayores a $500\text{m}^3/\text{s}$, ocasiona que el flujo ya no escurra con superficie libre en el tramo final del túnel de desvío.



Fotografía No. 2.- Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del disipador tipo Kumin modificada con Caudal = $900\text{ m}^3/\text{s}$. Sin control aguas abajo

- Se eliminó la estructura tipo Kumin y se incrementa gradualmente el ancho de la plataforma de salida del túnel.
- Con la eliminación de la estructura tipo Kumin se observa un mejor funcionamiento a pesar de que el porcentaje de disipación de energía sigue siendo bajo. La falta de control desde aguas abajo puede explicar este comportamiento, que no es aceptable dado que originaría profundidades de socavación muy grandes en el área de entrega al río Paute.

² Informe de la Segunda Fase del Proyecto de “Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras de Interconexión entre las Centrales Hidroeléctricas Molino – Sopladora”



Fotografía No. 3.- Vista superior del funcionamiento de la estructura de salida con $QTD=951\text{m}^3/\text{s}$.

En la tercera fase³ de la investigación se concluye lo siguiente:

- Se disminuyó la cota de salida del túnel con respecto al diseño original incrementando la longitud inicial del tramo del túnel con pendiente 18% y se mantiene la pendiente del 2% en el tramo restante hasta la descarga.
- Se cambió la geometría de la sección transversal del túnel mediante una transición de $\Phi=9\text{m}$ a sección tipo baúl $9\text{X}9\text{m}^2$.
- Se amplió la 2ª curvatura en planta del túnel de desvío de $R=300\text{m}$ a $R=400\text{m}$.
- Se separó el trazado del túnel de desvío y del túnel de descarga intermedia, con lo que el rango de operación para el dissipador del túnel de desvío se reduce.
- El funcionamiento con la geometría modificada para la disipación de energía presenta mayor eficiencia que la registrada con la geometría original, sin embargo se mantiene una disipación de energía baja.

³ Informe de la Tercera Fase del Proyecto de “Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras de Interconexión entre las Centrales Hidroeléctricas Molino – Sopladora”

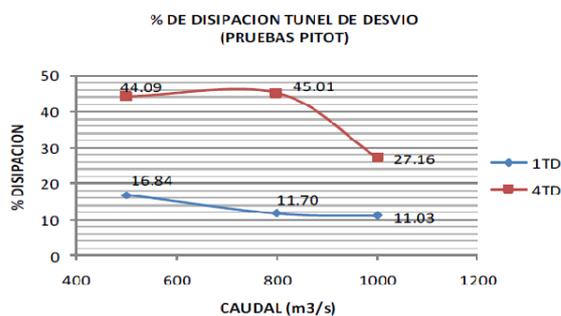
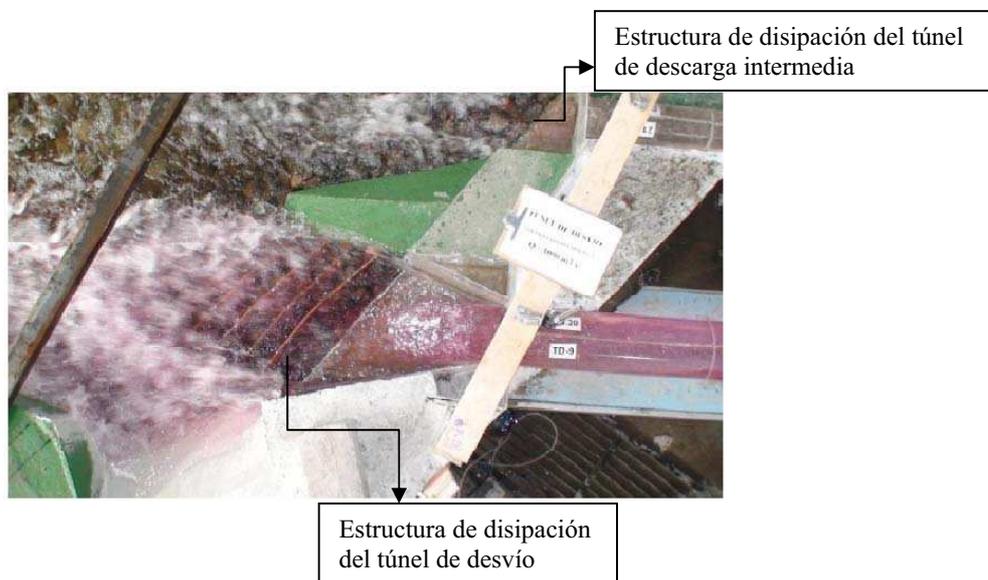


Figura No. 3.- Curva representativa de la disipación de energía obtenida con la geometría modificada en función del caudal.

- Los niveles alcanzados de disipación de energía no son suficientes para garantizar la estabilidad del enrocado de protección y del cauce natural. Se observa un alto poder de arrastre en el flujo de entrega que podría afectar el tramo que recibe el flujo de salida desde los túneles de desvío.
- Para los caudales altos existe un alto riesgo de socavación en el cauce del río Paute.



Fotografía No. 4.- Vista en planta del funcionamiento de la estructura modificada a la salida del Túnel de Desvío (Q =1000 m³/s)

1.4 LA MODELACIÓN FÍSICA COMO HERRAMIENTA PARA EL PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES A LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Los modelos hidráulicos son una herramienta muy útil para resolver problemas de ingeniería hidráulica debido a que el cálculo teórico no ha logrado alcanzar la competencia suficiente para reproducir fielmente la complejidad de éstos procesos o fenómenos de flujo.

Los modelos reducidos al colaborar con la obtención de un diseño optimizado permiten un mayor ahorro, gracias a las mejoras introducidas, a la corrección de defectos que hubieran obligado a obras futuras de reparación o al mejor conocimiento y a la mayor seguridad que se consigue.

La base teórica de modelos físicos reducidos es la semejanza dinámica entre prototipo y modelo, es decir la igualdad de fuerzas que participan en el fenómeno físico. La semejanza dinámica completa es imposible, es decir, cada una de las fuerzas presentes en el problema se reduce de manera diferente (es decir no en la misma proporción) de prototipo a modelo. Sin embargo los modelos pueden ser una buena representación del movimiento real siempre y cuando se identifiquen las fuerzas dominantes en el fenómeno de flujo y se mantenga la semejanza al menos en estas fuerzas.

Los problemas de obras hidráulicas son dominados por la geometría, las fuerzas de gravedad si el flujo se desarrolla con superficie libre, y la ley de semejanza en este caso corresponde a la de Froude.

Para el análisis de la disipación de energía, sin embargo la fuerza dominante es producida por la viscosidad y la ley de semejanza corresponde al criterio de Reynolds.

La ausencia de similitud para las fuerzas de importancia secundaria produce los efectos de escala, que durante la investigación deben ser reducidos al mínimo y que deben ser evaluados durante el análisis y el procesamiento de la información. El presente estudio, en términos globales, se refiere al flujo a través de una estructura

hidráulica con flujo a superficie libre. Se trata de un flujo rápido bajo el efecto de la gravedad, que simultáneamente produce disipación de energía, con alto porcentaje de introducción de aire y puede generar problemas de inestabilidad y de cavitación por las altas velocidades.

El modelo entonces debe ser no distorsionado: las características geométricas deben estar representadas a detalle y su influencia debe ser idéntica tanto en el modelo como en el prototipo.

Al trabajar en modelo y prototipo con el mismo fluido no es posible cumplir la semejanza según el criterio de Froude y de Reynolds simultáneamente, por lo que es necesario que tanto en modelo como en prototipo el efecto de la viscosidad se mantenga despreciable, esto obliga a que el modelo opere siempre con flujo turbulento.

Para reproducir en el modelo la misma pendiente de la línea de energía que en el prototipo es necesario que el factor de fricción en la ecuación de Darcy – Weisbach (pérdidas por fricción) sea también el mismo en modelo y prototipo. Por esta razón se requiere que el modelo sea construido con contornos lisos.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

2.1 PROCESOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y TIPOS DE ESTRUCTURAS MÁS UTILIZADAS

El objetivo de las estructuras de disipación de energía es la energía cinética excedente en un flujo, de modo que evite el riesgo de socavación de la estructura misma y a su vez de las obras que se ubican hacia aguas abajo de la misma.

La energía es disipada mediante procesos de turbulencia en la difusión de la velocidad entre las partículas de agua que entran con una energía cinética alta dentro de una masa de agua estática ó de menor velocidad. Bajo este concepto la energía mecánica se convierte en fricción.

El proceso de disipación se logra habitualmente de dos maneras:

- a) Ingreso de una partícula de fluido con alta velocidad dentro de una masa de agua, conocido como difusión. La disipación de energía corresponde a la consumida en la formación de vórtices producidos en las zonas de alto gradiente de velocidad. Por tanto para lograr altos niveles de disipación es importante generar zonas de alta turbulencia.

- b) Chorros Libres.- La disipación de energía también aparece como resultado de la resistencia del aire ejercida durante la caída. Esta disipación es significativa si la altura de caída es pequeña y la

diferencia de velocidades entre el chorro y el aire es considerable.

En ambos casos se logra una mayor disipación de energía si la perturbación provocada en la masa de fluido (agua ó aire) es alta, dentro de la cual se introduce el chorro de agua con alta energía cinética.

Dado que generalmente las estructuras de disipación de energía son costosas, se introduce frecuentemente accesorios adicionales como pantallas o superficies de impacto, ubicados dentro de la masa de agua, con el fin de elevar el grado de turbulencia y por tanto incrementar la eficiencia del disipador.

Una eficiente disipación de energía puede lograrse mediante varios métodos que se categorizan de la siguiente manera:

- Generación de fuertes gradientes de velocidad que incrementan el grado de turbulencia como por ejemplo el alcanzado en las siguientes estructuras:
 - Expansiones Bruscas,
 - Cambio bruscos de dirección del flujo,
 - Obturadores,
 - Umbrales,
 - Vigas y pilas deflectoras,
 - Flujos opuestos,
 - Contornos rugosos y
 - Cámaras de vórtice.

- Generación de interfaces turbulentas agua – aire en:

- Descarga de chorros libres y
- Desintegración de chorros libres.

Se debe considerar también la inevitable generación de perturbaciones en el flujo que pueden tener graves consecuencias para la estabilidad de las obras, como:

- Pulsaciones,
- Vibraciones,
- Erosión,
- Abrasión, y
- Cavitación.

Los disipadores deben ser diseñados para soportar todos estos efectos ineludibles desde el punto de vista dinámico. Con el tiempo cualquier tipo de material se volverá vulnerable ante estos efectos, por lo que se deben aplicar adecuadamente los límites físicos que imponen los materiales a emplearse.

2.1.1 ESTRUCTURAS MÁS USADAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA

2.1.1.1 RESALTO HIDRÁULICO

El resalto hidráulico es un fenómeno físico que ocurre cuando el flujo cambia de régimen de supercrítico a subcrítico. Durante esta transición se produce una gran turbulencia y disipación de energía.

Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio en el que tiene lugar el cambio violento de régimen de flujo como se muestra en la figura.

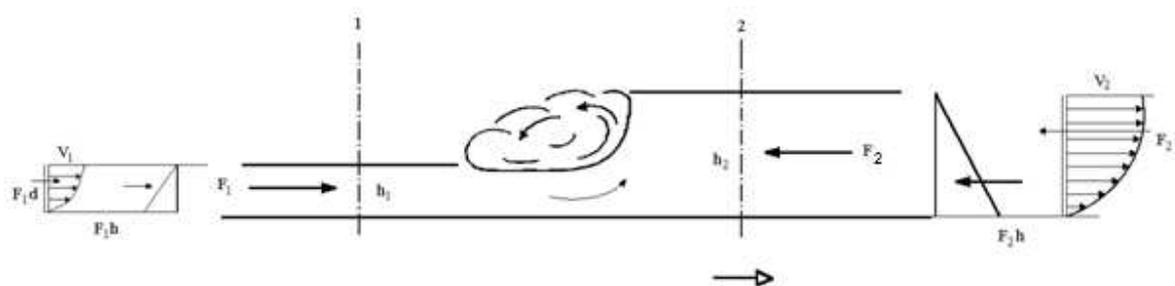


Figura 4. Resalto Hidráulico

En la sección 1 se presentan dos fuerzas una hidrostática F_{1h} y un dinámica F_{1d} , y en forma similar pero en sentido contrario en la sección 2 F_{2h} y F_{2d} , en ambos sitios la sumatoria de fuerzas da como resultado las fuerzas F_1 y F_2 respectivamente.

En el estado de equilibrio, ambas fuerzas tienen la misma magnitud pero dirección contraria (la fuerza F_{1h} es menor a F_{2h} , inversamente F_{1d} es mayor a F_{2d}).

Debido a la posición de las fuerzas resultantes, ambas están espaciadas una distancia d , lo cual genera un par de fuerzas de la misma magnitud pero de sentido contrario.

En razón a la condición de líquido, las partículas que la componen el flujo toma la dirección de las fuerzas predominantes, presentándose la mezcla del agua con líneas de flujo superficiales moviéndose en sentido contrario a la dirección de flujo y de manera inversa en la zona cercana a la solera.

El repentino encuentro entre las masas de líquido y el inevitable choque entre partículas, provocan la generación de un medio líquido de gran turbulencia que da lugar a la absorción de aire de la atmósfera, dando como resultado un medio mezcla agua-aire.

El tirante antes y después del resalto hidráulico resulta función del Número de Froude del flujo de ingreso.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * y}} \quad \text{Ec. 1}$$

Fr: Número de Froude

g: aceleración de la gravedad

y: calado en la sección de interés

Con ayuda de la expresión del número de Froude (número adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y de gravedad), se llega a la expresión adimensional de tirantes conjugados:

$$\frac{y_1 * V_1}{g} * \left[V_1 - \frac{y_1}{y_2} * V_1 \right] = \frac{1}{2} * (y_2 - y_1) \quad \text{Ec. 2}$$

y_1 : calado al pie del resalto

V_1 : Velocidad de flujo en el pie del resalto

y_2 : calado a la salida del resalto

g: aceleración de la gravedad

Las características del resalto hidráulico han sido aprovechadas para reducir las velocidades de flujo en canales hasta valores que permitan el escurrimiento sin ocasionar tensiones de corte superiores a los límites permitidos por los materiales que componen el perímetro mojado. El lugar geométrico en el que se presenta el resalto se denomina colchón hidráulico.

Un resalto hidráulico estable se formará en el canal si el número de Froude F_1 , la profundidad de flujo y_1 y la profundidad aguas abajo y_2 , satisfacen la ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad \text{Ec. 3}$$

y_1 : calado al pie del resalto

y_2 : calado a la salida del resalto

F_1 : Número de Froude al pie del resalto

Esta ecuación fue determinada por medio de muchos datos experimentales y a su vez puede representarse en la siguiente curva.

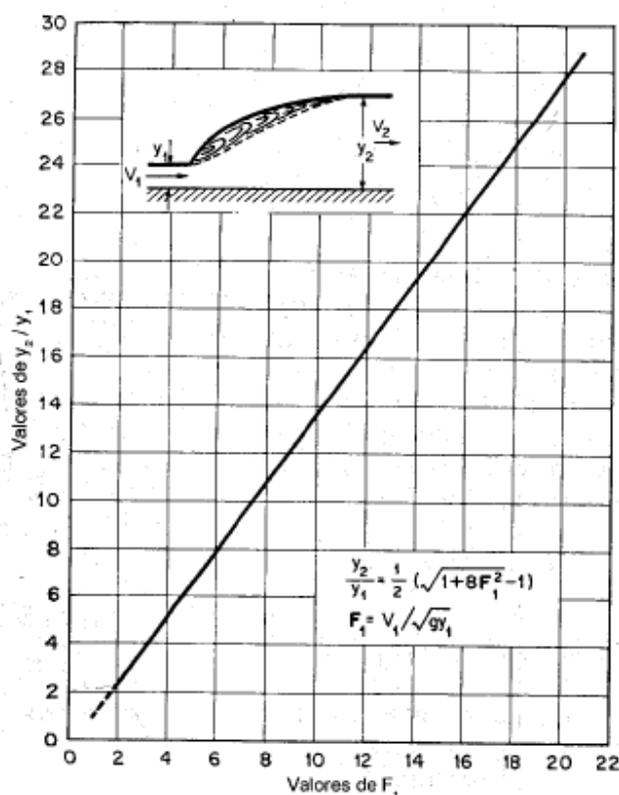


Fig. 5 .- Relación entre F_1 y y_2/y_1 para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal.

Fuente HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow.

2.1.1.1.1 Tipos De Resalto Hidráulico

De acuerdo con los estudios realizados por el U.S. Bureau of Reclamation los resaltos pueden clasificarse convenientemente por el número de Froude del flujo entrante F_1 de la siguiente manera:

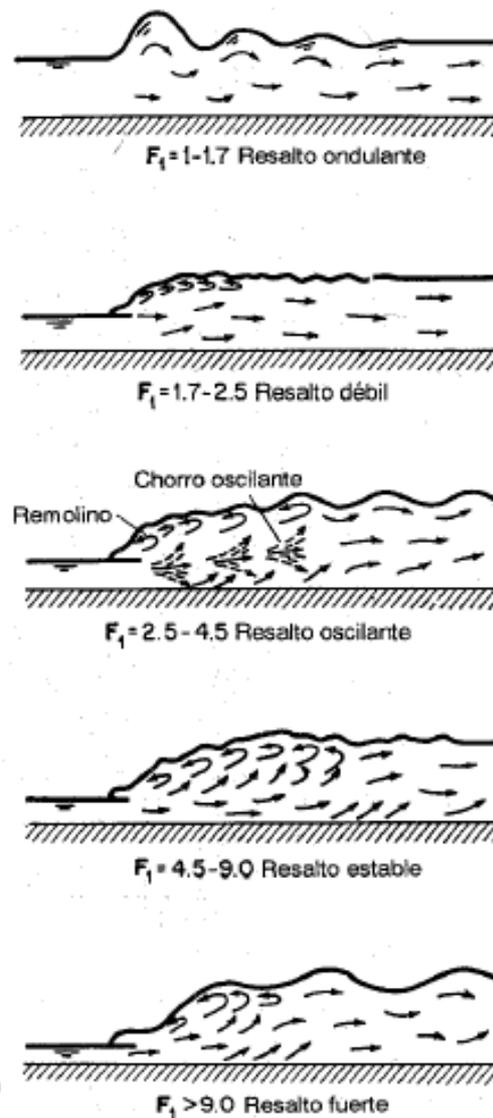


Fig. 6.- Tipos de resalto hidráulico

$F_1 = 1 - 1.7$, la superficie de agua muestra ondulaciones y se presenta el *resalto ondulante*.

$F_1 = 1.7 - 2.5$, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme, la pérdida de energía es relativamente baja y este se denomina *resalto débil*.

$F_1 = 2.5 - 4.5$, existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hacia la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad, cada oscilación produce una ola grande que puede viajar mucha distancia causando daño, este se denomina *resalto oscilante*.

$F_1 = 4.5 - 9.0$, la extremidad aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor, disipa de 45% - 70% de la energía y se denomina *resalto estable*.

$F_1 = 9.0$ o mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo y la superficie del agua podría mantenerse rugosa, este resalto es brusco pero efectivo, logrando una disipación de hasta un 85%, este se denomina como *resalto fuerte*.

Características del Resalto Hidráulico Clásico

En el resalto la pérdida de energía es igual a la diferencia de energías específicas entre las secciones antes y después del resalto de esta manera:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad \text{Ec. 4}$$

La pérdida de energía relativa puede determinarse a través de la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 3)^3}{8 * (2 + F_1^2)(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)} \quad \text{Ec. 5}$$

La relación entre la energía específica antes y después del resalto se denomina eficiencia:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{8F_1^2 + 1})^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad \text{Ec. 6}$$

La altura del resalto será la diferencia entre las profundidades antes y después del resalto $h_j = Y_2 - Y_1$ y si se la expresa relación con E_1 , se obtiene la altura relativa:

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{y_2}{E_1} - \frac{y_1}{E_1} \quad \text{Ec. 7}$$

Con estas características dibujadas se obtiene las curvas características del Resalto Hidráulico Clásico:

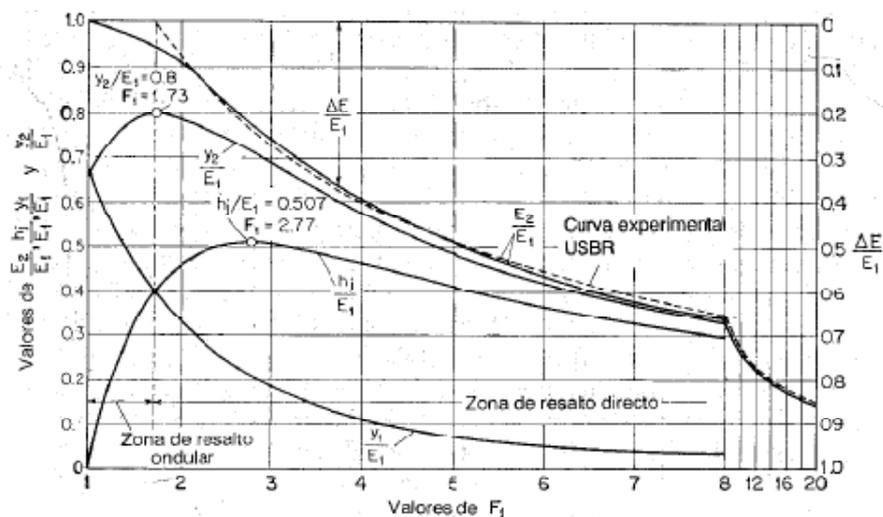


Fig. 7.- Curvas características del Resalto Hidráulico Clásico
Fuente HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow.

Estas curvas características darán al diseñador una idea clara del rango de condiciones en las cuales la estructura debe operar.

Longitud del Resalto Hidráulico

Esta puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino.

Esta longitud no puede ser determinada fácilmente por la teoría, pero ha sido investigada de manera experimental, dando como resultado la siguiente curva que relaciona la longitud del Resalto Hidráulico en función del número de Froude (F_1).

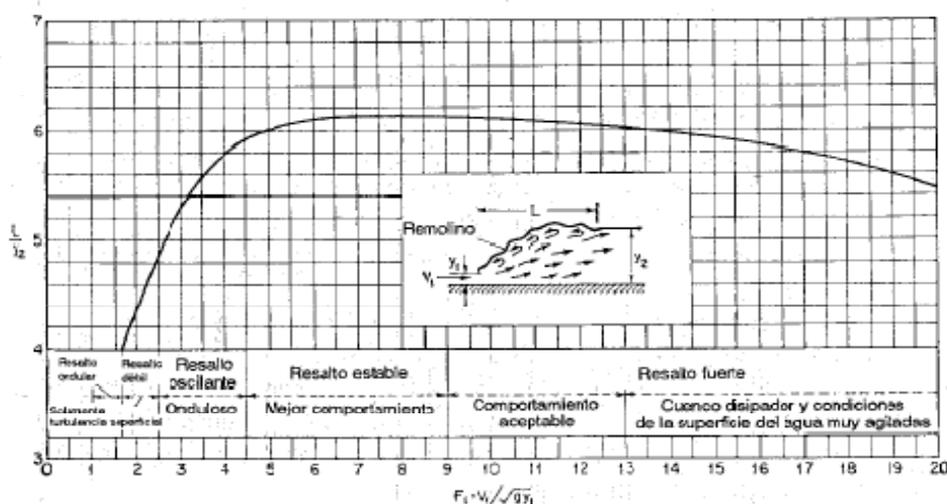


Fig. 8.- Longitud en términos de la profundidad secante y_2 de resaltos en canales horizontales.

El perfil superficial del Resalto

El conocimiento del perfil de la superficie libre de un resalto hidráulico es necesario en el diseño del borde libre para los muros laterales del cuenco dissipador donde se presenta el resalto.

También es importante para determinar las presiones en el fondo del cuenco ya que estas son las que rigen el diseño estructural, experimentalmente se ha comprobado que la presión sobre el fondo del cuenco es prácticamente la misma que indica el perfil de la superficie libre de agua.

El perfil superficial de un resalto hidráulico puede representarse mediante curvas adimensionales para varios valores de número de Froude (F_1) como se muestra a continuación:

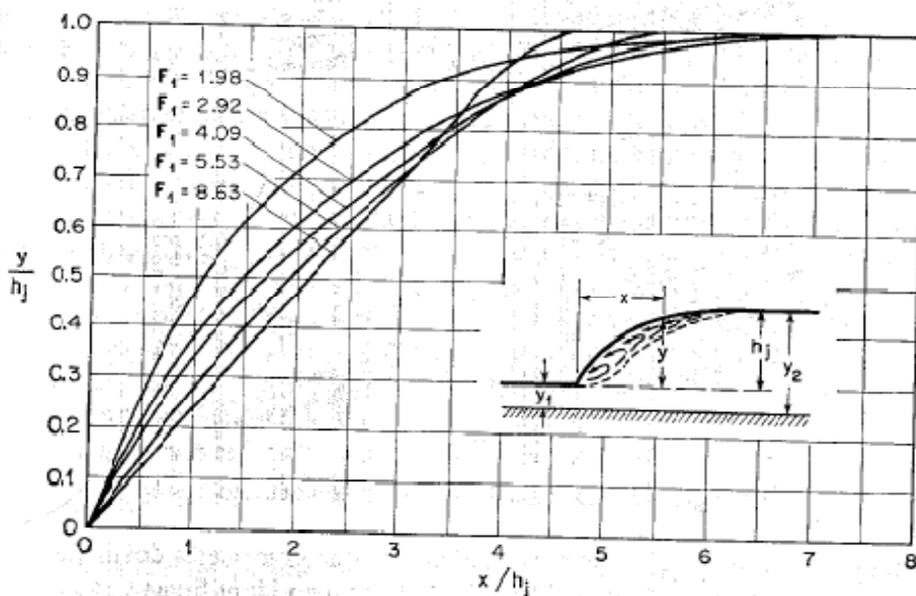


Fig. 9.- Perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos en canales horizontales.

Posición del Resalto

La posición del resalto dependerá únicamente de la profundidad aguas abajo del resalto como se muestra a continuación:

Caso 1:

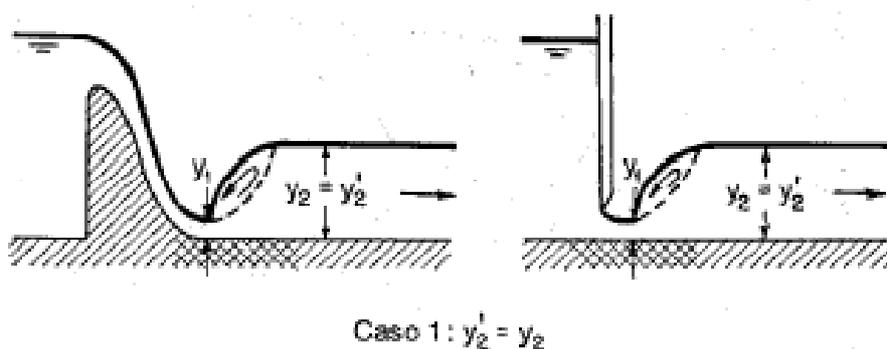


Fig. 10.- Resalto formado inmediatamente aguas abajo de y_1 .

El resalto hidráulico se presentará únicamente cuando el calado aguas abajo y_2' es igual a la profundidad y_2 seciente a y_1 . En este caso los valores de F_1 , y_1 , y y_2 satisfarán la ecuación 3, y el resalto ocurrirá inmediatamente aguas abajo de la profundidad y_1 .

Caso 2:

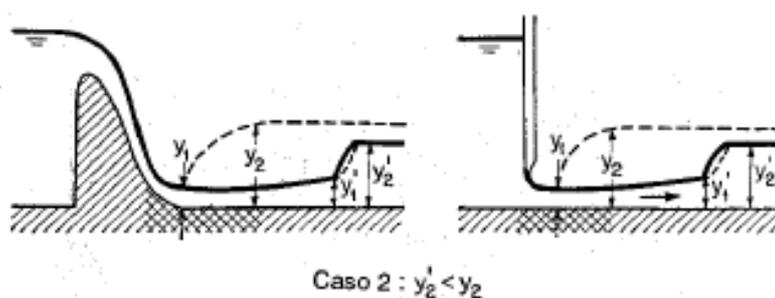


Fig. 11.- Resalto rechazado

Este gráfico representa el caso en el que la profundidad aguas abajo y_2' es menor a la profundidad y_2 , lo que significa que el resalto hidráulico se va a desplazar hacia aguas abajo hasta un punto donde otra vez se satisfaga la ecuación 3, este caso se debe procurar evitarlo ya que la consecuencia de un resalto rechazado es que este socavará fuera de la zona de resistente y podrá producirse en zonas sin protección, pudiendo resultar en una severa erosión.

Caso 3:

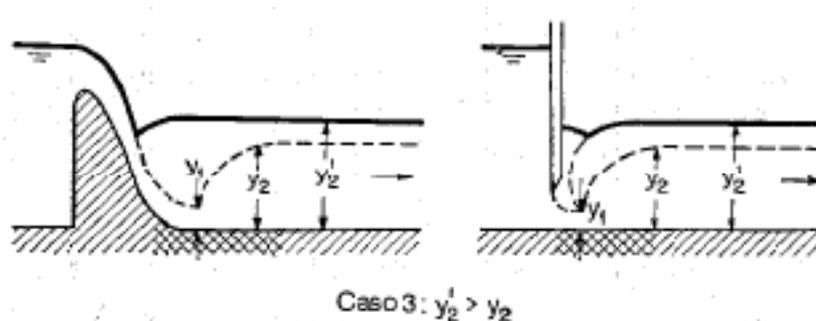


Fig. 12.- Resalto Sumergido

En este caso la profundidad aguas abajo y_2' es mayor a la profundidad y_2 , lo cuál significa que el resalto hidráulico se desplazará hacia aguas arriba hasta ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Esta es la forma más segura de mantener el resalto en la zona resistente, pero a su vez se pierde la eficiencia de la estructura ya que se disipará muy poca energía.

2.1.1.2 Deflectores en los Cuencos

Las técnicas adoptadas en el dimensionamiento de cuencos de disipación, consiste en modificar las características del resalto principalmente en la reducción de su longitud por medio de las estructuras que controlan este parámetro.

Este objetivo se logra llevar a cabo con la implementación de elementos disipadores cuya eficiencia puede evaluarse por el efecto que tienen en la disminución de la longitud, estabilización y fijación del resalto hidráulico.

Estos resultados pueden obtenerse y aplicarse gracias a las extenuantes evaluaciones experimentales en modelos ó a su vez por medio de observaciones a lo largo de años sobre estructuras ya existentes.

2.1.1.3 Deflectores de Impacto (Chute Blocks)

También conocidos como bloques de caída ó dados de escarpa ó declive.

Su función es básicamente canalizar el flujo que llega y levantarle una porción desde el piso, como consecuencia de esto obtenemos una longitud más corta del resalto hidráulico, con una tendencia hacia su estabilización y mejorando su desarrollo.

A su vez estos deflectores se dividen según su funcionamiento aireado o sin aireación.

Deflectores sumergidos

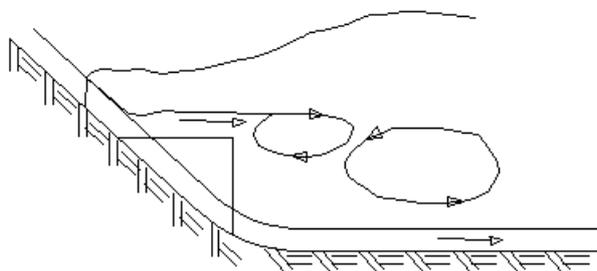


Fig. 13.- Deflectores sumergidos

Estos actúan de tal forma que dividen el flujo en una serie de chorros parte de los cuales siguen su dirección y los demás se elevan, con lo cual se incrementa la turbulencia, creándose de esta manera fuertes gradientes transversales de velocidad y de esta manera aumentando la disipación de energía.

Estos bloques suelen ser triangulares y ubicados en forma paralela a la dirección del flujo, actuando en la mayoría de casos sumergidos para los caudales de diseño.

En general según los datos de laboratorio, estos bloques no funcionan de manera muy eficiente si están operando muy ahogados ó sin estar sumergido.

Deflectores Aireados

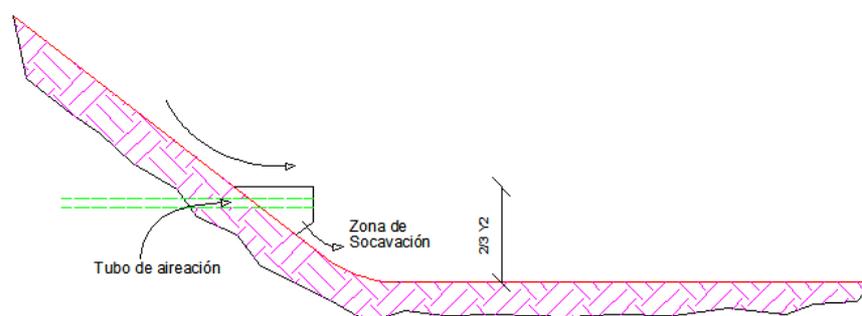


Fig. 14.- Deflectores con Aireación

Estos deflectores actúan dividiendo el flujo de tal forma que la porción que circula entre los dientes se expande y más tarde forma en el cuenco el remolino, mientras que la porción de agua que pasa por sobre éstos es lanzada contra ese remolino provocando un impacto con gran turbulencia aumentando de esta manera en un gran porcentaje la disipación de energía en una menor longitud, misma que alcanza hasta un 50% la longitud del resalto.

Al contrario de los deflectores sumergidos, en este caso no importa que los dientes no funcionen sumergidos, además el cuenco disipador debe tener la longitud suficiente de tal forma que el impacto de los chorros quede situado dentro del mismo.

Esto lleva a ubicar el borde de despegue a una cota ligeramente inferior al máximo nivel aguas abajo, que debe ser fijado mediante ensayo estando relacionado este parámetro con el caudal para el cual se necesita el mejor funcionamiento del disipador, como orden de magnitud se puede iniciar en un valor de tanteo igual a $2/3 y_2$.

Los dientes dan lugar a una succión aguas abajo del borde de despegue, producida por la alta velocidad del agua, lo que puede dar lugar a cavitaciones importantes, para evitarlas conviene darle una aireación en esta zona, esto se logra mediante la colocación de un dispositivo, que podría ser un tubo, que aporte a esa zona con aire del exterior.

Los dientes deben estar bien armados y anclados estructuralmente a la solera, debido a que los esfuerzos son considerables, y además el acero ayuda a su conservación, sin embargo es frecuente que los dientes sufran daños y hay que repararlos.

2.1.1.4 Deflectores de Solera

Estos actúan por impacto y la difusión del chorro que incide en ellos logrando un gran incremento de la turbulencia que contribuye a la estabilización del resalto, produce un acortamiento de la longitud del mismo y de manera simultánea, permite una reducción en la profundidad del calado conjugado, según puede observarse en la aplicación de la ecuación de la cantidad de movimiento, teniendo en cuenta la fuerza producida por ellos.

Considerando un ancho unitario de canal, la ecuación de cantidad de movimiento queda definida de la siguiente manera:

$$F_B = \rho * q * (V_1 - V_2) - \frac{\rho * q * (y_2^2 - y_1^2)}{2} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde,

F_B : Fuerza ejercida por los bloques de impacto por unidad de ancho del canal

q : Caudal por unidad de ancho del canal (Caudal Unitario)

V_1, V_2 : Velocidades antes y después del resalto Hidráulico

y_1, y_2 : Calados conjugados antes y después del resalto

El estudio de efectividad de estos deflectores debe ser realizado usando modelos reducidos y aprovechando la experiencia de comportamiento en el prototipo de las ya diseñadas.

El parámetro más usado para caracterizar la efectividad del comportamiento de los deflectores de solera ha sido C_d , definido así:

$$C_d = \frac{F_B}{1/2 * \rho * V^2 * A_B} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde,

ρ : Densidad del fluido

V : Velocidad característica a la entrada

A_B : Área Característica del bloque

Teniendo en cuenta la alta turbulencia existente puede ser despreciado el efecto de la viscosidad, de los ensayos efectuados se obtiene que:

$$C_d = f\left(F_1, \frac{\Delta z}{y_1}, \frac{X_0}{y_2}, \frac{W}{\Delta z}, \frac{s}{\Delta z}, \text{forma}\right) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde,

F_1 : Número de Froude de aproximación

Δz : Altura de los deflectores de solera

y_1 : Calado al inicio del resalto

X_0 : Distancia desde el inicio del resalto hasta la cara del bloque deflector

y_2 : Calado después del resalto

w : Ancho del bloque deflector

s : Espaciamiento entre bloques deflectores

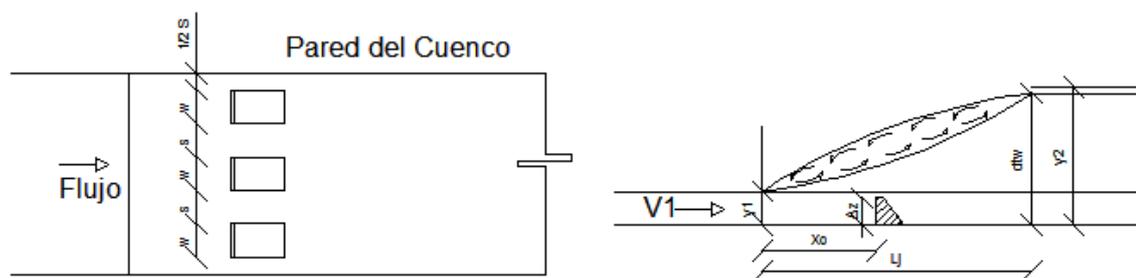


Fig. 15.- Especificación de parámetros para C_d .

Además de las investigaciones de laboratorio, es fundamental aprovechar las experiencias surgidas de la observación del comportamiento real de estas estructuras:

- Si se usan dos filas de bloques, la segunda fila debe colocarse entre los espacios de la primera fila, para provocar el impacto de los chorros que permite pasar la primera fila, provocando con esto un aumento de las corrientes turbulentas que absorben una considerable cantidad de energía.
- Los bloques deben ocupar un ancho entre el 40% y 55% del ancho del cuenco y es más favorable cuando se colocan de forma perpendicular a la dirección del flujo entrante.

Para la velocidad de entrada de flujo $V_1 > 15$ m/s, existe peligro de cavitación, en especial en los lados de los bloques y en la primera fila de éstos. Otra posibilidad de daño es a causa de las gravas y otros materiales que arrastra el río en las crecidas.

Para disminuir los problemas de erosión en los bloques se puede plantear a las siguientes recomendaciones:

- Redondear las esquinas de los bloques.
- Colocar los bloques deflectores a una distancia suficiente de modo que exista sumergencia para que así éstos no reciban un impacto directo de los chorros de altas velocidades.
- Usar una sola fila de bloques.

2.1.1.5 Umbrales ó Bordillos Terminales

Los umbrales terminales se disponen en forma de muro continuo ó dentado al final del cuenco, provocando un aumento de turbulencia por choque y difusión del chorro residual (en caso de ser dentado),

produciéndose simultáneamente una elevación del flujo que provoca a la salida un remolino, que con el aporte del material, se disminuye la erosión al pie del cuenco, también contribuye a la estabilización del flujo y a la disminución del calado conjugado.

Normalmente se usan los de forma triangular, con cara vertical aguas abajo (triangular) ó bien con las dos caras inclinadas (schoklistch), aunque a veces se usa el trapecial con la cara vertical aguas arriba, puesto que sufre menos que los anteriores ante el ataque de las gravas arrastradas.

Sin embargo en muchas ocasiones es recomendable usar el de tipo dentado rehbock ó similares, por su buen comportamiento y eficiencia de dividir el flujo parte del cual choca con la pared vertical y el resto pasa a través de los dientes.

Si la profundidad de la lámina en el río aguas abajo del cuenco es menor que la profundidad del calado conjugado, la disposición de una estructura de umbral final hace que la excavación necesaria sea menor.

La salida del umbral final debe estar ubicado en una cota algo mayor a la del terreno aguas abajo a fin de facilitar la formación del remolino y a su vez evitar el ingreso de material de afuera al cuenco a causa del remolino.

La formación de este remolino es muy importante incluso para la estabilidad del resalto en un cuenco corto, además debe tratar de garantizarse que exista el material que aporte a la protección del pié de la cimentación.

Se debe evitar que el flujo llegue en forma asimétrica ó concentrada, debiendo ser su distribución lo más uniforme posible, en estas condiciones la pendiente de llegada tiene poco efecto en la formación

del resalto, sin embargo para pendientes mayores a 1:1 se efectúe un unión circular entre la rápida y la solera del cuenco ($R \geq 4y_1$).

ESTRUCTURAS NORMALIZADAS

Estas estructuras muestran como característica que las dimensiones se fijan en función del número de froude del flujo entrante y de los calados conjugados, sin embargo no se puede asegurar su óptimo funcionamiento sin antes haberlo ensayado en modelos hidráulicos a escala.

2.1.1.6 Cuenco disipador SAF (San Anthony Falls)

Está recomendada para uso en pequeñas estructuras como vertederos, obras de salida y estructuras de canal que tengan como característica un Froude comprendido entre $F_1=1.7$ a $F_1=17$. La reducción de la longitud es alrededor de 80%.

La longitud L_B para el cuenco disipador para números de froude entre $F_1=1.7$ a $F_1=17$ se determina mediante:

$$L_B = \frac{4.5 * y_2}{F_1^{0.76}} \quad \text{Ec. 11}$$

La altura de los bloques de entrada y los del piso es y_1 y su ancho y espaciamiento es aproximadamente $0.75y_1$.

La distancia desde el extremo de aguas arriba del cuenco disipador hasta los bloques del piso es $L_B/3$.

No deben localizar bloques en el piso más cerca de las paredes laterales que $3y_1/8$.

Los bloques del piso deben localizarse aguas abajo enfrentados a las aberturas entre los bloques de la rápida.

Los bloques del piso deben ocupar entre el 40% y 55% del cuenco del dissipador.

Los anchos y espaciamientos de los bloques del piso para cuencos dissipadores divergentes deben incrementarse en proporción al aumento del ancho del cuenco dissipador en la sección donde se localizan los bloques.

La altura del umbral de salida está dada por $c = 0.07y_2$, donde y_2 es la profundidad seciente teórica correspondiente a y_1 .

La profundidad de salida aguas abajo por encima del piso del cuenco dissipador está dada por:

$$y_2' = \left(1.1 - \frac{F_1^2}{120}\right) * y_2 \quad \text{Para } F_1 = 1.7 - 5.5 \quad \text{Ec. 12}$$

$$y_2' = 0.85 * y_2 \quad \text{Para } F_1 = 5.5 - 11 \quad \text{Ec. 13}$$

$$y_2' = \left(1.0 - \frac{F_1^2}{800}\right) * y_2 \quad \text{Para } F_1 = 11 - 17 \quad \text{Ec. 14}$$

La altura de los muros laterales por encima de la profundidad de salida máxima esperada dentro de la vida útil de la estructura está dada por $z = y_2/3$.

Los muros de salida deben ser iguales en altura a los muros laterales del cuenco dissipador, y su parte superior debe tener una pendiente 1:1.

El muro de salida debe localizarse con un ángulo de 45° con respecto al eje central de salida.

Los muros laterales del cuenco disipador pueden ser paralelos (como en un cuenco disipador rectangular) o divergir como una extensión de los muros laterales de la transición (como en un cuenco disipador trapezoidal).

Debe usarse un muro cortina de profundidad nominal en el extremo del cuenco disipador.

El efecto de atrapamiento de aire no se considera en el diseño del cuenco disipador.

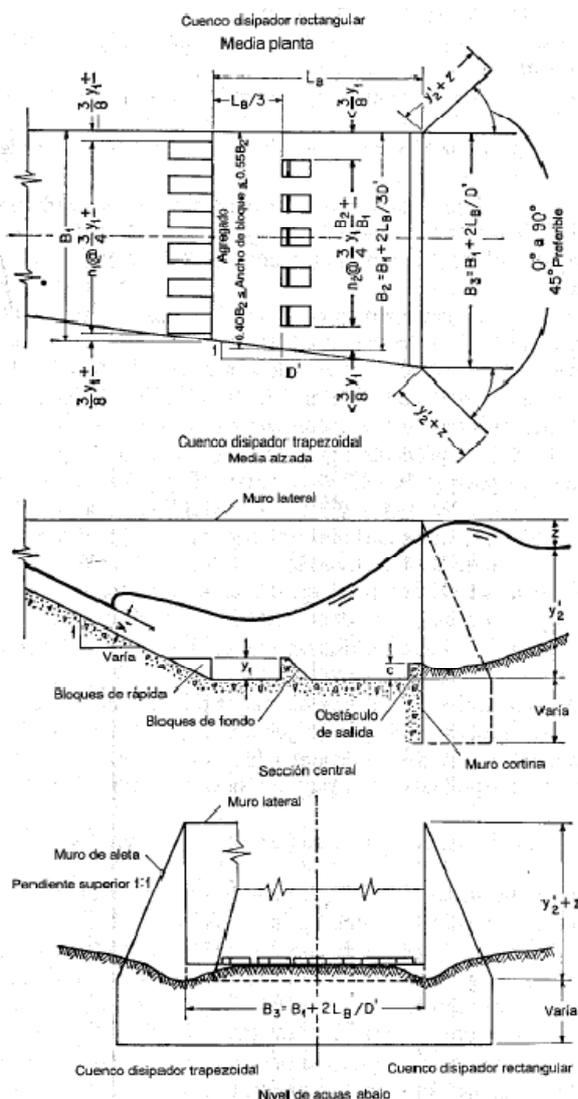


Fig. 16.- Esquema de estructura SAF.

Estructuras del Bureau of Reclamation

Muchas han sido las estructuras desarrolladas, ensayadas y perfeccionadas por el laboratorio del **Bureau of Reclamation** en Denver, Colorado, USA, estando entre las más importantes las que se presentan a continuación:

2.1.1.7 Cuenco I (Resalto Hidráulico en Plataformas Horizontales)

Este cuenco se ha diseñado para un resalto sobre un piso plano, corresponde a las condiciones de disipación del resalto hidráulico clásico.

Su campo de aplicación vienen dado para una altura de caída $H > 60$ m, para caudales unitarios mayores $q > 45 \text{ m}^2/\text{s}$, para números de froude de la características $4.5 \leq F_1 \leq 9$.

La longitud del cuenco disipador es aproximadamente $L \approx 6 \cdot y_2$.

Esta estructura no es muy práctica ya que su longitud es demasiado grande y la falta de control que presenta.

Las condiciones de este cuenco I, son las mismas que se expuso anteriormente en la teoría de resalto hidráulico.

2.1.1.8 Cuenco II (Para Vertederos de Presas Altas y grandes Estructuras de Canal)

Este es un cuenco provisto de dados en la rampa de aproximación y un umbral final dentado, no se usan bloques de impacto en la cubeta ya que las altas velocidades podrían causar cavitación.

El campo de aplicación para este cuenco es que el número de froude $F_1 > 4.5$, para un caudal unitario $q > 46 \text{ m}^2/\text{s}$, para alturas de caída $H < 60$ m y velocidades de aproximación $V_1 > 15 \text{ m/s}$.

Características del Cuenco:

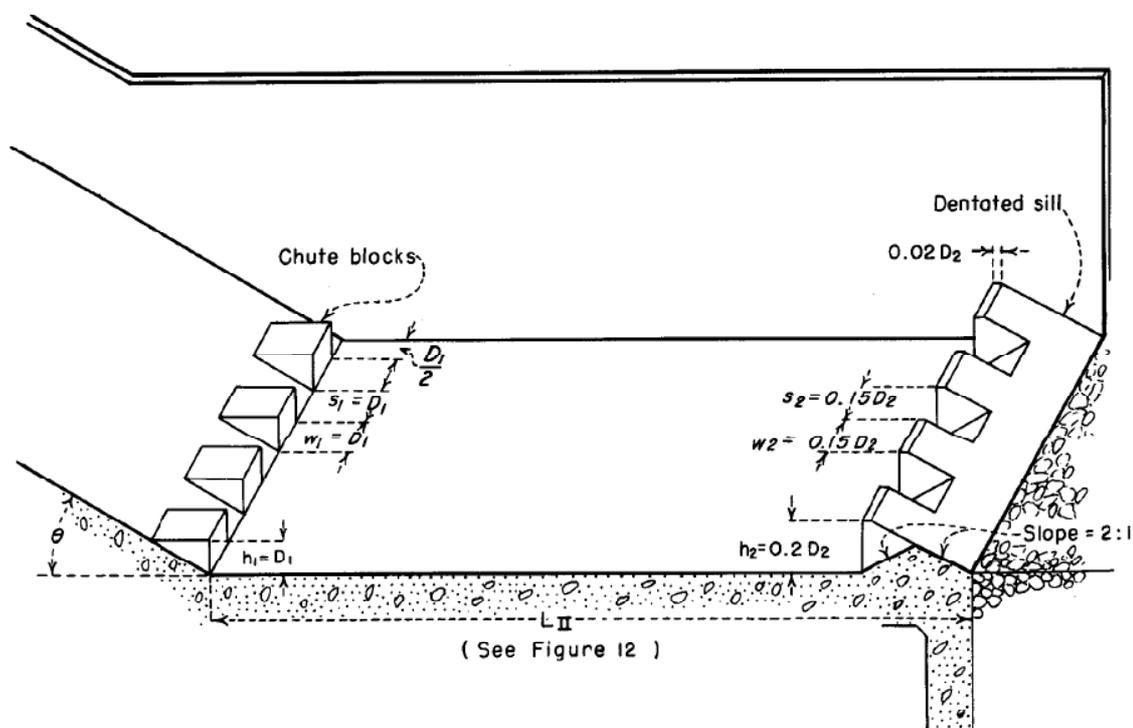


Fig. 17.- Dimensiones del cuenco II.

- La altura de los bloques de la rampa es igual a la profundidad de la entrada del flujo al cuenco, D_1 (y_1), el ancho y espaciamiento aproximadamente D_1 (y_1), pero puede variar para eliminar fracciones de bloques. Junto a cada muro de ala es mejor un bloque de $D_1/2$ ($y_1/2$) de ancho.
- La altura del diente del umbral es $0.2 D_2$ (y_2) y el ancho máximo recomendado es $0.15 D_2$ (y_2). Se recomienda que un diente sea colocado adyacente al muro de ala. La pendiente para la parte posterior del umbral es 2:1, para cuencos estrechos es recomendable reducir el ancho y espaciamiento de los dientes.
- No es necesario escalonar los dientes de la rampa con los del umbral.

- En el cuenco II, no hay cambios perceptibles en el funcionamiento del cuenco, es decir no hay cambios en el resalto hidráulico, cuando es variada la pendiente de la rampa de 0.6:1 a 2:1. Se recomienda que la unión de la rampa y la plataforma sea por medio de una curva de radio razonable ($R \geq 4y_1$) cuando la pendiente de la rampa es 1:1 o mayor.
- La longitud del cuenco está dada aproximadamente por $L \approx 4.2 * y_2$ ó a su vez puede ser determinado por una gráfico que viene dado en función de L/y_2 y el número de Froude como se muestra:

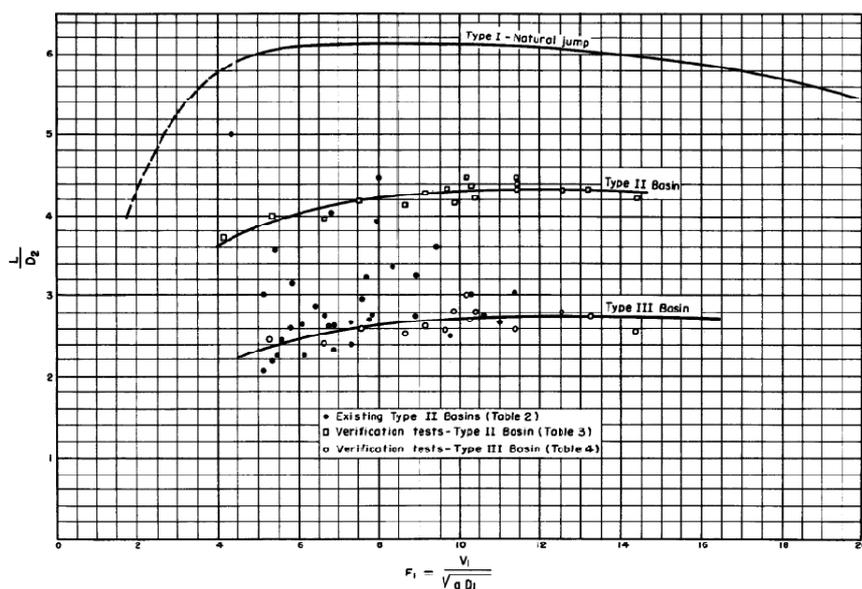


Fig. 18.- Curvas para determinar la longitud del cuenco en función de F_1 y D_2 (y_2).

En cuencos angostos es recomendable reducir el ancho y espaciamiento de los dentados, proporcionalmente, para aumentar el número de éstos y de esta manera mejorar el rendimiento del cuenco. No es necesario colocar en forma alternada los bloques de rampa y los umbrales dentados.

2.1.1.9 *Cuenco III (Cuenco Corto para Estructuras en Canales, Pequeñas Descargas y Pequeños Vertederos)*

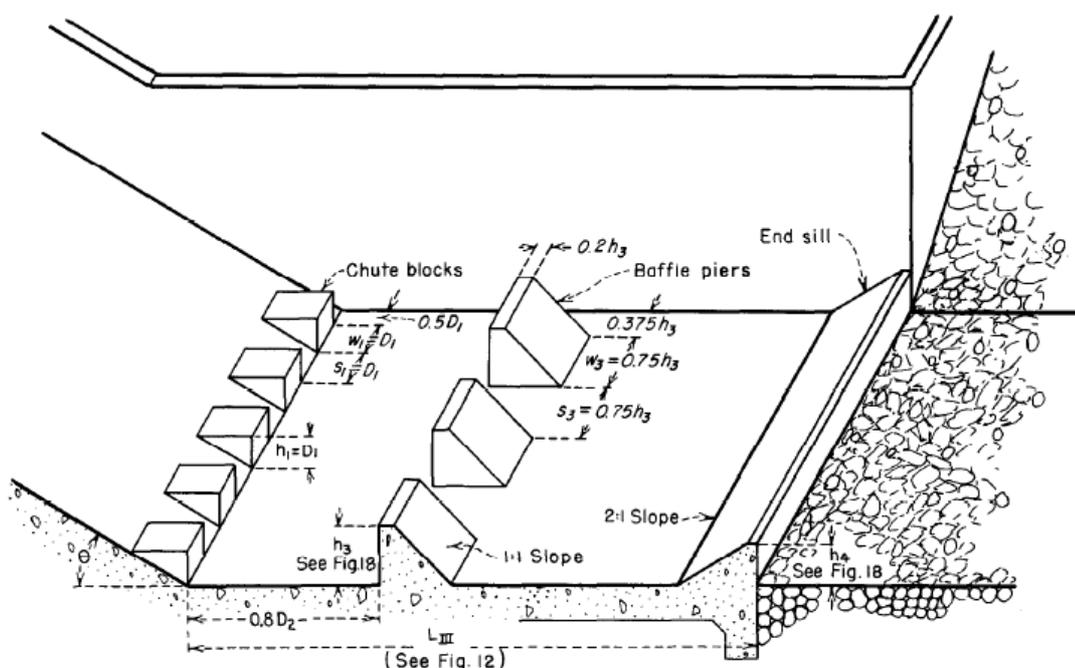


Fig. 19.- Esquema del cuenco III

Ha sido diseñado para un propósito similar al de la estructura SAF, pero considerando un factor de seguridad más alto ya que reduce la longitud del resalto en un 60%, está provisto de bloques de rampa, bloques de impacto en la cubeta y un umbral final continuo.

Esta estructura tiene como características fundamentalmente las que se presentan a continuación:

- Las velocidades a la entrada del cuenco son moderadas o bajas, (hasta 15-18 m/s) y descargas unitarias de hasta 19m²/s
- La forma más efectiva de obtener un cuenco pequeño es modificar el resalto por medio de accesorios, que deben ser autolimpiables.
- El cuenco opera mejor con la profundidad completa conjugada al final del resalto, D_2 (y_2), un factor de seguridad razonable

debe ser inherente en la profundidad de agua para todos los números de Froude.

- La longitud del cuenco es menor que la mitad de la longitud de un resalto natural y se obtiene del gráfico Fig. 15 mostrado anteriormente.
- El cuenco tipo III puede ser efectivo para números de Froude menores que 4, pero no es una certeza.
- La altura, ancho y espaciamiento de los bloques de la rampa, debe ser igual al promedio de la profundidad de entrada del flujo al cuenco, D_1 (y_1).
- La altura de los dientes deflectores varía con respecto al número de Froude.
- La cara aguas arriba del diente deflector debe fijarse a una distancia $0.8 D_2$ (y_2) de la cara aguas debajo de los bloques de la rampa.
- La altura del umbral sólido al final del cuenco debe ser según la figura.

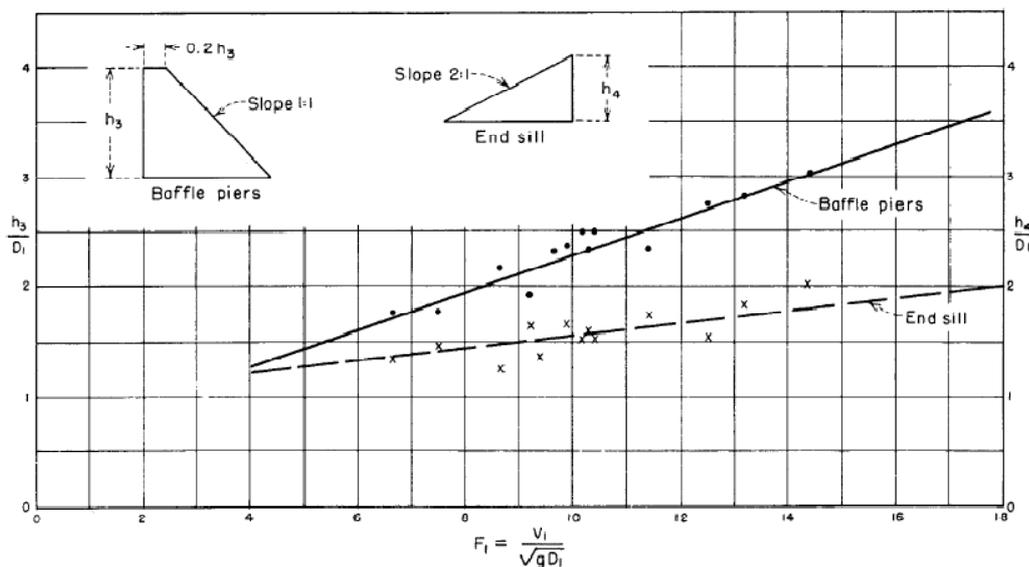


Fig. 20.- Gráfico para determinación de las dimensiones de los bloques de impacto y umbral final.

- No es recomendable redondear ó aerodinamizar las esquinas de los bloques de la rampa, umbral del final o dientes deflectores, ya que podría resultar en la pérdida de la mitad de eficiencia.

- Es recomendable un radio de intersección $R \geq 4D_1$ (y_1) para la plataforma y rampa, cuando hay ángulos de 45° o más.
- La pendiente de la rampa tiene muy poco efecto en el resalto, a menos que largas pendientes planas estén involucradas.

2.1.1.10 *Cuenco IV (Cuencos disipadores para estructuras de canal y descargas)*

- Conciérne al resalto hidráulico para números de Froude entre 2.5 y 4.5 y el diseño de un cuenco adecuado.
- El mayor problema es causado por las ondas que producen que el resalto hidráulico no sea estable
- La colocación de bloques largos fueron colocados en la rampa, con el objeto de dirigir el chorro dentro de la base del remolino en un intento de fortalecerlo y de este modo estabilizar el resalto. Los bloques con la parte superior curva mejoran el resalto.
- Es importante no colocar muchos accesorios ya que podría producirse un problema de remanso, requiriéndose así altos muros de ala.
- La superficie de los bloques debe tener una pendiente de 5° hacia abajo.
- Una profundidad de agua de 5% a 10% mayor que la profundidad conjugada es recomendada para Cuenco IV. El desarrollo del resalto es mucho mejor y la acción de las ondas se disminuye si la profundidad aguas abajo se incrementa en aproximadamente $1.1 D_2$.
- Un pequeño umbral al final de la plataforma es deseado para evitar la socavación.
- Los cuencos tipo IV son aplicables solo para secciones rectangulares.

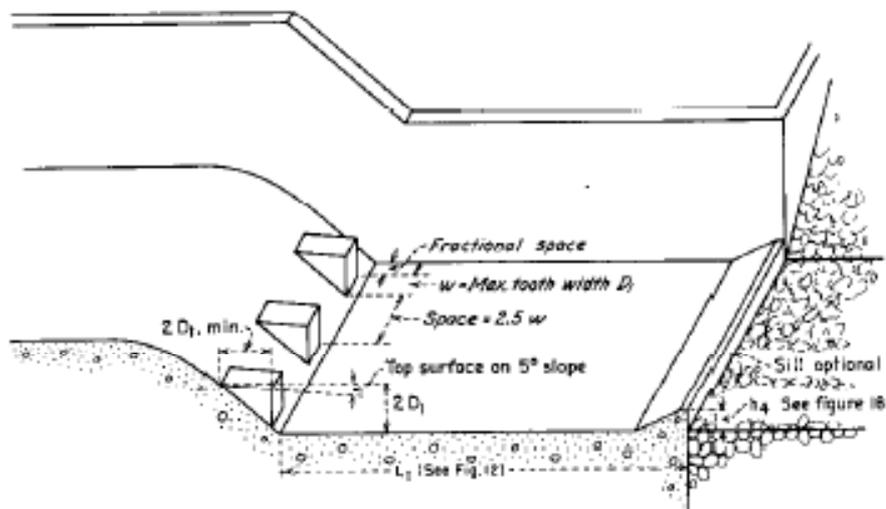


Fig. 21.- Esquema del cuenco tipo IV.

2.1.1.12 *Cuenca V (Estructura de Impacto para Tuberías ó Descargas de Canales)*

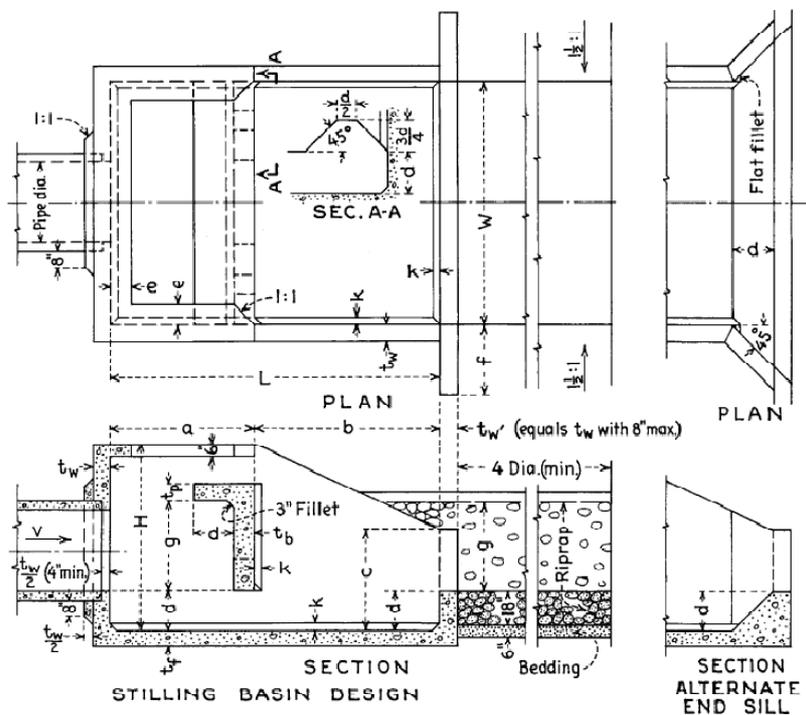


Fig. 22.- Esquema de la estructura de impacto

Este dissipador funciona con resultados satisfactorios, incluso cuando las condiciones del calado aguas abajo son deficientes. Se usan frecuentemente en las tomas y descargas de las presas, aliviaderos de canal, salida de tuberías, etc.

La disipación de energía se produce por el choque del chorro con el muro de impacto y por los remolinos que se forman al cambiar la dirección del chorro después de su choque.

Su campo de aplicación se rige para números de Froude $F_1 < 9$, velocidad de entrada $V_1 < 9$ m/s y para caudales unitarios $q < 10$ m²/s.

Entre sus características más importantes se puede mencionar:

- Es un dissipador de energía de impacto que contiene una pequeña caja la cual no requiere control en la profundidad aguas abajo para su buen funcionamiento.
- Para caudales unitarios de 10 m³/s y velocidades de hasta 9 m/s, pero para mayores descargas se puede instalar varias unidades de este tipo.
- La eficiencia de este dissipador es mucho mayor que para otros tipos de dissipador con el mismo número de Froude.
- Aunque la profundidad aguas abajo no necesita control, es recomendable fijar la máxima profundidad que no exceda $d + g/2$.
- Es necesario colocar un enrocado aguas debajo de la estructura de impacto para evitar problemas de socavación. La densidad de las piedras debe ser alrededor de 2.65.
- La tubería debe tener un ángulo de inclinación hacia debajo de hasta 15° para no afectar el funcionamiento.
- Si por la estructura, el resalto hidráulico hace que la boca de la tubería se tape, es necesario colocar un aireador de 1/6 el diámetro de la tubería.
- Para una posible mejor operación, un umbral al final y paredes a 45° son la alternativa, la tendencia de erosión se reduce.

2.1.1.12 *Cuenco VI (Diseño Hidráulico de Chorros Huecos)*

Este cuenco es aproximadamente 50% más corto que un cuenco convencional y es usado para la disipación de energía aguas abajo de una estructura de descarga, además para ahorrar espacio y reducir costos este cuenco disipador es usualmente construido con una casa de máquinas adyacente para generación de energía hidroeléctrica.

Este cuenco cuenta con salidas de tuberías inclinadas hacia abajo para depositarse en una piscina de disipación donde se generará una gran turbulencia, causando la disipación de energía.

Dentro de las características importantes de este cuenco se destacan las siguientes:

- Aproximadamente 50% más pequeño que el cuenco convencional, diseñado para disipar energía en el extremo aguas debajo por medio de una estructura de descarga controlada.
- Hay que tener mucho cuidado con respecto a la profundidad de la piscina aguas abajo del cuenco, ya que si ésta decrece demasiado, el flujo pasará a través de la plataforma sin haber sufrido una acción de amortiguamiento del cuenco.
- Cuando la longitud del cuenco es más larga de la ideal, puede producirse que el material del lecho del cauce sea arrastrado hasta la plataforma del cuenco. Y si el cuenco es más pequeño que el ideal, habrá tendencia a socavar.
- El ancho del cuenco debe ser al menos tres veces el ancho de la válvula.
- Una válvula de este tipo no debe operar sumergida porque la posibilidad de cavitación ocurriría dentro de la válvula.
- Las velocidades de superficie a la salida rara vez exceden los 7 a 8 pies/sec y en el fondo 3 a 4 pies/sec, para protegerse de estas velocidades enrocados con piedras de 10 a 12 pulgadas es necesario.

- Todas las dimensiones se escogen mediante tablas y gráficos.

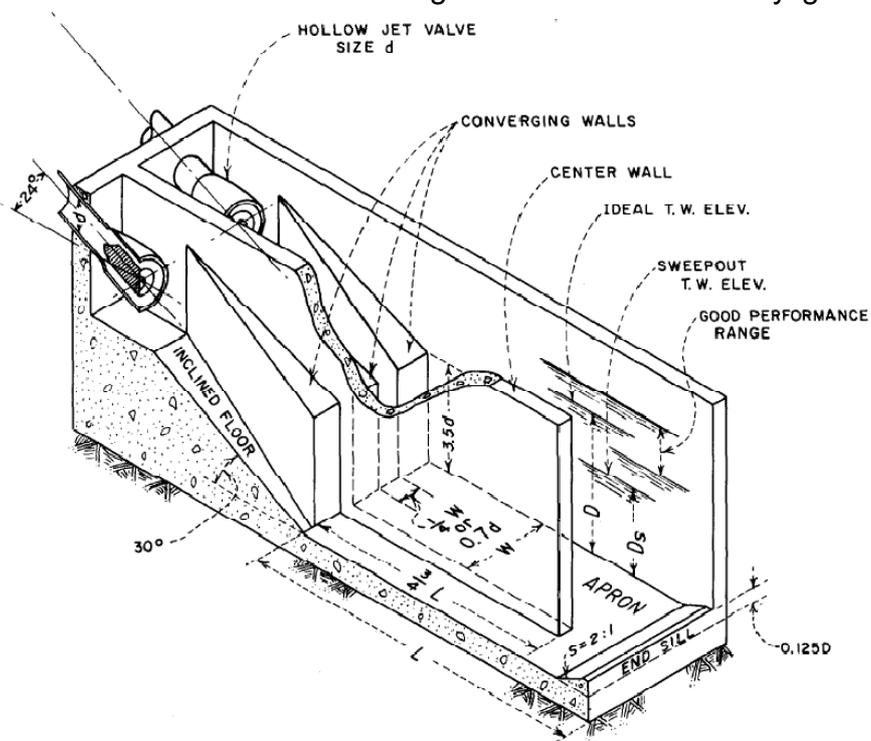


Fig. 23.- Esquema del cuenco de chorros huecos

2.1.1.13 *Cuenca VII (Plataforma Dentada para Rampas)*

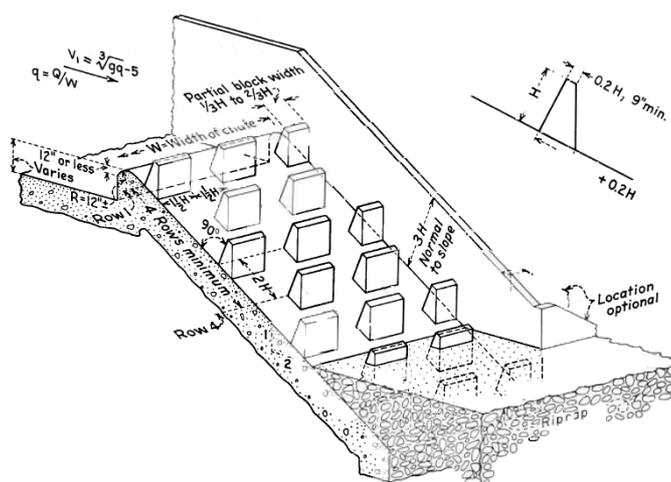


Fig. 24.- Esquema de una rampa dentada

Este tipo de estructura está conformado por una rampa con pendiente 2:1 ó más plana, misma que contiene varias filas de bloques de impacto los cuales permiten que el flujo no se acelere y proporcionen turbulencia que disipe bien la energía.

Dentro de las características importantes se puede mencionar las siguientes:

- La plataforma dentada debe ser diseñada para la máxima descarga esperada
- El caudal unitario de descarga debe ser hasta 60 pie³/sec/pie
- La velocidad de entrada V_1 , debe ser lo mas baja posible, existen condiciones ideales cuando $V_1 = ((g \cdot q)^{1/3}) - 5$, las condiciones de flujo no son aceptables cuando $V_1 = ((g \cdot q)^{1/3})$
- La zona entre la aproximación del canal y la rampa es usada para crear una piscina amortiguadora donde se obtendrá una velocidad V_1 deseada. Y al final de ésta e inicio de la rampa hay que colocar la primera fila de dientes deflectores.
- La altura de los dientes deflectores debe ser alrededor de 0.8 D_c (Profundidad crítica en rampas rectangulares $D_c = (q^2/g)^{1/3}$), no es una dimensión crítica pero debería adoptarse la recomendación.
- El ancho y espaciamiento debe ser alrededor de 3/2 H, pero no menores que H.
- Los dientes deflectores pueden ser construidos con la cara normal al piso de la rampa o de manera vertical.
- Cuatro filas de dientes son requeridas para establecer un control de flujo, aunque menos filas han operado satisfactoriamente.
- Debe haber paredes laterales en la rampa para contener el chapoteo y también se recomienda un enrocado con piedras de 6 a 12 pulgadas.

2.1.1.14 Salto en Esquí

El agua en estas estructuras es lanzada como un chorro libre dirigido hacia arriba para luego caer en el cauce a cierta distancia del extremo de la sección final del esquí, provocando en la zona de caída pozos profundos que con el paso del tiempo pueden afectar la estabilidad misma de la estructura.

En los disipadores de este tipo, la energía es disipada por tres acciones, el contacto aire – agua, por la turbulencia del agua, por la fricción del flujo con el cauce del río, pero a su vez el remanso que genera la cota del labio del esquí puede permitir que se produzca disipación por resalto hidráulico y adicionalmente la disipación producida por el esquí.

Parte de la energía del chorro es disipada en el aire y es así que los disipadores de energía de saltos en esquí son expresamente diseñados para desparramar el flujo de alta velocidad saliente de la rápida, de tal modo que el aire circundante puede atacar la mayor área posible y mover el impacto erosivo del agua fuera del pie de la estructura.

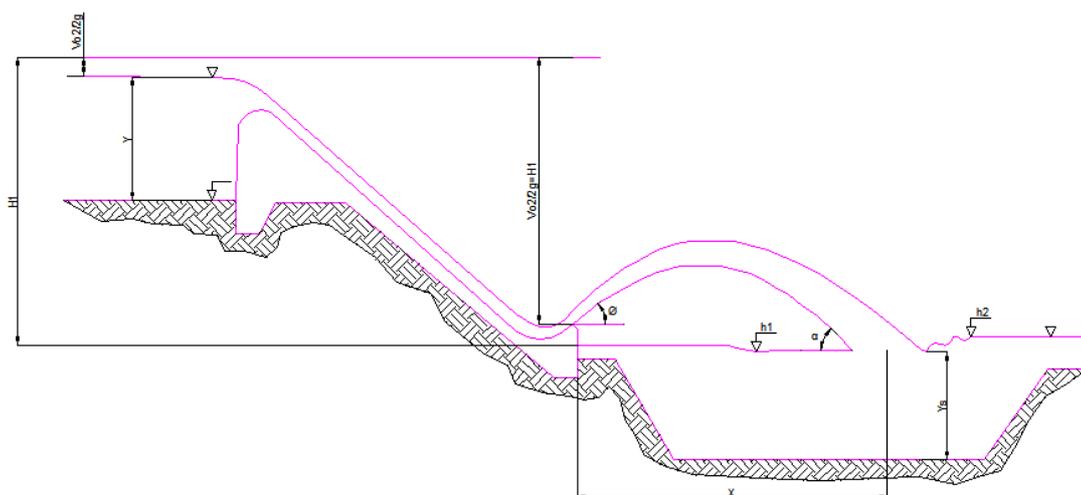


Fig. 25.- Esquema del salto en esquí.

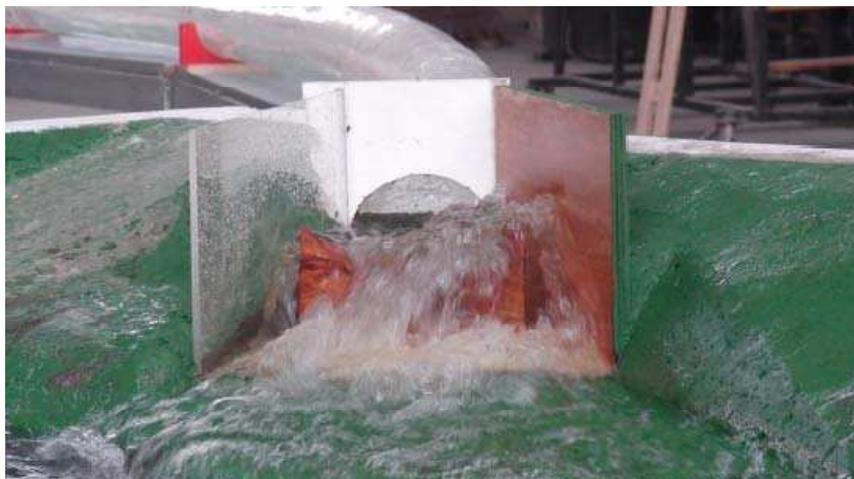
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA ALCANZADA EN LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL REALIZADA EN LAS FASES I, II Y III EN EL PROYECTO SOPLADORA II

El flujo de aproximación hacia la estructura de disipación no presenta una distribución uniforme de la profundidad en el sentido transversal debido a la influencia de la curvatura en planta del túnel de desvío. Se observó la presencia clara de ondas cruzadas, desde la zona en el ingreso mismo del disipador. Se presentó una onda transversal oblicua, originada desde la zona de aproximación del flujo principal del Túnel de Desvío hacia el disipador.

La presencia del disipador tipo Kumin, en la plataforma de esta estructura luego de la sección final del Túnel de Desvío, provoca un choque que controla el flujo principal, la superficie libre del flujo para los caudales altos alcanzó prácticamente la altura de los muros laterales. La escotadura central del bloque disipador tipo Kumin genera una menor elevación en la zona central; mientras que, en la zona cercana a las paredes, el flujo alcanza mayor altura como muestra la fotografía a continuación:



Fotografía No. 5.- Esquema con la ubicación general de las secciones transversales definidas para la comparación de las alturas de energía



Fotografía No. 6.- Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del dissipador tipo Kumin con Caudal aproximado = $800 \text{ m}^3/\text{s}$, se puede observar el control de flujo por el dissipador y el ingreso no uniforme del flujo.



Fotografía No. 7.- Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del dissipador tipo Kumin con Caudal = $900 \text{ m}^3/\text{s}$.

La velocidad del flujo principal, aguas abajo de la estructura de disipación observada en el modelo, tuvo la capacidad de limpiar el material suelto colocado en el cauce.

La relación entre los porcentajes de disipación de energía alcanzados en la estructura tipo Kumin con el caudal del flujo desde el Túnel de Desvío se muestra en el siguiente gráfico.

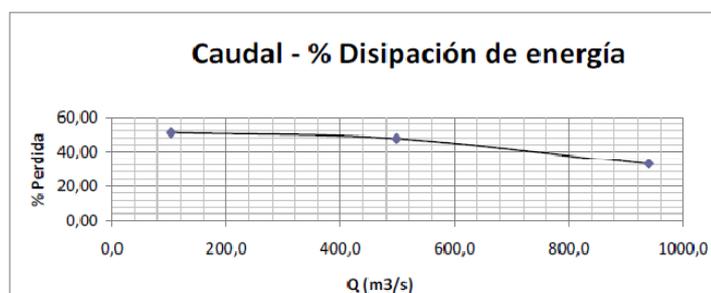


Fig. 26.- Curva de tendencia de la eficiencia del disipador de energía en función del caudal para el túnel de desvío.

Fuente Informe Primera Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

Como recomendación de esta primera fase se prevé un rediseño del disipador de energía, que incluya una transición de sección circular a rectangular, y válida para los valores del parámetro adimensional Fr esperados en el rango de caudales de operación.

En la segunda fase se procedió con dos tipos de modificaciones que se presentan a continuación:

Modificación 1:

La primera variante en la geometría del disipador de energía, propuesta por el personal técnico del CGM, corresponde al cambio en la altura máxima del Kumin, que corresponde a los extremos laterales de este bloque. Este incremento en la altura se realiza tomando como referencia el valor esperado de profundidad media de flujo para el caudal máximo ensayado en la primera fase de la investigación. Se mantiene la ubicación del Kumin con respecto a la boca de salida del túnel en el sentido de flujo.

La plataforma donde se ubica el Kumin presenta un ancho variable y creciente en el sentido de flujo, de tal manera que en el sitio de implantación del Kumin, éste presenta un ancho mayor que el original. La sección transversal aguas abajo del bloque de impacto mantiene el ancho variable y creciente.

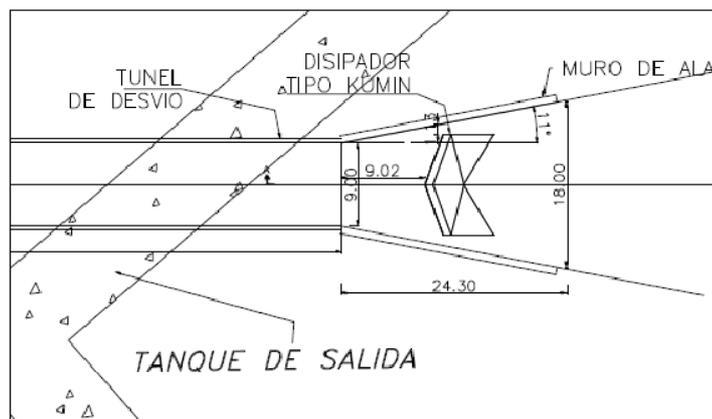


Fig. 27.- Esquema de las modificaciones de la estructura de salida

Fuente Informe Segunda Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

Análisis de funcionamiento de la Modificación 1:

Se observa que el flujo impacta en el cuerpo del Kumin para todo el rango de caudales ensayados.

Se notó la formación de un resalto oblicuo que se formó en el tramo final del túnel de desvío se produjo debido al control que provoca la presencia del Kumin a corta distancia desde la boca de salida y depende del caudal que circula por el túnel. El flujo incidió sobre el bloque de impacto con una fuerte concentración hacia la margen izquierda, como resultado de las ondas cruzadas que se forman dentro del túnel. El flujo, por lo tanto incide con una distribución en planta no uniforme, que provoca elevaciones muy diferentes en los extremos laterales del Kumin.

Cuando el nivel de la superficie libre en el cauce es menor a la altura de las terrazas laterales de inundación, el flujo que ingresa al mismo tiene suficiente capacidad de arrastre de tal manera que dependiendo del caudal de descarga todo o parte de este material suelto es empujado hacia aguas abajo, por el contrario cuando los niveles de la superficie libre del flujo en el cauce del río Paute es mayor a la altura de las terrazas laterales de inundación, se observa que la capacidad de arrastre del material sólido se reduce considerablemente.

En esta segunda variante se procede a eliminar la estructura de disipación tipo Kumin, quedando únicamente la plataforma de entrega a continuación de la sección transversal final del túnel de desvío. Por medio de mediciones de la velocidad en la salida de la estructura, se evalúa la disipación de energía, sin el bloque de impacto. Sin embargo se analiza el funcionamiento de esta configuración con variación de los niveles de superficie libre del flujo en el cauce del río Paute.

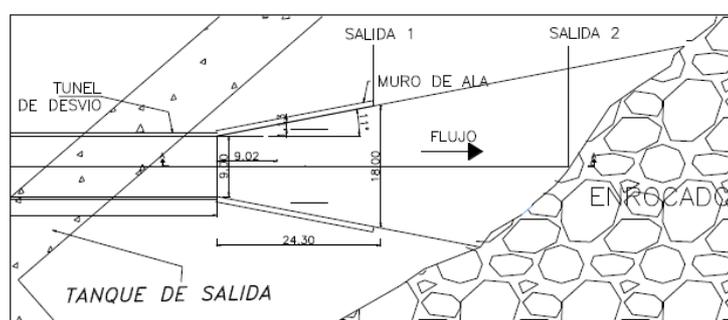


Fig. 28.- Esquema general para el cálculo de energía disipada mostrando los puntos de análisis.

Fuente Informe Segunda Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

Los resultados obtenidos sobre valores estimados de disipación de energía, sin el control desde aguas abajo y con éste, se resumen en la siguiente figura:

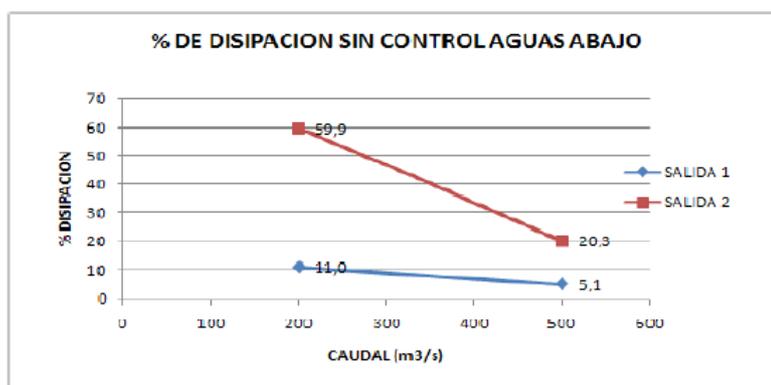


Fig. 29.- Porcentaje de disipación de energía sin control desde aguas abajo.

Fuente Informe Segunda Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

La disipación de energía con la geometría Modificaciones 2 para la condición de descarga sin control de aguas abajo no es recomendable.

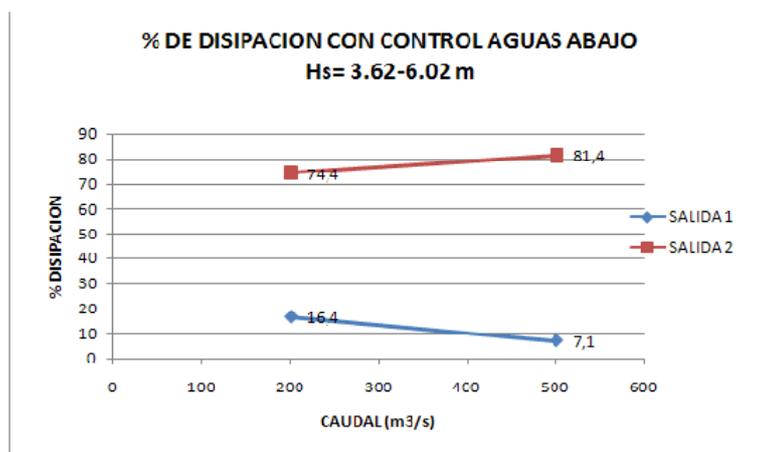


Fig. 30.- Porcentaje de disipación de energía con control desde aguas abajo.

Fuente Informe Segunda Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

En la sección al final de la plataforma de entrega los porcentajes de disipación alcanzados son similares a los observados sin control de aguas abajo.

Tercera Fase del proyecto.

Aguas abajo de la sección final del túnel se tiene la estructura de entrega propiamente dicha conformada por una plataforma horizontal con ancho constante que forma un cambio brusco entre la sección de salida del túnel y la de la estructura de disipación como se muestra en el siguiente gráfico:

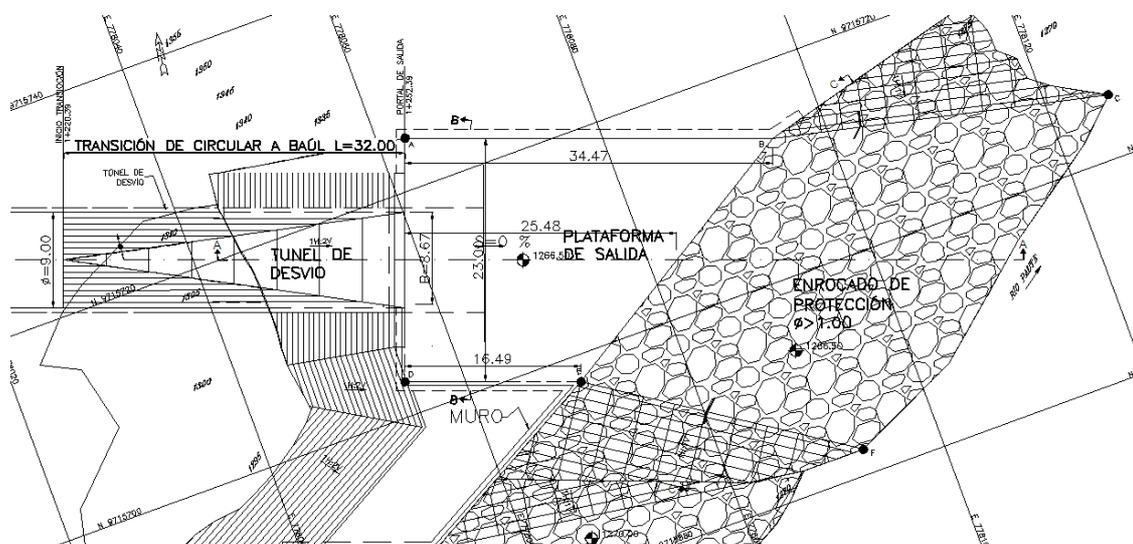


Fig. 31.- Vista en planta de la modificación de la estructura de salida para el túnel de desvío de la Fase III.

Fuente Informe Tercera Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

Análisis del funcionamiento.

Las esquinas laterales próximas a la sección final del túnel no son ocupadas por el flujo, por lo que no resultan eficientes. En la parte final de la plataforma de entrega, en cambio, el ensanchamiento del chorro de salida es superior al ancho de la plataforma, razón por la que se observa la formación de ondas en estos extremos laterales. La reflexión del flujo en los muros laterales no es simétrica, siendo mayor en el extremo final del muro izquierdo. Esto se debe a que la concentración del flujo hacia la margen izquierda en la salida del túnel se mantiene como resultado de las ondas cruzadas generadas por el cambio de alineación.

El flujo observado al final de la plataforma de entrega presenta velocidades suficientemente altas, capaces de arrastrar todo material suelto colocado en el cauce. Los niveles de la superficie libre esperados en el río Paute no son suficientes para sumergir el resalto y reducir la capacidad erosiva del flujo de entrega.

La disipación de energía fue medida respecto a los siguientes puntos de medida de velocidades de flujo:

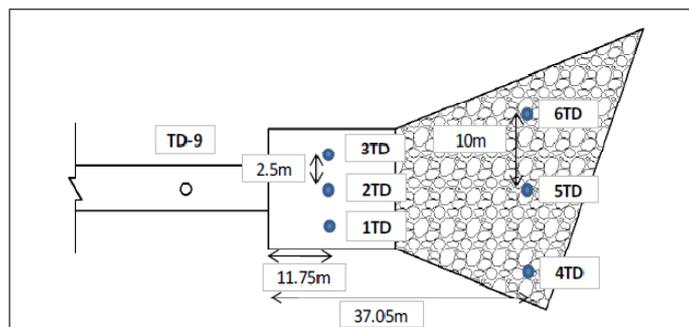


Fig. 32.- Ubicación en planta de los puntos de medición de velocidad en la zona de entrega desde el Túnel de Desvío.

Fuente Informe Tercera Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

Los resultados obtenidos en la medición de velocidades se muestran en los siguientes Cuadros:

Túnel de desvío (Valores modelo)											
PUNTOS	Caudal (l/s)= 5.70		Caudal (l/s)= 11.30		Caudal (l/s)= 28.30		Caudal (l/s)= 63.90				
	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)			
TD-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1TD	24.35	1.57	27.67	1.83	19.44	2.36	5.53	2.36	5.53	4.70	2.94
2TD	23.72	1.58	24.89	1.89	20.26	2.34	5.60	2.34	5.60	4.70	2.91
3TD	*	1.76	16.08	2.07	22.34	2.29	1.96	2.29	1.96	4.70	3.02
4TD	92.70	0.63	73.47	1.39	67.57	1.60	12.93	1.60	12.93	12.52	3.19
5TD	90.66	0.72	54.03	1.88	70.01	1.52	20.07	1.52	20.07	12.52	3.03
6TD	86.59	0.88	69.00	1.52	56.06	1.95	4.58	1.95	4.58	12.52	3.37

*medición no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

Tabla 1.- Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde el Túnel de Desvío

Túnel de desvío (Valores prototipo)									
PUNTOS	Caudal (m ³ /s)= 101		Caudal (m ³ /s)= 200		Caudal (m ³ /s)= 500		Caudal (m ³ /s)= 1130		
	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	
TD-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1TD	24.35	11.12	27.67	12.91	19.44	16.69	5.53	20.78	
2TD	23.72	11.21	24.89	13.34	20.26	16.56	6.60	20.60	
3TD	*	12.41	16.08	14.62	22.34	16.21	1.96	21.36	
4TD	92.70	4.43	73.47	9.85	67.57	11.34	12.93	22.56	
5TD	90.66	5.10	54.03	13.27	70.01	10.74	20.07	21.45	
6TD	86.59	6.22	69.00	10.74	56.06	13.81	4.58	23.80	

*medición no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

Tabla 2.- Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde el Túnel de Desvío

La variación del porcentaje de disipación de energía respecto del caudal, en el caso del Túnel de Desvío, se puede observar en la siguiente Figura:

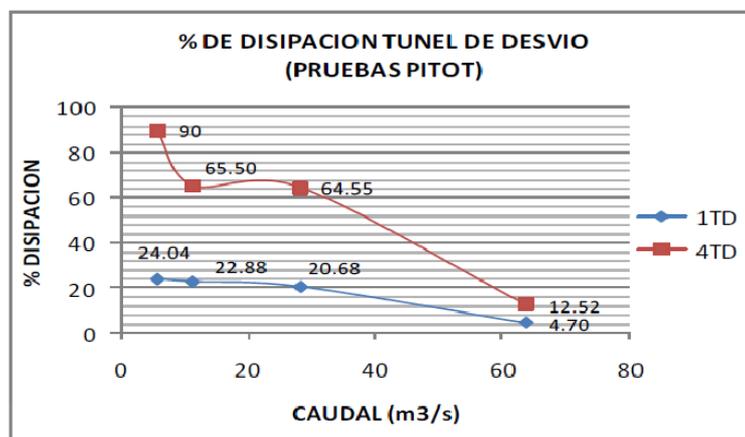


Fig. 33.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega desde el Túnel de Desvío.

Fuente Informe Tercera Fase del ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA CENTRAL PAUTE – MOLINO.

Modificaciones a la Geometría propuesta en la fase III de la investigación:

A la salida del túnel de desvío se conformará la plataforma delimitada por muros laterales rectos que se implantan desde la sección final del túnel con inclinaciones diferentes hacia la izquierda y derecha del eje, con una inclinación de 11° y 23° respectivamente, además de ciertas variaciones en las dimensiones de los demás componentes.

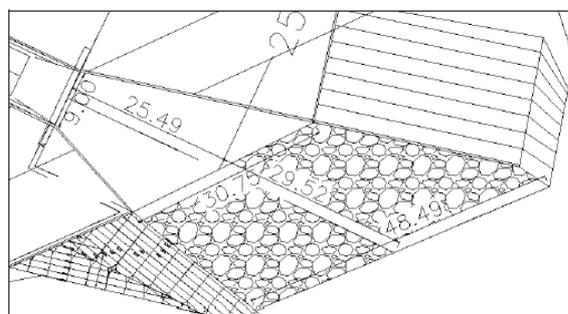


Fig. 34.- Vista en planta de la modificación para optimización.

Para evaluar el comportamiento hidráulico de las modificaciones geométricas en la estructura de salida del túnel de desvío se realizaron mediciones de velocidad en los puntos ubicados en planta que se detalla en el esquema siguiente:

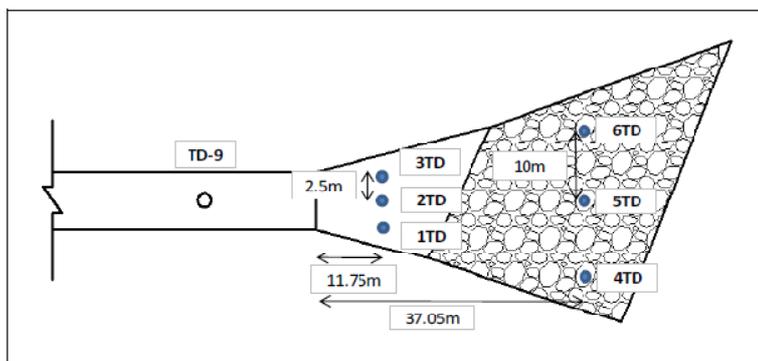


Fig. 35.- Ubicación en planta de los puntos de medición de velocidad para la zona de descarga desde el Túnel de Desvío.

La variación del porcentaje de disipación de energía respecto al caudal, en el Túnel de Desvío, se puede observar en la siguiente Figura:

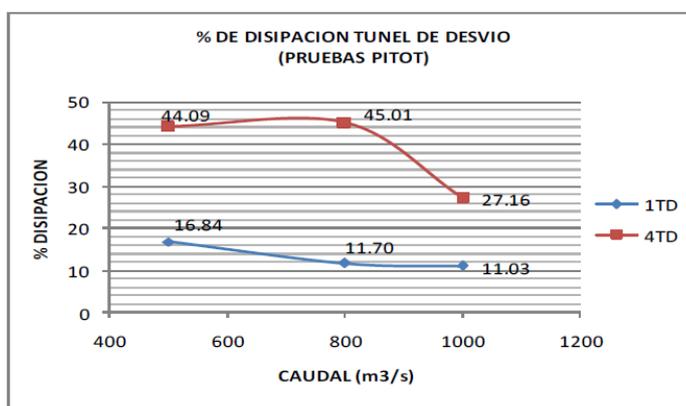


Fig. 36.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega desde el Túnel de Desvío.

Con estos antecedentes de la investigación y debido a los resultados poco eficientes de las estructuras de disipación de energía, se procede a la presente investigación con el fin de mejorar tanto la disipación de energía como la restitución del flujo al cauce natural del río.

2.3 ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA MEJORAR EL GRADO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA ALCANZADO

Luego de un minucioso análisis de las condiciones hidráulicas que se presentaron en la investigación que precede, se definieron dos alternativas para resolver el problema de disipación de energía en la salida del túnel de desvío, siendo éstas, el Cuenco Tipo IV del Bureau of Reclamation y como segunda opción un Salto en Esquí.

Cuenca IV (Cuencos Disipadores y Supresores de Onda para Estructuras en Canales, Descargas y Presas de Derivación)

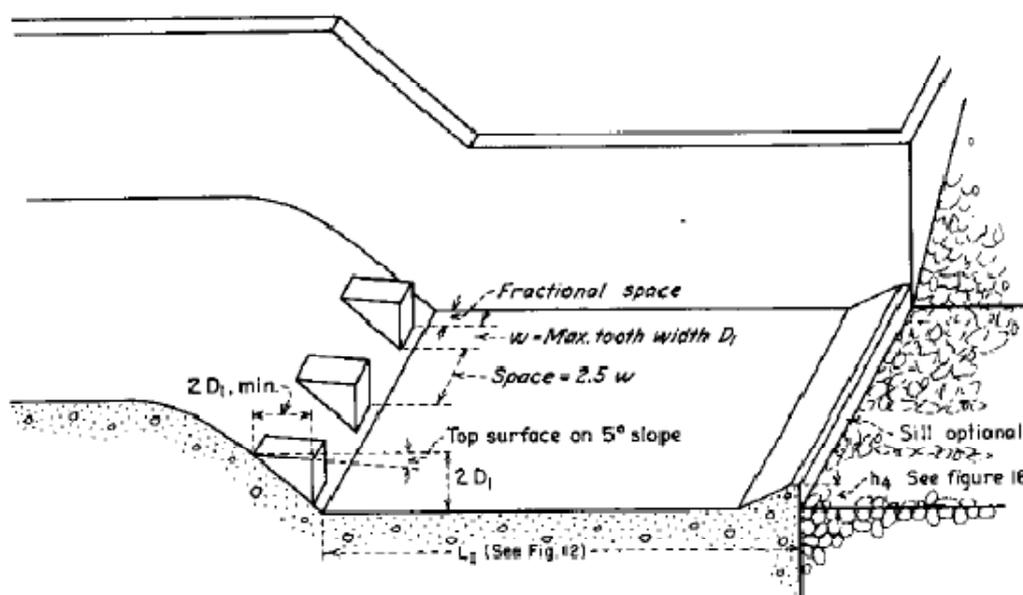


Fig. 37.- Esquema del cuenco disipado tipo IV

Esta estructura ha sido diseñada para combatir las ondas del resalto oscilante ($2.5 < F_1 < 4.5$) en su fuente, esto se logra mediante la intensificación del remolino con chorros direccionados deflectados desde grandes bloques de rampa que como mínimo serán en número de

tres. Para mejorar el funcionamiento hidráulico, es recomendable construir estos bloques con una separación ($S = 0.75 \cdot y_1$) y establecer la profundidad del cuenco en ($y_t = 1.1 \cdot y_2$). Esta estructura es solamente aplicable a secciones rectangulares.

Entre las características más importantes de este cuenco son:

- Recomendada para números de Froude entre 2.5 y 4.5.
- El mayor problema es causado por las ondas que producen que el resalto hidráulico no sea estable.
- Cuando las descargas trabajan bajo una carga de presión de 15 m o mayores caídas, dentro del rango de números de Froude entre 2.5 y 4.5, un modelo de estudio del cuenco es indispensable.
- La colocación de bloques más largos similares a los de la sección anterior fueron colocados en la rampa, con el objeto de dirigir el chorro dentro de la base del remolino en un intento de fortalecerlo y de este modo estabilizar el resalto. Los bloques con la parte superior curva mejoran el resalto. Solo d y e funcionaron.

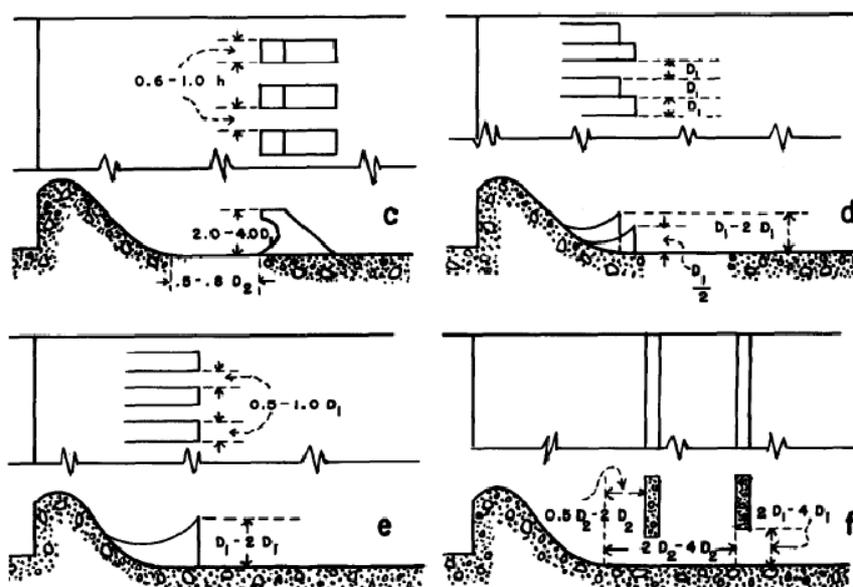


Fig. 38.- Gráfico de las alternativas que mejor funcionaron según el Bureau of Reclamation.

- Es importante no colocar muchos accesorios ya que podría producirse un problema de remanso, requiriéndose así altos muros de ala.
- La superficie de los bloques debe tener una pendiente de 5° hacia abajo.
- Una profundidad de agua de 5% a 10% mayor que la profundidad conjugada es recomendada para Cuenco IV. El desarrollo del resalto es mucho mejor y la acción de las ondas se disminuye si la profundidad aguas abajo se incrementa en aproximadamente $1.1 D_2 (y_2)$.
- Un pequeño umbral al final de la plataforma es deseado para evitar la socavación.
- Los cuencos tipo IV son aplicables solo para secciones rectangulares.

Disipador tipo Salto en Esquí¹

El agua en estas estructuras es lanzada como un chorro libre dirigido hacia arriba para luego caer en el cauce a cierta distancia del extremo de la sección final del esquí, provocando en la zona de caída pozos profundos que con el paso del tiempo pueden afectar la estabilidad misma de la estructura.

En los disipadores de este tipo, la energía es disipada por tres acciones, el contacto aire – agua, por la turbulencia del agua, por la fricción del flujo con el cauce del río, pero a su vez el remanso que genera la cota del labio del esquí puede permitir que se produzca

¹ Fuente Tesis ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL CHORRO DE SALIDA Y LA EFICIENCIA DEL CUENCO AMORTIGUADOR AL PIE DE UN SALTO EN ESQUÍ Y SU APLICACIÓN AL PROYECTO MISBAQUE, elaborada por Arguello, Washington

disipación por resalto hidráulico y adicionalmente la disipación producida por el esquí.

Parte de la energía del chorro es disipada en el aire y es así que los disipadores de energía de saltos en esquí son expresamente diseñados para desparramar el flujo de alta velocidad saliente de la rápida, de tal modo que el aire circundante puede atacar la mayor área posible y mover el impacto erosivo del agua fuera del pie de la estructura.

Determinación de la Trayectoria

La consideración más importante en el diseño de saltos en esquí, es el de determinar que tan lejos puede ser lanzado el chorro aguas abajo. Teóricamente si se desprecia la resistencia del aire, y la separación del chorro, la trayectoria puede ser determinada por las ecuaciones de trayectoria de un proyectil, es decir es parabólica.

$$y = x * \tan \phi - \frac{g * x^2}{2 * V_0^2 \cos^2 \phi} \quad \text{Ec. 18}$$

Ecuación de la trayectoria del chorro

y : distancia vertical desde la sección final del esquí hasta el punto de impacto del chorro

x : distancia horizontal desde la sección final del esquí hasta el punto de impacto del chorro

g : aceleración de la gravedad

V₀: velocidad en la sección final del esquí

Luego igualando esta ecuación a la de la topografía, y considerando que el chorro cae en el cauce del río ó en el cuenco preexcavado, entonces, la ecuación 18 se transforma en:

$$x = \frac{V_o^2}{g} \text{sen}2\phi \quad \text{Ec. 19}$$

esta es la componente horizontal del chorro, teóricamente el máximo alcance debía ser cuando $\Phi=45^\circ$, pero en la realidad el ángulo óptimo oscila entre $20^\circ - 40^\circ$.

No se debe diseñar con ángulos mayores a 40° , pues, para caudales pequeños se forma un embalsamiento en el deflector.

Alcance Máximo

Los saltos en esquí son diseñados para descargar el flujo de la estructura de descarga al río, lanzando el chorro lo más alejado posible de la base de la estructura para evitar erosión al pie.

Para el cálculo del alcance que llega este chorro, existen varias fórmulas encontradas en base a mediciones hechas en presas y en modelos hidráulicos.

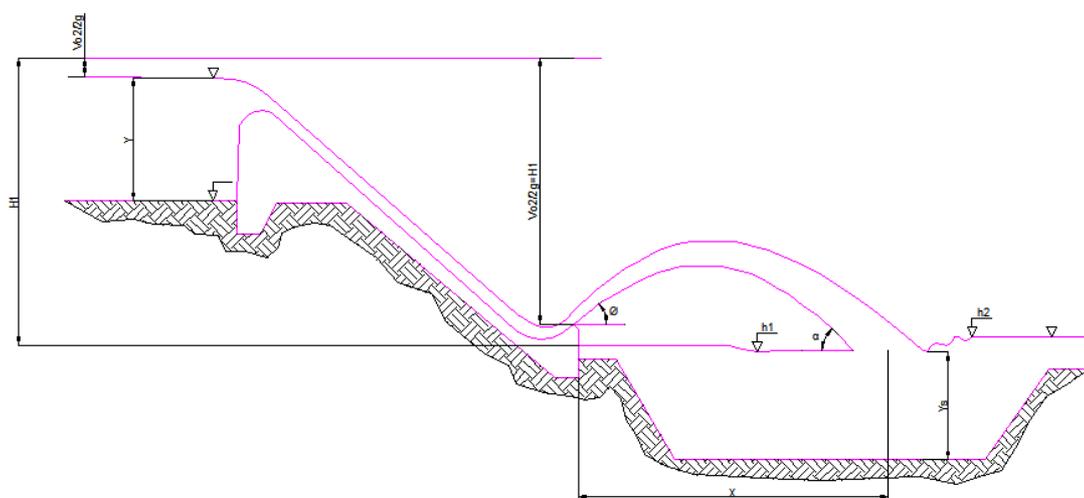


Fig. 39.- Esquema de variables usadas en ecuaciones

Fórmula propuesta por Elevatorsky

Medidas realizadas por investigadores en varias presas, para flujos menores a la mitad de la máxima descarga, muestran aproximadamente que el 20% de la energía total es disipada por interacción del chorro con el aire, para compensar ésta reducción de velocidad y pérdida de energía del chorro durante su trayectoria, la ecuación sugerida para el alcance es la siguiente:

$$x = 1.9 * h * \text{sen}2\phi \quad \text{Ec. 20}$$

Fórmula de Kawakami

Rechazando la resistencia del aire, la ecuación para encontrar la distancia de impacto del chorro es:

$$L_o = \frac{V_o^2}{g} \text{sen}2\phi \quad \text{Ec. 21}$$

Además Kawakami presentó sus resultados de investigaciones de campo de las trayectorias de un chorro con vertedero en salto de esquí, tomando en cuenta la resistencia que presenta el aire a la trayectoria del mismo, recogiendo información, desarrolla un gráfico L_1/L_0 como función de V_0 , como se presenta en la figura:

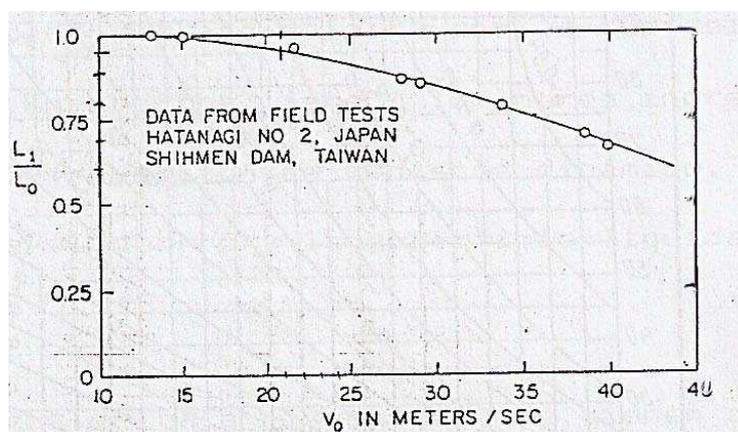


Fig 40.- Gráfico para incluir la resistencia del aire en el chorro

Donde L_1 , es la distancia que alcanza el chorro tomando en cuenta la resistencia del aire.

Configuración del Cuenco de Socavación

Investigaciones realizadas que se relacionan con la forma de los cuencos de socavación formados en un lecho de material granular homogéneo utilizando modelos de deflectores con ángulos de salida de 30° , dan cuenta de la siguiente ecuación empírica para el cálculo de la máxima profundidad:

$$Y_s = \frac{1.235 * q^{0.67} * H^{0.18}}{d^{0.063}} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde,

Y_s : máxima profundidad de erosión (pies)

q : descarga unitaria del vertedero (pies^3/s)

H : diferencia de energía entre aguas arriba y abajo (pies)

d : diámetro medio del material del lecho (pies)

La forma del hueco es simétrica con el eje longitudinal, siempre y cuando la distribución del chorro sea uniforme en el labio del esquí, con la máxima profundidad localizada aguas abajo del centro geométrico.

Cálculo de la profundidad máxima del cuenco de socavación

La erosión es un enemigo común a una gran variedad de obras hidráulicas, donde adquieren caracteres más notables es en presas y vertederos construidas sobre los ríos.

El problema en efecto puede ser tratado de dos maneras diferentes, dirigiéndose a dos objetivos alternativos:

- a) Prevenir los hoyos de erosión completamente
- b) Hacerlos inofensivos

La solución (b) parece ser la más popular a través de los investigadores y diseñadores modernos. Para caracterizar la acción erosiva del chorro, estudios experimentales han sido desarrollados por diversos investigadores, basados en ellos y en observaciones de prototipos, han sido presentadas diversas ecuaciones para el cálculo de la geometría de las erosiones, incluso la profundidad del pozo amortiguador.

La máxima profundidad de erosión “ Y_s ” medida desde la superficie libre del agua, es en general, función de variables características del fluido, del material componente del lecho, del escurrimiento en su conjunto y de la estructura de lanzamiento. Las fórmulas más conocidas para el cálculo de la profundidad “ Y_s ” depende de las siguientes variables:

d_{90} : Diámetro por el cual pasa el 90% en peso del material

d_n : Diámetro nominal del material

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

H : Desnivel entre la altura de carga a la salida del embalse y el nivel de restitución

h_r : Tirante de agua medido entre la superficie libre y el lecho no erosionado

$$h_r = h_2 - h_{sed} \quad \text{Ec. 23}$$

F : Número de Froude (Ec. 1)

α : Ángulo de entrada del chorro en el cuenco

En la figura 14 se definen las variables antes señaladas, de las siguientes fórmulas.

– Fórmula de Veronese modificada

Basadas en observaciones de modelos, la profundidad de socavación es generalmente mucho menor que la provista por Veronese, si Y_s se mide verticalmente. Por esto, una asunción muy simple se ha hecho para soportar esta relación. Esto es que la profundidad efectiva de socavación, Y_s , obtenido por la fórmula de Veronese debe ser medida a lo largo de la tangente del chorro que entra en el agua. En otras palabras, la profundidad esperada, Y_s , debe ser:

$$Y_s = 1.90 * H^{0.225} * q^{0.54} * \text{sen } \alpha \quad \text{Ec. 24}$$

– Fórmula de C. Wu

$$Y_s = 2.018 * H * \left(\frac{q}{\sqrt{g * H^3}} \right)^{0.51} \quad \text{Ec. 25}$$

– Fórmula de Iranishevich Machado

$$Y_s = 1.35 * q^{0.5} * H^{0.3145} * d_{90}^{-0.0645} \quad \text{Ec. 26}$$

– Fórmula de Solovera

Esta fórmula ha fue encontrada para un ángulo de salida del chorro $\Phi=45^\circ$ y números de froude > 5.5 . La hipótesis fue que todo lecho rocoso coherente puede ser considerado como material no cohesivo o roca no fracturada.

$$Y_s = 0.45 * h_0 * F^{3/2} * \left(\frac{h_r}{d_n} \right)^{1/4} \quad \text{Ec. 27}$$

– Fórmula de Chee y Kung

$$Y_s = 3.3 * H * \left(\frac{q}{\sqrt{g * H^3}} \right)^{0.6} * \left(\frac{H}{d_{90}} \right)^{0.1} \quad \text{Ec. 28}$$

CAPÍTULO III

GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN FÍSICA

3.1 INTRODUCCIÓN

Los métodos empleados en el análisis de problemas hidráulicos, plantean soluciones con modelos matemáticos que pueden introducir simplificaciones importantes, que a su vez causan efectos que deben ser valorados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida.

A diferencia del análisis de gabinete, en los modelos reducidos existe la posibilidad de evaluar varias soluciones técnicas posibles de ejecutarse.

Debido fundamentalmente a la complejidad de de los fenómenos hidráulicos y su carácter tridimensional de flujo real, las relaciones funcionales establecidas en el marco de la Hidrodinámica presentan muchas dificultades en el área de diseño, obligando que el diseñador opte por simplificaciones en las hipótesis que limitan la validez de los resultados.

3.2 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA

La modelación física tiene como fin reproducir a escala reducida fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua. Y además lograr que las magnitudes físicas o hidrodinámicas en el modelo hidráulico correspondan a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas leyes.

La acertada selección de las magnitudes más relevantes en la representación del fenómeno hidráulico analizado, permitirá una aplicación inmediata de los resultados en la solución de los problemas.

3.3 SEMEJANZA HIDRÁULICA

Los parámetros adimensionales han prestado gran ayuda a los conocimientos de los fenómenos del flujo de los fluidos, ellos permiten aplicar los resultados a otros casos con diferentes medidas físicas y a fluidos con propiedades diversas.

La semejanza hidráulica combinada con una cuidadosa selección y uso de los parámetros adimensionales hacen posible la generalización de los resultados experimentales.

El resultado de la generalización permite representar el fenómeno en su totalidad y no existe la limitación de estudiar un experimento en particular, por tanto se pueden efectuar menos ensayos, pero mas selectivos para identificar detalles ocultos del problema.

Los grupos adimensionales se representan como una relación de fuerzas que actúan sobre el fluido y de esta manera indican el valor de la relación, por consiguiente la importancia de una de las fuerzas respecto a otra.

En caso de que algunas fuerzas son significativamente mayores a otras, dichas fuerzas menores pueden ser despreciadas y tratar el fenómeno como si estuviese dominado únicamente por las fuerzas mayores, lo que se denomina similitud restringida.

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

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

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

Para la investigación experimental se trata de definir un modelo en el que las correspondientes magnitudes queden reproducidas a las escalas apropiadas.

Desde un punto de vista hidráulico, es decir, fluido homogéneo en contorno fijo, las magnitudes son:

- Geométricas: Longitudes, áreas y volúmenes con sus formas.
- Cinemáticas: Tiempos, velocidades, aceleraciones, caudales.
- Dinámicas: Masas, fuerzas, presiones, pesos específicos, cantidades de movimiento, energías, tensiones superficiales, densidades, viscosidades.

El uso de modelos físicos hidráulicos implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas en ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m .

➤ Similitud Geométrica

En el flujo tanto en modelo como en prototipo se definen formas y dimensiones homólogas que constituyen la similitud geométrica, misma que implica una relación constante, es decir que, para cualquier longitud L resulta ser $\frac{L_p}{L_m} = L_r$ a lo que se denomina escala de longitudes.

➤ Similitud Cinemática

Cuando la comparación de los sistemas A_p y A_m es con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática, y que se cumple cuando la forma de los patrones de flujo homólogos son iguales en cualquier tiempo, es decir hay similitud de movimientos en los dos sistemas; por lo que la relación de

velocidades de puntos homólogos debe ser constante, es decir $\frac{V_p}{V_m} = V_r$, y generalizando $V_r = L_r \cdot t_r^{-1}$, , siendo V_r la escala de velocidades, L_r la escala de longitudes y $\frac{t_p}{t_m} = t_r$ la escala de tiempos.

➤ Similitud Dinámica

El movimiento del fluido en el modelo y en el prototipo, para que sea similar en forma completa, no es suficiente que cumpla con las similitudes geométrica y cinemática, también es necesario que se cumpla con la similitud que considera las condiciones dinámicas de flujo, es decir, las fuerzas que actúan sobre puntos homólogos deben ser similares, lo que a su vez manifiesta que la relación de homólogas sea un factor constante en todo sistema, es decir, existe similitud dinámica.

➤ Similitud Restringida

En caso de que algunas fuerzas son significativamente mayores a otras, las fuerzas menores pueden ser despreciadas y tratar el fenómeno como si estuviese dominado únicamente por las fuerzas representativas, que para esta investigación dichas fuerzas serán las gravitacionales.

En los flujos sujetos al efecto de la gravedad (corrientes con superficie libre) debe asegurarse que junto a la semejanza geométrica también el número de Froude sea igual en el modelo y en el prototipo.

$$Fr_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r \cdot L_r}} = 1$$

3.4 RELACIÓN DE ESCALAS ENTRE LAS MAGNITUDES HIDRODINÁMICAS DE UN MODELO CON SIMILITUD DE FROUDE Y SU PROTOTIPO.

Considerando que tanto en el prototipo como en el modelo se trabaja con agua de tensión superficial constante, las escalas de las principales magnitudes se presentan en la siguiente Tabla No. 3, en donde: L_r es la escala de longitudes o la relación entre longitudes similares del prototipo respecto de la del modelo; $g_r = 1$, representa que la gravedad es idéntica en modelo y en prototipo; $\sigma_r = 1$, que el valor de la tensión superficial es idéntica en modelo y en prototipo; $\gamma_r = 1$, que el peso específico es igual en modelo y en prototipo porque se utiliza el mismo líquido (agua) en los ensayos en el laboratorio.

Magnitud	Similitud de Froude
Longitudes	$L_r = L_n / L_m$
Superficies	$A_r = L_r^2$
Velocidades	$V_r = L_r^{1/2}$, con $g_r = 1$
Tiempos	$t_r = L_r / V_r = L_r^{1/2}$
Caudales	$Q_r = V_r * A_r = L_r^{5/2}$
Aceleración	$a_r = V_r / t_r = 1$
Presión	$(p/\gamma)_r = L_r$

Tabla No. 3.- Valores de las relaciones ó escalas para las principales magnitudes con el criterio de similitud de Froude

Fuente: Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas. Hidalgo M.

3.5 CONSIDERACIONES SOBRE LA TRANSPOSICIÓN DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS OBTENIDAS EN MODELO.

3.5.1 VELOCIDAD

En el movimiento de masas de agua los cambios en la magnitud y en la dirección del vector velocidad están controlados y gobernados por la geometría de contorno. Por lo tanto las características geométricas de puntos homólogos en modelo y en prototipo deben ser semejantes.

3.5.2 VISCOSIDAD

El efecto de la fricción interna o viscosidad sobre las características hidrodinámicas del movimiento del agua es pequeño en comparación con la incidencia de la fuerza gravitacional, siempre y cuando en prototipo como en modelo se mantenga el flujo totalmente turbulento.

3.5.3 TENSIÓN SUPERFICIAL¹

La consecuencia de la tensión superficial en el movimiento del agua en el prototipo es prácticamente irrelevante. La literatura técnica brinda muchas recomendaciones que limitan o eliminan su efecto, de este modo, en el modelo, la escala de longitudes a ser seleccionada debe ser tal que garantice que las profundidades de agua sean mayores a 3 cm y por lo tanto, también en el modelo, el efecto de la tensión superficial es despreciable.

¹ Fuente “INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE MODELOS HIDRÁULICOS Y APLICACIONES BÁSICAS” elaborado por Ing. Marcelo E. Hidalgo B.

3.5.4 PRESIÓN

Se asume que el flujo es permanente y la distribución de presiones a lo largo de la vertical es de tipo lineal, semejante a la distribución hidrostática, siempre que las líneas de corriente sean rectas.

3.6 CONCLUSIONES

- El uso de la modelación hidráulica fusionado con el conocimiento teórico constituyen una herramienta indispensable para lograr un diseño exitoso de estructuras y obras hidráulicas frecuentemente utilizadas en Ingeniería Civil.
- Para este caso no es factible cumplir con los requerimientos de similitud dinámica completa por lo que se justifica la utilización de criterios de similitud dinámica restringida, seleccionando a las fuerzas predominantes en éste modelo hidráulico y garantizando que con el diseño y operación del modelo dichas fuerzas se encuentren simuladas en la escala apropiada.
- Se utilizó el criterio de similitud de Froude porque en el modelo existe superficie libre de agua y las fuerzas predominantes son las de gravedad lo que permite obtener una similitud aproximada para representar el patrón de flujo.
- El análisis experimental de las alternativas propuestas será realizado en el modelo construido a escala 1:50 en material acrílico.

CAPÍTULO IV

DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN

4.1 IMPLANTACIÓN DEL MODELO: ESTRUCTURAS PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS

4.1.1 GENERALIDADES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA

El modelo se sitúa en el Laboratorio del CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional. El Laboratorio posee un sistema de bombeo de capacidad 800 l/s, un canal de recirculación de flujo y cuenta con varias tomas de agua a lo largo del perímetro de la planta del laboratorio. En el modelo bajo análisis se usan dos tomas de agua:

- (i) Para el tanque de entrada al Túnel de Desvío.
- (ii) Para el tanque de entrada a la Descarga Intermedia.

4.1.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO

Este trabajo únicamente se referirá a las estructuras de disipación de energía, razón por la cual se hará una mención referenciada a las estructuras complementarias. A continuación se presenta un resumen del modelo y sus componentes:

Tanques de Entrada

a) Tanque de entrada al Túnel de Desvío:

Tanque 1: 1,15 x 2,00 x 3,00 m³.

Tanque 2: 1,20 x 2,00 x 2,50 m³.

b) Tanque de entrada a la Descarga Intermedia:

Tanque 1: 2,10 x 1,00 x 2,50 m³.

Tanque 2: 1,20 x 1,00 x 2,50 m³.

Tanques para representación del tramo del río Paute

a) Tanque No. 1: Para simulación de la topografía del tramo superior

Tanque: 2,60 x 3,70 x 0,60 m³

b) Tanque No. 2: Para simulación de la topografía del tramo inferior

Tanque: 2,70 x 3,70 x 0,60 m³

Modelos del Túnel de Desvío y de la Descarga Intermedia

a) Estructura de Entrada, Túnel de Desvío, Estructura de Salida

- Estructura de Entrada
- Túnel de Desvío
- Estructura de Salida

b) Descarga Intermedia

- Tramo Final de la Cámara de Interconexión

Tanque de paredes de acrílico, (aguas arriba del vertedero de cimacio tipo Creager), con dimensiones 0,28 x 0,60 x 0,90 m³.

- Vertedero de Perfil tipo Creager

Todas las estructuras antes mencionadas han sido ya descritas en el trabajo de Titulación realizado previamente, "ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO Y EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOPLADORA".

4.1.2.1 Alternativas de disipadores de energía para la salida del túnel de desvío

a) Cuenco Disipador Tipo IV

- TRANSICIÓN.- ésta se implementará como la mejor opción de estructura de aproximación hasta el disipador y será en proporción de 2:1, es decir de la salida normal del túnel de sección circular de diámetro 9m, se pasará de manera progresiva a un baúl con funcionamiento a flujo libre de base de ancho de 18m manteniendo la pendiente del túnel (2%). La longitud de la transición es de 65m. Esta transición se ubica en la abscisa +22.547 (modelo) del túnel de desvío.



Fotografía No.8.- Vista lateral de la transición que se desarrolla desde la abscisa + 22.547 hasta la sección final del túnel de desvío en la abscisa + 23.751.

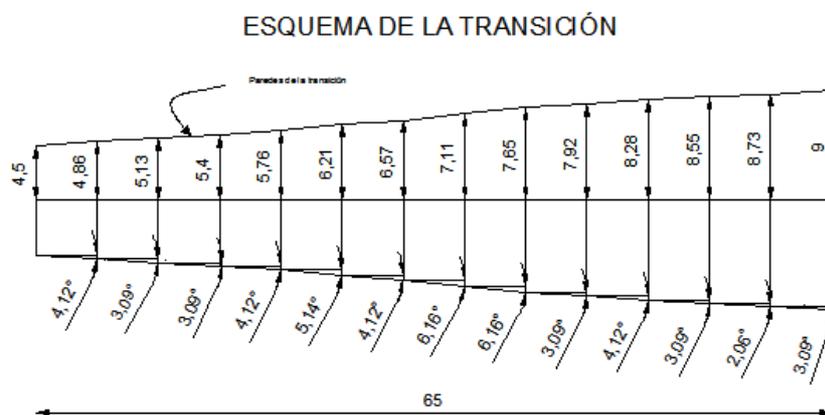


Figura No.41.- Esquema en planta de la transición.

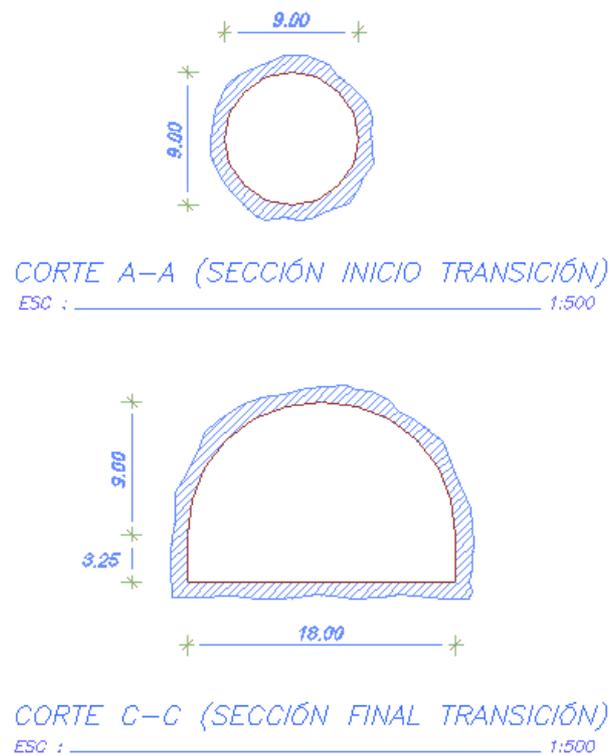
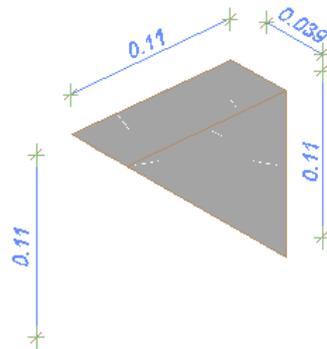


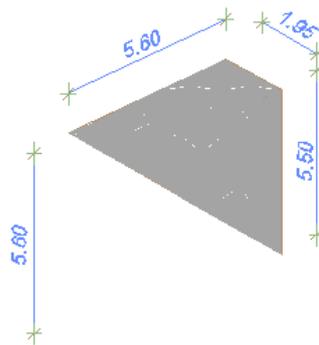
Figura No. 42.- Esquema de las secciones a la entrada y salida de la transición respectivamente.

- CUENCO DISIPADOR.- será implementado inmediatamente aguas abajo de la transición y se compone de una rampa (escalón negativo y la cubeta de disipación), y es el lugar donde se producirá el resalto hidráulico, por consiguiente donde se produzca la disipación de energía. Las características geométricas en modelo son: el escalón negativo $b=0.11\text{m}$ y $h=0.11\text{m}$ ($b=5.6\text{m}$ y $h=5.6\text{m}$ en prototipo), además el cuenco está conformado por la cubeta de dimensiones $L=1.20\text{m}$ ($L=60\text{m}$ en prototipo) y un ancho $=0.36\text{m}$ (18m en prototipo), para finalmente disponer de un umbral final triangular de $L=0.14\text{m}$ y $h=0.07\text{m}$ ($L=7\text{m}$, $h=3.5$ en prototipo), mismas dimensiones que se encuentran representadas en los planos PL No. 5-6-7-8 en los anexos.



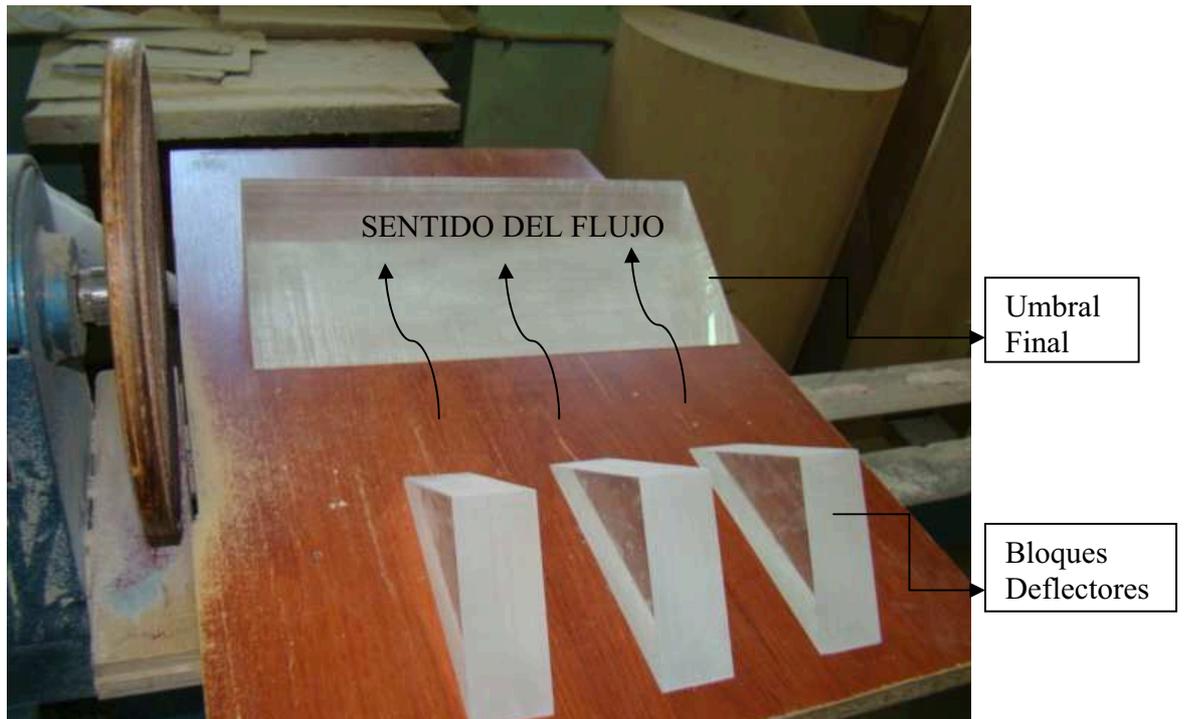
2-D2 BLOQUE DEFLECTOR (ISOMETRÍA)
 ESC : _____ 1:5

Figura No. 43.- Esquema de un bloque deflector para el modelo.



2-D2 BLOQUE DEFLECTOR (ISOMETRÍA)
 ESC : _____ 1:250

Figura No. 44.- Esquema de un bloque deflector para el prototipo.



Fotografía No.9.- Bloques deflectores y umbral final para el cuenco disipador.



Fotografía No.10.- Vista frontal del cuenco disipador y la transición.

Adicional a los elementos antes mencionados se dispone de paredes laterales desde la salida de la transición hasta el final del umbral como muestra el siguiente esquema:

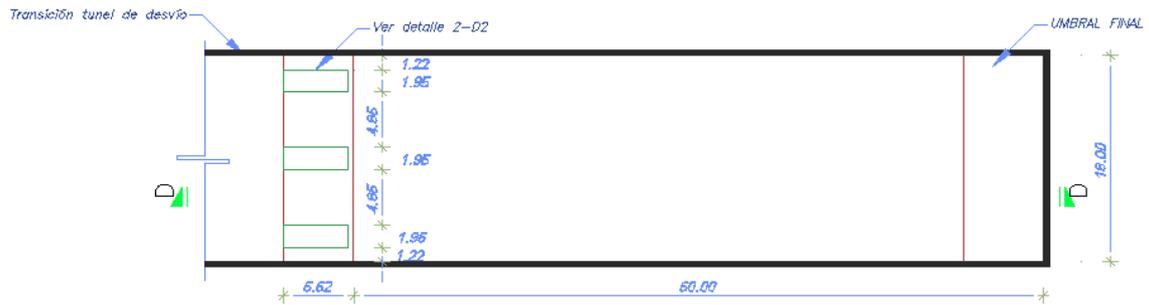


Figura No. 45.- Esquema en planta del cuenco disipador tipo IV



Figura No. 46.- Vista lateral del cuenco disipador tipo IV.



Fotografía No. 11.- Cuenco disipador tipo IV colocado inmediatamente aguas debajo de la transición.
Vista Superior.



Fotografía No. 12.- Cuenco disipador tipo IV colocado inmediatamente aguas debajo de la transición.
Vista Frontal.

b) Salto en Esquí

Para el diseño del Salto de Esquí, se mantuvo el $Q = 1130 \text{ m}^3/\text{s}$, configurándose la geometría, forma del chorro, alcance máximo, que se presenta a continuación:

i) *Geometría del Salto de Esquí*

El Salto en Esquí en la alternativa 1 contempla un radio de curvatura de 37.93 m en prototipo, donde se impuso un ángulo del labio del esquí de salida $\Phi = 35^\circ$ mismo que proporciona mejores resultados según lo explica la teoría.

El ancho definido para este dissipador se mantuvo de 9 m igual al ancho de salida del túnel de desvío en su sección tipo baúl.

Además se implementó una curvatura en planta de radio 48.11m con la finalidad de que el chorro caiga en la zona central del cauce natural del río.

Las paredes del salto en esquí se conformaron de la misma altura de la sección tipo baúl en la salida del túnel de desvío, es decir 9m.

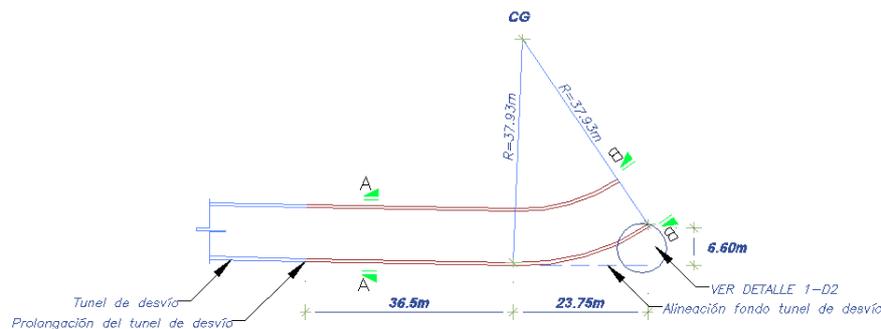


Figura No.47.- Geometría del Esquí - Variante 1. Vista lateral.

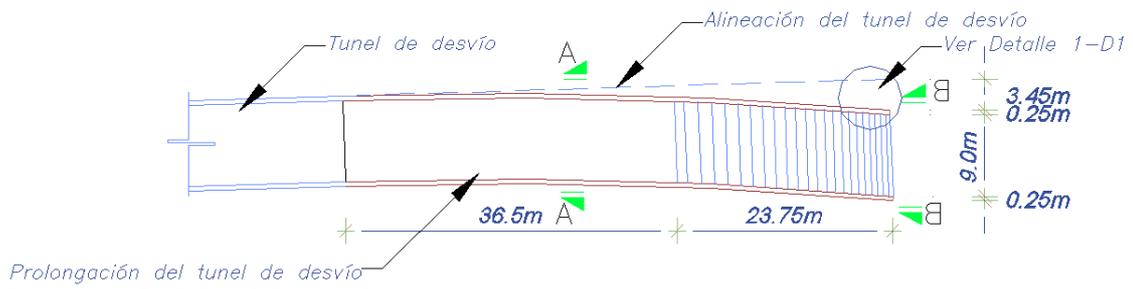


Figura No.48.- Geometría del Disipador tipo Salto en Esquí – Variante 1. Vista en planta.

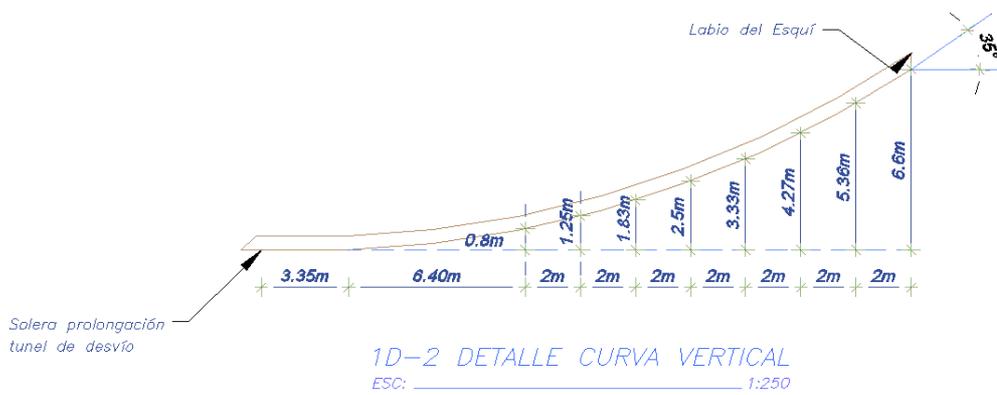


Figura No. 49.- Detalle de la curva vertical – Variante 1.



Fotografía No.13.- Vista del esquí a la salida del túnel de desvío. Variante 1.

El Salto en Esquí en la variante 2 contempla la misma geometría de la variante 1, con excepción de la variación del ángulo de labio del esquí a la salida del dissipador mismo que resultó del corte de la estructura de la variante-1 $\Phi = 27^\circ$.

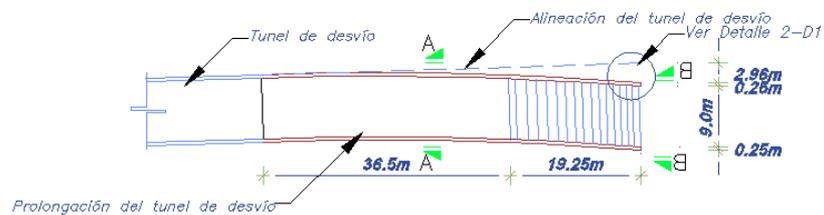


Figura No.50.- Geometría del Esquí - Variante 2. Vista en planta.

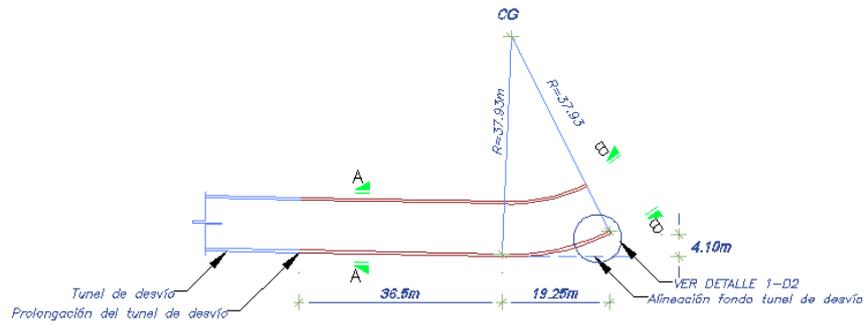


Figura No.51.- Geometría del Esquí - Variante 2. Vista lateral.

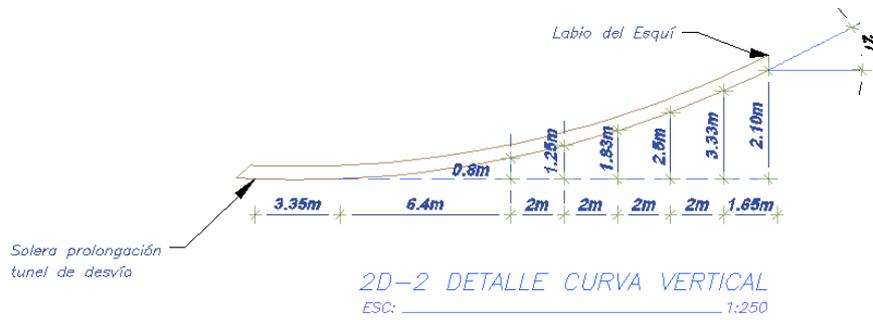


Figura No. 52.- Detalle de la curva vertical – Variante 2.

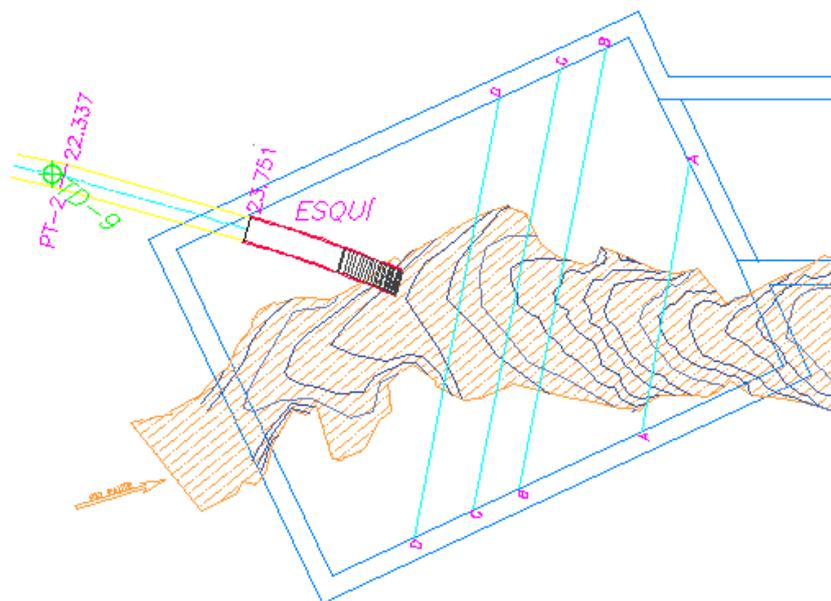


Figura No. 53.- Esquema de las secciones donde se medirán las velocidades y calados con el esquí implantado.

4.2 INSTRUMENTACIÓN BÁSICA Y EQUIPAMIENTO

Para la medición de las magnitudes requeridas en esta investigación se emplearon los siguientes instrumentos:

- a) Limnímetros.- usados para medir la carga en cada una de las secciones de interés (boca del túnel de desvío, zona plana del esquí, cubeta de disipación). La lectura del valor de la carga permite calcular por medio de la velocidad la disipación de energía, los limnímetros empleados son soportados sobre una base de madera. Cada limnómetro fue nivelado y colocado de forma perpendicular a la base de la sección, las medidas fueron tomadas con una aproximación de décima de milímetro.



Fotografía No. 14.- Limnómetro móvil empleado en la sección circular del túnel de desvío



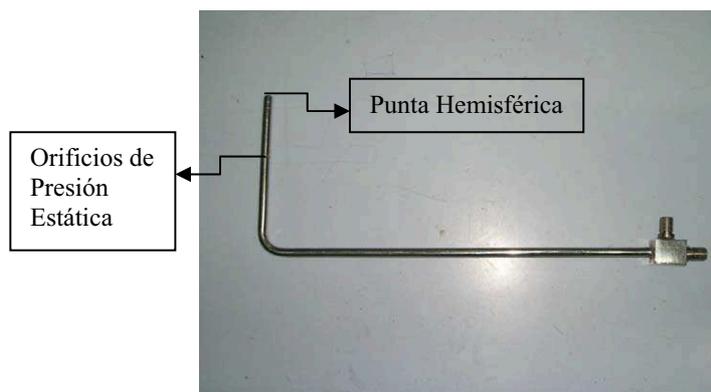
Fotografía No. 15.- Limnómetro empleado en la sección de la cubeta de disipación.

- b) Micromolinete.- para la medición de velocidades de flujo, dispone de un contador electrónico mismo que marca la velocidad de manera directa expresada en m/s.



Fotografía No.16.- Vista del micromolinete.

- c) Tubo de Pitot.- éstos son usados para la medición de velocidades en un punto determinado de flujo líquido, en este caso se empleó el tubo Pitot simple para lo cual fue necesario implementar piezómetros para determinar la carga de presión y por diferencia de lecturas obtener la energía cinética para calcular la velocidad.



Fotografía No. 17.- Tubo Pitot Prandtl

d) Vertederos triangulares.- para la medición de caudales al inicio y al final del modelo.



Fotografía No. 18.- Vista frontal de un vertedero triangular de medida.

4.3 CURVAS DE DESCARGA PARA VERTEDEROS DE MEDIDA¹

En las siguientes figuras se presentan las Curvas de Descarga para los vertederos utilizados para la medición del caudal que transita a lo largo del modelo.



Fotografía No. 19.- Ubicación de vertedero a la salida del modelo.

¹ Fuente Tesis de Proyecto de Titulación “ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO Y EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOPLADORA”



Fotografía No. 20.- Ubicación de vertedero en el tanque de entrada (inicio del modelo).

4.3.1 VERTEDERO RECTANGULAR EN EL TANQUE DE ENTRADA AL MODELO GENERAL

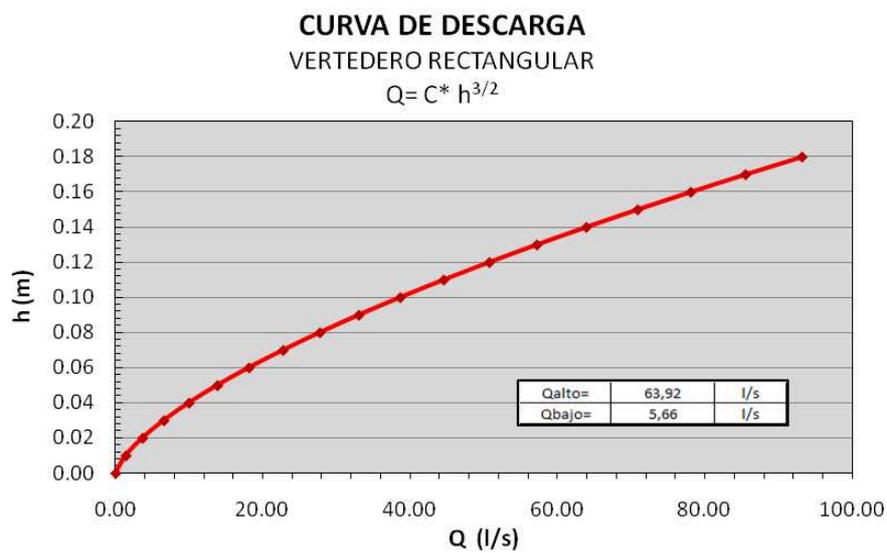


Figura No. 54: Curva de descarga del vertedero rectangular

4.3.2 VERTEDERO TRIANGULAR EN EL TANQUE ANTES DE LA DESCARGA INTERMEDIA²

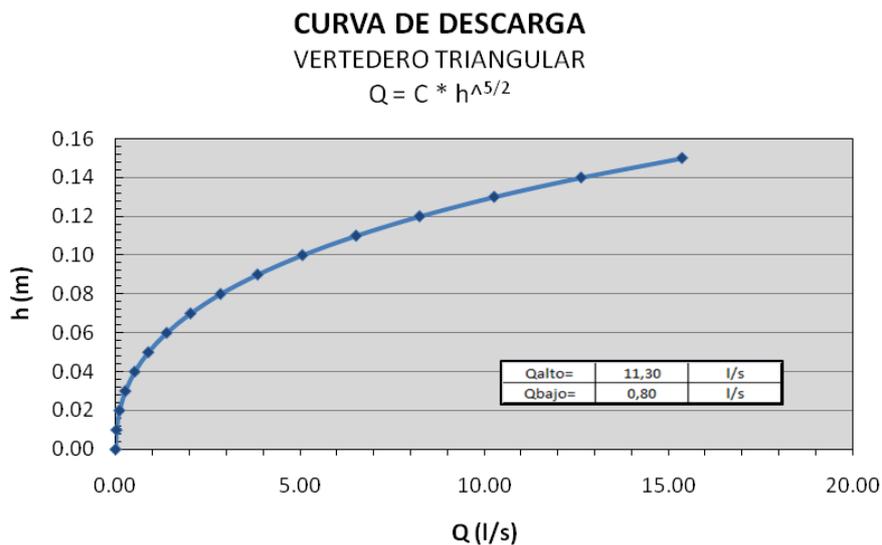


Figura No. 55: Curva de descarga del vertedero triangular de entrada a la Descarga Intermedia

4.3.3 VERTEDERO TRIANGULAR EN EL TANQUE DE SALIDA DEL MODELO GENERAL

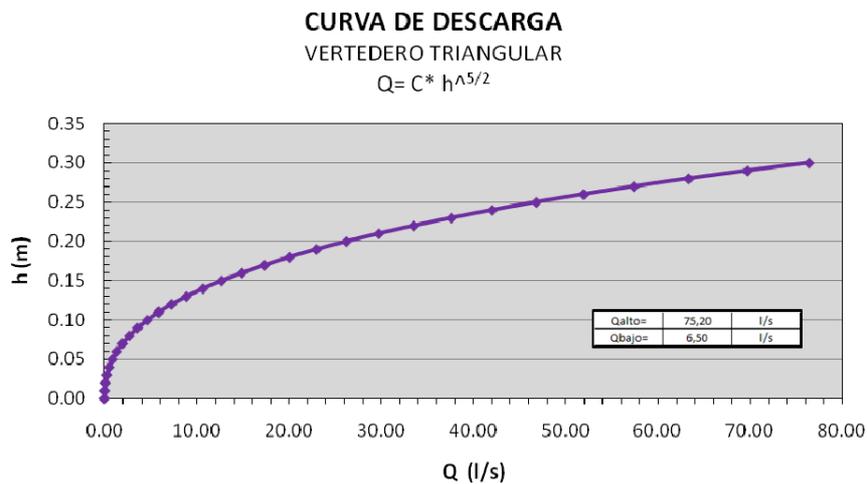


Figura No. 56: Curva de descarga del vertedero triangular a la salida del modelo

² Fuente Tesis de Proyecto de Titulación "ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO Y EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOPLADORA"

4.4 PLAN DE PRUEBAS Y DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE LAS FASES DE OPERACIÓN DEL MODELO

En la investigación se propuso el siguiente Plan de Pruebas:

DISIPADOR	VARIANTE	TUNEL DE DESVÍO		OBSERVACIONES
		Caudal Prototipo (m ³ /s)	Caudal Modelo (l/s)	
DISIPADOR TIPO IV	Transición, bloques deflectores, umbral final	100	5.7	Se obtienen velocidades y calados para determinación de la disipación
		200	11.3	
		500	28.3	
		800	45.8	
		1130	63.9	
	Transición, bloques deflectores, viga horizontal, umbral final	100	5.7	Se obtienen velocidades y calados para determinación de la disipación
		200	11.3	
		500	28.3	
		800	45.8	
		1130	63.9	

Tabla No.4.- Plan de pruebas propuesto para los ensayos con la alternativa de Salto de Esquí.

DISIPADOR	VARIANTE	TUNEL DE DESVÍO		OBSERVACIONES
		Caudal Prototipo (m ³ /s)	Caudal Modelo (l/s)	
SALTO DE ESQUÍ	Φ = 35° Altura del labio del esquí = 6.6 m	1000	54.1	Se obtienen velocidades y calados para determinación de la disipación
		1130	63.9	
	Φ = 27° Altura del labio del esquí = 4.09 m	100	5.7	Se obtienen velocidades y calados para determinación de la disipación
		200	11.3	
		330	13.4	
		500	28.3	
		800	45.8	
		1130	63.9	
	Φ = 35° Altura del labio del esquí = 4.6 m	100	5.7	Se obtienen velocidades y calados para determinación de la disipación
		200	11.3	
		500	28.3	
		800	45.8	
		1130	63.9	
	Φ = 35° Altura del labio del esquí = 4.6 m y lechada de cemento	100	5.7	* Resultados con la solución planteada (lechada de cemento)
		200	11.3	
		500	28.3	
		800	45.8	
		800*	45.8	
		1130	63.9	
		1130*	63.9	

Tabla No.5.- Plan de pruebas propuesto para los ensayos con la alternativa de Salto de Esquí.

Para la medición de la disipación de energía, se debe medir la velocidad media del flujo, aguas arriba de la transición, y aguas abajo de la estructura de disipación, es decir donde se note que el flujo tiene un régimen subcrítico, para lo cual fue necesario definir secciones de medición de velocidades y de calado, siendo definidas éstas como A-A, B-B, C-C y D-D.



Fotografía No. 21.- Secciones de medición de velocidades y disipación de energía.

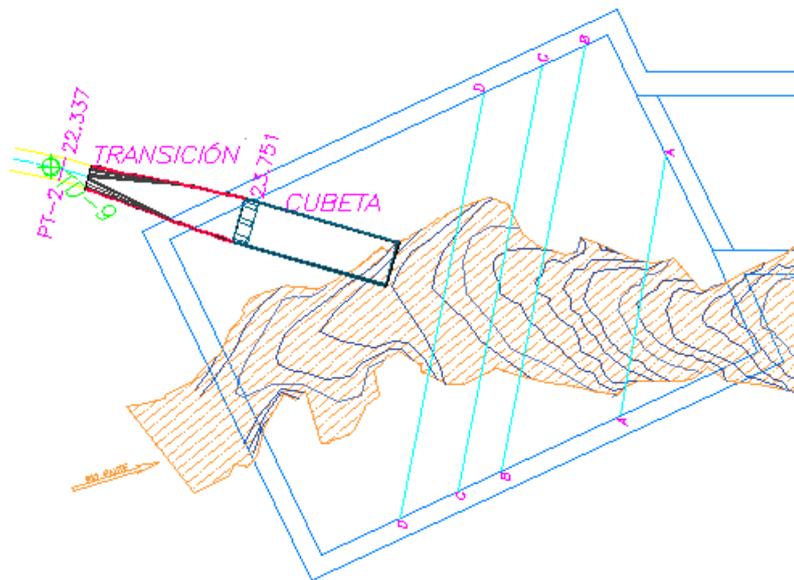


Figura No. 57.- Esquema de las secciones donde se medirán las velocidades y calados con el esquí implantado.

La ubicación y características de las secciones se encuentran en los planos anexos.

Para una fácil identificación de las secciones de medición muestra el siguiente esquema:

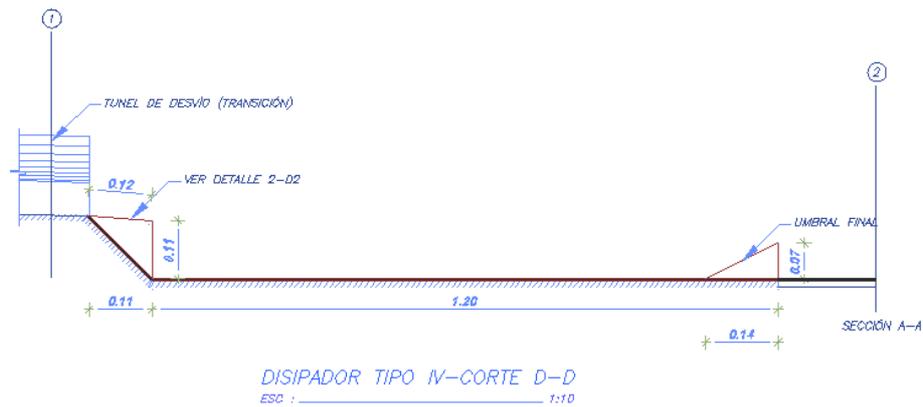


Figura No. 58.- Esquema de las secciones donde se realizó las mediciones

4.5 CONCLUSIONES

- Se trabajó con la misma escala definida para el modelo de investigación 1:50.
- Se construyeron dos tipos de dissipadores Cuenco tipo IV y Salto de Esquí, mismos que contaron con dos y cuatro variantes respectivamente.
- Se utilizó el mismo equipo e instrumentación empleado en el estudio experimental en modelo hidráulico del túnel de desvío y descarga intermedia de la central hidroeléctrica Sopladora, para la medición de magnitudes físicas necesarias para esta investigación.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS EXPERIMENTAL SOBRE LA OPERACIÓN Y EFICIENCIA DE LOS DISIPADORES PROPUESTOS Y SUS MODIFICACIONES

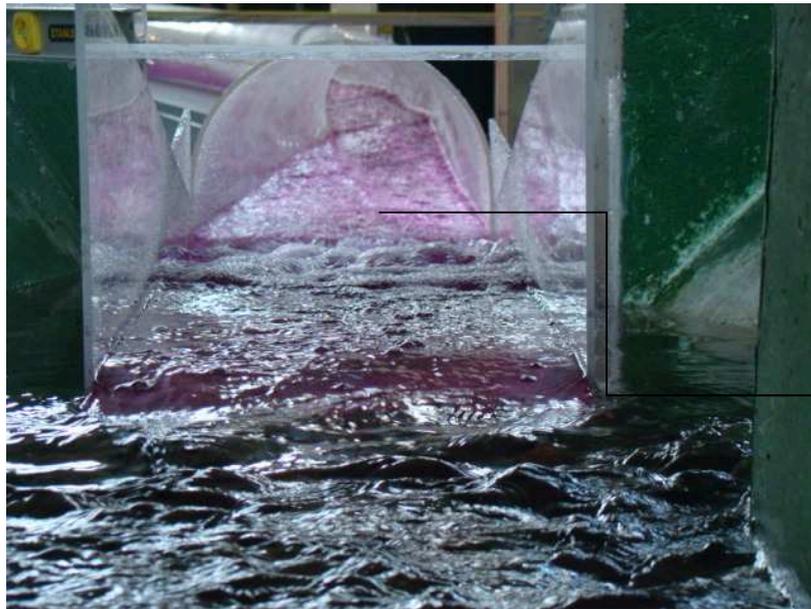
5.1 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL CON LOS DISEÑOS PROPUESTOS

Definir la eficiencia y las características de operación de las dos estructuras de disipación de energía, Cuenco Tipo IV y Salto de Esquí, que se acoplen a las condiciones del flujo en la descarga del túnel de desvío del proyecto Sopladora y recomendar la mejor alternativa.

5.2 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL DISEÑO Y SUS ALTERNATIVAS

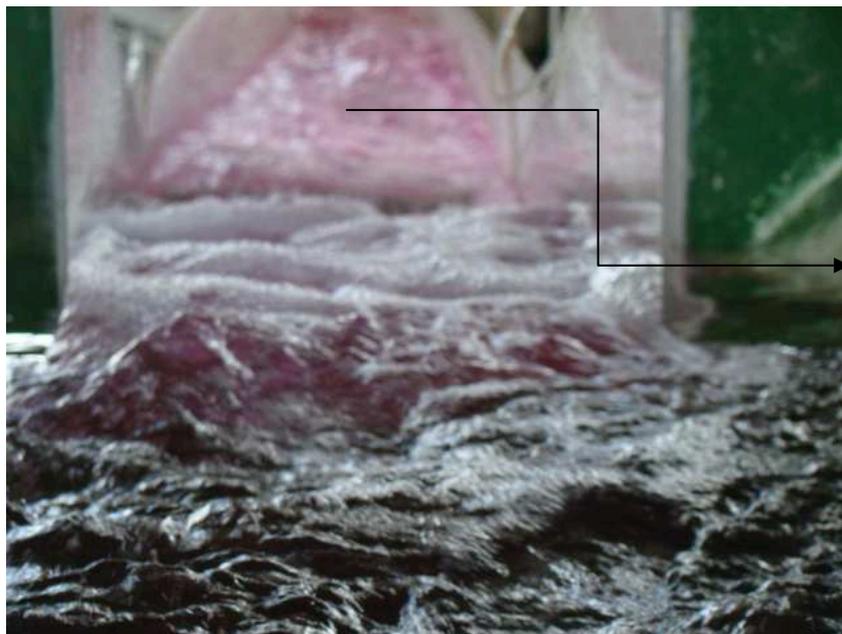
5.2.1 CUENCO DISIPADOR TIPO IV

Previo al análisis del funcionamiento de este disipador, se comprobó el funcionamiento de la estructura de transición que se implementó aguas arriba del disipador tipo IV, donde el flujo se presentó con ondas cruzadas en especial para los caudales más grandes ($Q = 500, 800, 1130 \text{ m}^3/\text{s}$) como muestran las fotografías No. 22,23,24 y 25, estas ondas cruzadas se presentaron con cierta intensidad al inicio de la transición pero a lo largo de la misma se hizo notoria su desaparición como muestra la fotografía.



Onda cruzada debido a la influencia de la curvatura en planta del túnel de desvío.

Fotografía No.22.- Formación de ondas cruzadas en la transición.



Onda cruzada debido a la influencia de la curvatura en planta del túnel de desvío.

Fotografía No.23.- Formación de ondas cruzadas en la transición para $Q = 500\text{m}^3/\text{s}$.



Onda cruzada debido a la influencia de la curvatura en planta del túnel de desvío.

Fotografía No.24.- Formación de ondas cruzadas en la transición $Q = 800\text{m}^3/\text{s}$.

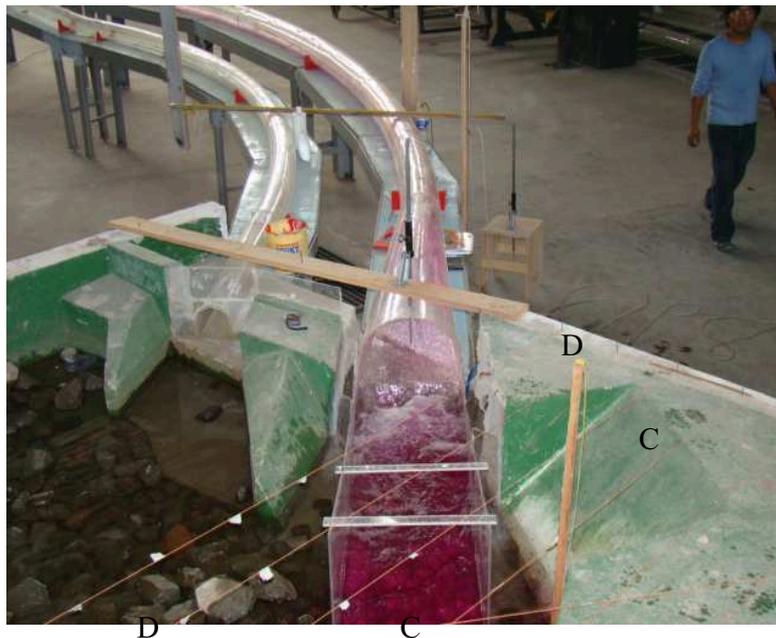


Onda cruzada debido a la influencia de la curvatura en planta del túnel de desvío.

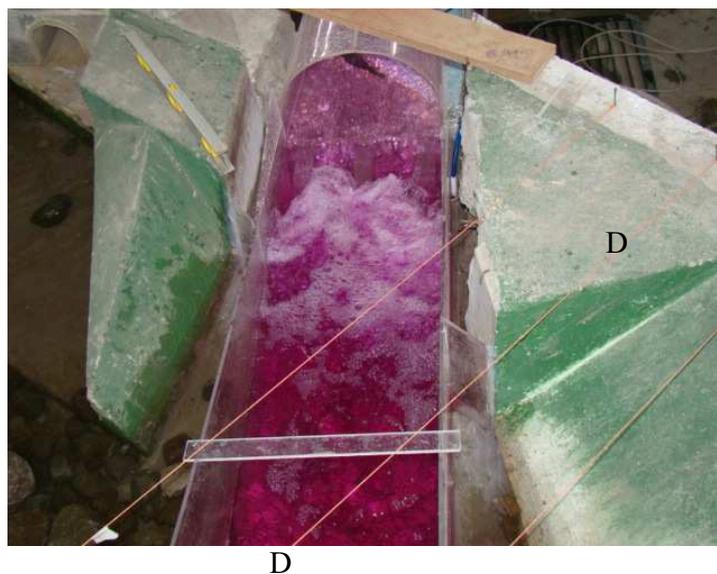
Fotografía No.25.- Formación de ondas cruzadas en la transición $Q = 1130\text{m}^3/\text{s}$.

Otro factor determinante en la disipación de la energía es el control del nivel aguas abajo del río (colchón de agua), mismo que debe variar para cada caudal, este es el factor más categórico ya que de este nivel depende la ubicación del resalto hidráulico y por consiguiente la eficiencia de la disipación.

Para los caudales pequeños ($Q \leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$), se observó control desde el río, desarrollándose un resalto. A la salida de la cubeta de disipación se obtuvo un flujo totalmente tranquilo. Se midió la disipación de energía en la sección A-A, de esta manera se puede obtener la disipación de energía relativa en una sección del río, donde, posteriormente se podrá hacer una comparación de eficiencia de la disipación obtenida por los diferentes caudales.



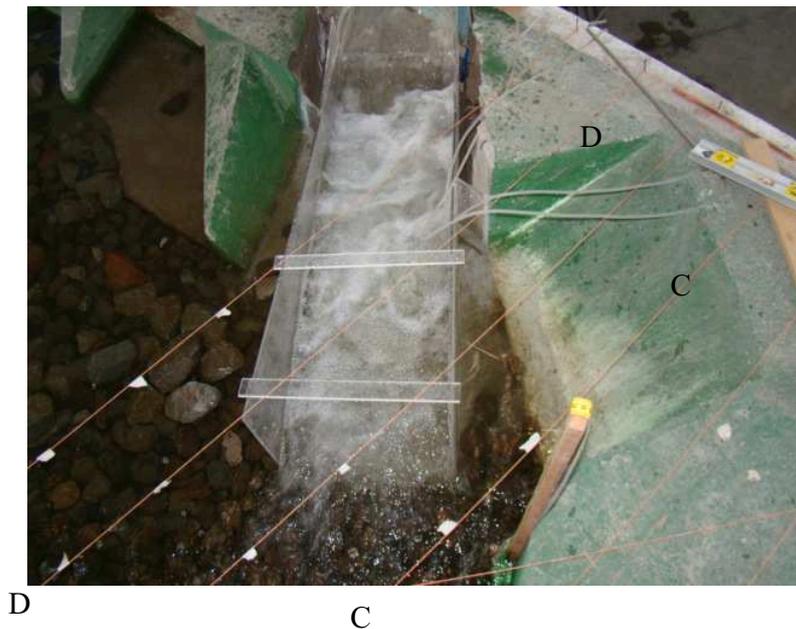
Fotografía No. 26.- Prueba para $Q=100\text{m}^3/\text{s}$, resalto hidráulico sumergido.



Fotografía No. 27.- Prueba para $Q=200\text{m}^3/\text{s}$, resalto hidráulico sumergido.

Para el caudal de diseño ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$) el resalto se produjo con un leve desplazamiento, es decir el pié del mismo se ubicó aproximadamente a 15 cm (modelo), 7.5 m (prototipo), de la base de los bloques deflectores.

La medición de la disipación de energía fue posible al final de la cubeta de disipación, sobre el umbral final. En este caudal también se midió la disipación de energía en la sección A-A.



Fotografía No. 28.- Prueba para $Q=500\text{m}^3/\text{s}$, puede notarse como el resalto hidráulico empieza a desplazarse del pie de los deflectores.

Para los caudales restantes ($Q \geq 800 \text{ m}^3/\text{s}$) el resalto hidráulico presenta una condición de desplazamiento considerable sin embargo se mantiene dentro de la cubeta lo cuál permite la disipación de energía, sin embargo resulta poco factible la medición de la disipación de energía en la zona de la salida de la cubeta, para lo cual se hizo uso de las secciones antes definidas en el río para medir la velocidad, la sección usada para la medición fue la A-A.



Fotografía No. 29.- Prueba para $Q=800\text{m}^3/\text{s}$, puede notarse como la condición del resalto hidráulico es de total desplazamiento.



Fotografía No. 30.- Prueba para $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$, puede notarse como la condición del resalto hidráulico es similar al caudal $Q=800\text{m}^3/\text{s}$.

A continuación se presenta un cuadro de resultados de disipación de energía que compara los resultados obtenidos de los caudales $Q = 100, 200$ y $500 \text{ m}^3/\text{s}$ que fue medida con la velocidad y la carga de posición respectiva. La medición de la disipación de energía se realizó al final de la cubeta de disipación para los tres caudales, presentándose los siguientes resultados:

Determinación de la Disipación de Energía hasta el final de la Cubeta de Disipación								
Caudal Prototipo (m^3/s)	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	Pérdida de energía (m)	% Disipación
100	6.97	12.516	2.140	0	0.792	6.230	10.832	63.37
200	7.97	14.708	2.655	0	1.220	7.880	13.695	63.25
500	8.97	18.385	4.680	0	4.596	10.680	19.121	61.92

Tabla No. 6.- Disipación de energía en la salida de la cubeta de disipación.

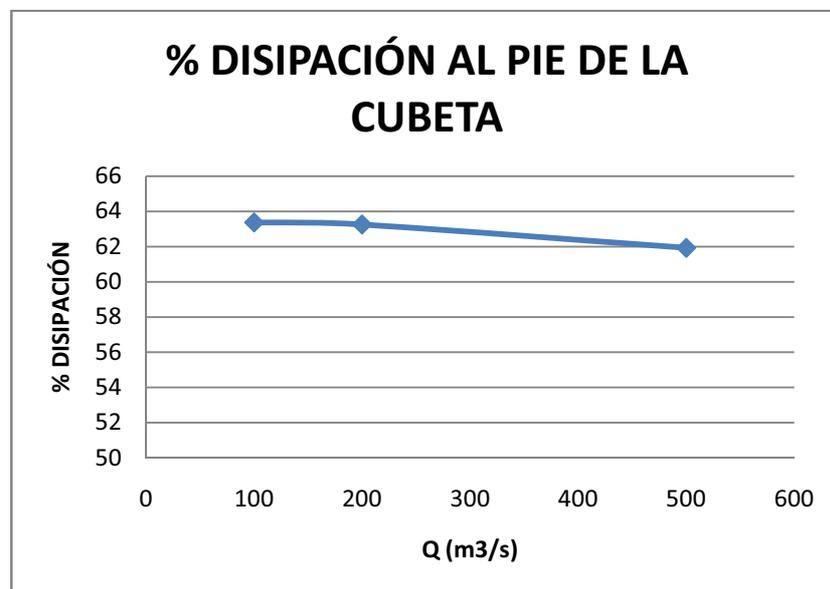


Figura No.- 59.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega del disipador.

En la tabla No. 6 se puede observar la tendencia de disipación de energía, que a medida que el caudal se aumenta la disipación de energía disminuye, sin embargo los valores obtenidos son muy similares.

En el siguiente cuadro se muestra la disipación de energía medida para todos los caudales de prueba $Q = 100, 200, 500, 800, 1130 \text{ m}^3/\text{s}$ en la sección del río definida como A – A aguas abajo del disipador:

Determinación de la Disipación de Energía hasta la Sección del Río A - A Aguas Abajo del Disipador								
Caudal Prototipo (m^3/s)	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	Pérdida de energía (m)	% Disipación
100	6.60	12.516	2.140	0	0.407	2.350	14.366	85.90
200	6.60	14.708	2.655	0	0.560	3.250	17.014	83.90
500	6.60	18.385	4.680	0	1.768	4.500	23.848	83.66
800	6.60	19.728	5.615	0	3.698	5.350	21.534	67.18
1130	6.60	20.294	7.770	0	3.286	6.150	21.837	61.75

Tabla No. 7.- Disipación de energía en la sección del río A – A.

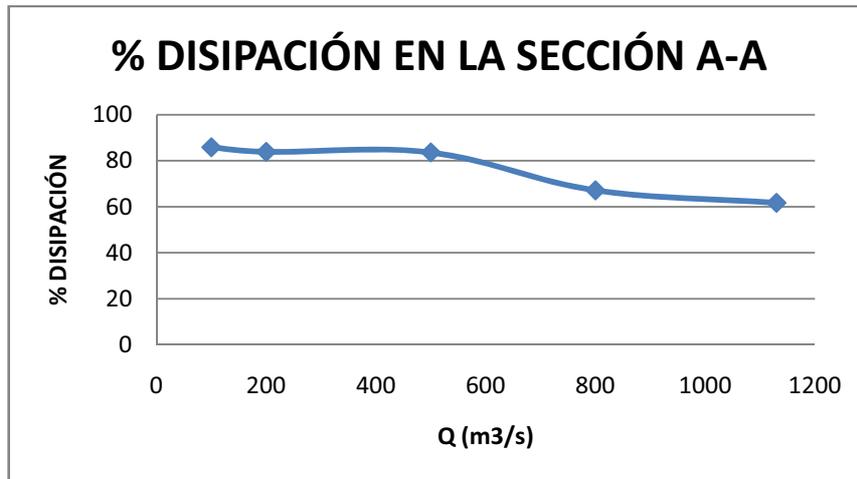


Figura No.- 60.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega del disipador.

En la tabla No. 7 se puede observar que la disipación de energía es inversamente proporcional al incremento de caudal, se observó que esta tendencia se dio debido a que la distancia desde el final del resalto hidráulico hasta la sección de medición disminuye conforme al incremento del caudal, ya que el resalto incrementa su longitud, lo que produce una menor disipación por el lecho rocoso del río, sin embargo la estructura de disipación funciona de manera eficiente para el caudal de diseño $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$.

En este caso, no se presentan cuencos de socavación, ya que el umbral final en la cubeta evita que esto suceda incluso para los caudales más grandes.

5.2.2 SALTO EN ESQUÍ – VARIANTES 1 Y 2

VARIANTE 1

En las observaciones efectuadas fue muy notoria la desigualdad del chorro a la salida del esquí, condición que se debe a la influencia de la segunda curvatura en planta que presenta el túnel de desvío e incrementándose este efecto debido a la curvatura en planta del disipador.



Fotografía No. 31.- Vista aérea del chorro producto del $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$ donde se nota claramente la desigualdad del chorro debido a la influencia de la segunda curvatura en planta – Variante 1.



Fotografía No. 32.- Vista lateral del chorro producto del $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 1.

Como resultado del funcionamiento con este caudal y variante se produjo el cuenco de socavación que se muestra en la fotografía siguiente:



Fotografía No. 33.- Cuenco de socavación producto del $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 1.

En la serie de observaciones efectuadas se logró identificar que el caudal límite de funcionamiento para la variante 1 del dissipador es $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ donde de igual manera que para $Q = 1130 \text{ m}^3/\text{s}$ es posible observar claramente la desigualdad en altura del chorro a la salida del esquí.



Fotografía No. 34.- Vista aérea del chorro producto del caudal límite de funcionamiento $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 1.

Como resultado del funcionamiento con este caudal se produjo el cuenco de socavación que se presenta en la siguiente figura:



Fotografía No. 35.- Cuenco de socavación producto del caudal de funcionamiento límite $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 1.

Pese a los cuencos de socavación producidos se observó que el que el arrastre del material del lecho del río fue mucho menor al que se produjo cuando la estructura de disipación era el Kumin, lo cual permite valorar los buenos resultados que se logran con la alternativa del Salto en Esquí.

VARIANTE 2

El funcionamiento de la estructura modificada fue mejor debido a que la altura del labio del esquí fue disminuida por ser éste un factor determinante en la determinación del caudal límite de funcionamiento, debido al remanso en el túnel de desvío que ésta altura produce.

Es posible observar que la variante 2 tuvo una serie de caudales de operación mayor, donde el caudal límite de funcionamiento fue definido experimentalmente, siendo este $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se notó que se mantuvo la influencia de las curvaturas en planta lo cual hace que el chorro producido sea desigual como muestran las fotografías siguientes:



Fotografía No. 36.- Vista superior del chorro producto de $Q=1130 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 37.- Vista lateral del chorro producto de $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 38.- Vista aérea del chorro producto de $Q=800\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 39.- Vista aérea del chorro producto de $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 40.- Vista lateral del chorro producto del caudal de funcionamiento límite $Q=330\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 41.- Vista aérea del funcionamiento del dissipador producto de caudales inferiores al límite de funcionamiento $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.

Para los caudales que están por debajo del límite de funcionamiento del esquí $Q=330\text{m}^3/\text{s}$, se produce un control dentro del túnel, dando fruto a un resalto hidráulico, lo que provoca disipación de energía que no corresponde a la eficiencia del dissipador sino a las condiciones que éste provoca en el flujo.



Control aguas arriba producto del esquí.

Fotografía No. 42.- Vista aérea del remanso y resalto hidráulico producto del control de la altura del labio del esquí. $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 43.- Vista lateral del funcionamiento del esquí. $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ – Alternativa 2.



Pie del resalto
hidráulico al
interior del
túnel de
desvío.

Fotografía No. 44.- Vista del remanso y resalto hidráulico dentro del túnel de desvío producto del control de la altura del labio del esquí. $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.

Pese al mejor funcionamiento de la estructura de disipación en cuanto a la operación de una serie mayor de caudales, la influencia del ángulo en la salida del labio del esquí es muy representativa ya que al ser éste menos pronunciado se

produce un mayor arrastre de material del lecho del río como presenta la siguiente fotografía:



Fotografía No. 45.- Cuenco de socavación producto del caudal $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



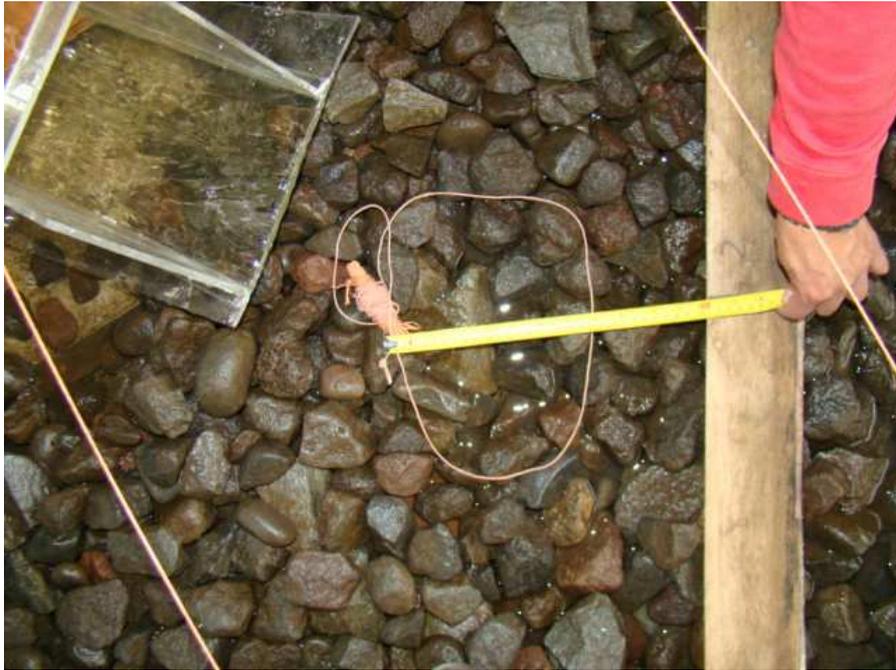
Fotografía No. 46.- Cuenco de socavación producto del caudal $Q=800\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 47.- Cuenco de socavación producto del caudal $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 48.- Cuenco de socavación producto del caudal de funcionamiento límite $Q=330\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 49.- Cuenco de socavación producto del caudal $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No. 50.- Cuenco de socavación producto del caudal $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ – Variante 2.

En las siguientes tablas, se muestran las características del chorro en las alternativas 1 y 2.

Caudal del prototipo (m ³ /s)	Longitud del chorro (m)		Ancho de difusión del chorro (m)	Altura de lámina de agua con respecto al labio del Esquí (m)		Calado a la salida del Esquí (m)	Velocidad Labio del Esquí (m/s)
	Izquierda	Derecha		Max. Superior	Max. Inferior		
1000	40.00	28.00	28.00	11.00	4.25	8.00	17.112
1130	42.00	34.00	28.00	11.75	4.75	8.38	17.466

Tabla No.8.- Características del chorro del esquí, $\Phi=35^\circ$ con altura de 6.6m y curvatura en planta – Variante 1
1.

En esta tabla puede notarse la desigualdad del chorro producto de la segunda curvatura en planta del túnel de desvío.

Caudal del prototipo (m ³ /s)	Ubicación del Resalto Hidráulico		Longitud del Chorro (m)	Ancho de Difusión del Chorro (m)	Abscisa (m)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Observaciones
	Absc. inicio R.H	Absc. final R.H						
100	22.93	23.73	5.5	15.5	22.93	2.015	12.66	Inicio R.H.
					26.15	3.250	4.10	Labio Esquí
200	24.28	25.20	9.5	17	24.28	3.170	14.78	Inicio R.H.
					26.15	5.250	6.01	Labio Esquí
330	24.96	25.71	15	18.5	26.15	2.390	16.19	Labio Esquí

Tabla No.9.- Características del chorro del esquí, $\Phi=27^\circ$ con altura 4.09 m y curvatura en planta, para caudales bajos.

En la tabla No. 9 se evidencia el funcionamiento de la estructura modificada para los caudales bajos.

Sin embargo la disipación no sólo se produce debido al salto de esquí, sino que también es producto del resalto hidráulico que se produce al interior del túnel, mismo que no permite ver un chorro conformado en su totalidad.

Se determinó que el caudal mínimo para el funcionamiento del esquí en esta variante es el mostrado en la tabla y dispone de un solo dato para cada campo de observación ($Q=330\text{m}^3/\text{s}$).

Caudal del prototipo (m^3/s)	Longitud del chorro (m)		Ancho de difusión del chorro (m)	Altura de lámina de agua con respecto al labio del Esquí (m)		Calado a la salida del Esquí (m)	Velocidad Labio del Esquí (m/s)
	Izquierda	Derecha		Max. Superior	Max. Inferior		
500	37.00	16.50	21.00	7.55	2.3	4.50	15.486
800	41.00	32.00	23.00	8.80	5.05	5.80	17.112
1130	44.00	32.00	24.50	9.55	5.4	7.60	18.809

Tabla No.10.- Características del chorro del esquí, $\Phi=27^\circ$ con altura 4.09 m y curvatura en planta, para caudales altos.

En la tabla No. 10, se evidencia la influencia de las curvaturas en planta tanto del túnel de desvío como del disipador, presentándose la desigualdad en el alcance del chorro en la margen izquierda del mismo, debido a este funcionamiento no se evaluó la disipación de energía, por el contrario se hace una comparación de los cuencos de socavación producto de cada observación realizada.

Cuando fueron evaluados los caudales mayores, se observó que el arrastre del material del lecho fue muy elevado ya que se profundizó de modo que logró remover todo el material que se colocó en el lecho del río.

Variante de Disipador	Caudal prototipo (m ³ /s)	Cuenco de socavación		
		Longitud mayor (m)	ancho mayor (m)	profundidad mayor(m)
Φ = 35° Altura del labio del esquí = 6.6 m	1130	53.5	37	4.5
	1000	51.5	35.00	4.3
Φ = 27° Altura del labio del esquí = 4.09 m	1130	63.5	40.5	8.5
	800	40.5	38	5.8
	500	36.5	29.5	5.9
	330	27	19.5	1.75
	200	12	9	1.75
	100	13	7.5	1.5

Tabla No.11.- Características de los cuencos de socavación para las alternativas $\Phi=35^\circ$ y $h=6.6$ m; y $\Phi=27^\circ$ y $h=4.09$ m

En la tabla No. 11 se puede observar fundamentalmente que la variación en el ángulo de salida del labio del esquí tiene mucha influencia mucho en el arrastre del material del lecho lo cual permite definir que la máxima profundidad determinada experimentalmente, fue menos agresiva cuando el ángulo en la salida del labio del esquí fue de $\Phi=35^\circ$, este resultado se debe a que se presenta una mejor difusión del chorro y a su vez se produce mejor la mezcla aire – agua , haciendo de esta manera que la restitución del flujo al cauce natural se presente de mejor forma.

5.3 DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL MODELO DE CADA ALTERNATIVA DE DISIPACIÓN

5.3.1 DISIPADOR TIPO IV – VARIANTE 2

Luego de las observaciones realizadas en la evaluación del la primera variante de disipador, se recomendó introducir ciertos cambios en el diseño presentado especialmente en la ubicación de la cubeta de disipación, además de la colocación de una viga con una sección de 2 m x 1m del ancho de la cubeta de disipación y, misma que se colocó 10 m aguas abajo del pie de los deflectores de rampa, con el fin de lograr un mejor comportamiento del flujo a su paso por la estructura, eliminando el rechazo del resalto hidráulico para el caudal de diseño $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con antelación se evaluó el funcionamiento del disipador con un profundizamiento de la cubeta, con el fin de definir este comportamiento se aumentó el nivel de agua en la zona del lecho del río, dándose un comportamiento mejor en la ubicación del resalto, lo cuál sirvió para modificar la altura del escalón negativo entre la transición y cubeta, cambiando de 5.60 m a 7.42 m.

Se dispondrá en la rampa de la cubeta una ampliación de la misma que será de 2m tanto en horizontal como en vertical, dando como resultado una rampa más larga que propiciará el mejor desarrollo del resalto hidráulico. A continuación se muestra un esquema de la modificación planteada:

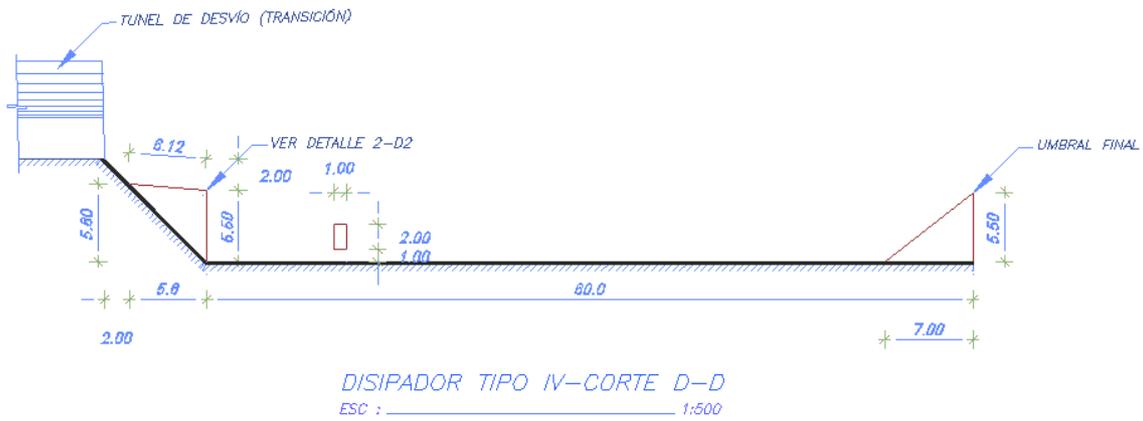


Figura No. 61.- Esquema de la modificación a geometría original del dissipador. Vista de Perfil.

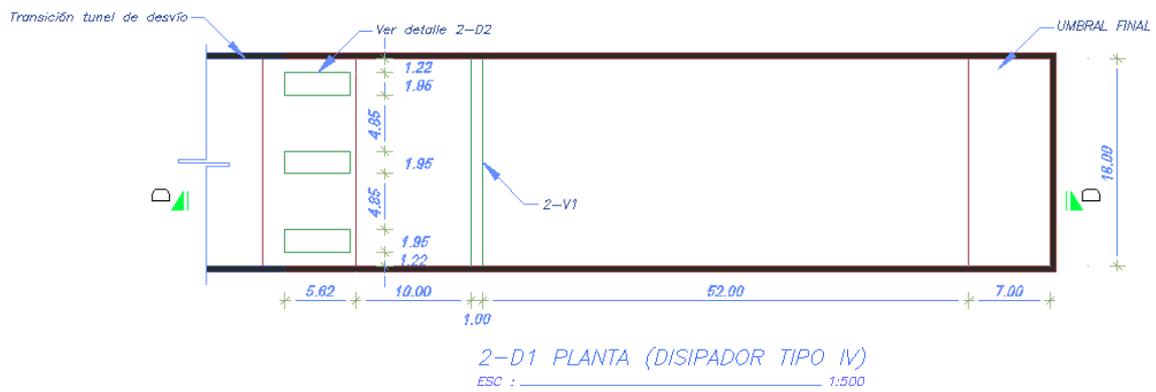


Figura No. 62.- Esquema de la modificación a geometría original del dissipador. Vista en Planta.

A continuación se presentan varias fotografías de la implantación modificada de la cubeta de disipación:



Fotografía No.51.- Nueva implantación de la cubeta. Vista frontal.



Fotografía No.52.- Vista aérea de la nueva implantación de la cubeta. Vista frontal.



Fotografía No.53.- Vista lateral de la nueva implantación de la cubeta. Vista frontal.

5.3.2 DISIPADOR SALTO DE ESQUÍ – VARIANTE 3

Luego de las observaciones realizadas en esta variante de disipación, se introdujeron modificaciones que llevan a un mejor comportamiento del flujo en la estructura de disipación, sin embargo se mantuvo una zona de aproximación al esquí.

Las modificaciones sugeridas para este disipador fueron la de eliminar la curvatura en planta del disipador, ya que en la topografía de la zona se puede notar una gran pared de roca en la margen izquierda del cauce, misma que no se afectaría por el chorro producido por el esquí, además se definió un ángulo de $\Phi=35^\circ$ y una altura del labio de 4.6 m, con el fin de mejorar el funcionamiento del disipador en esquí.

A continuación se muestran los esquemas de las variaciones propuestas:

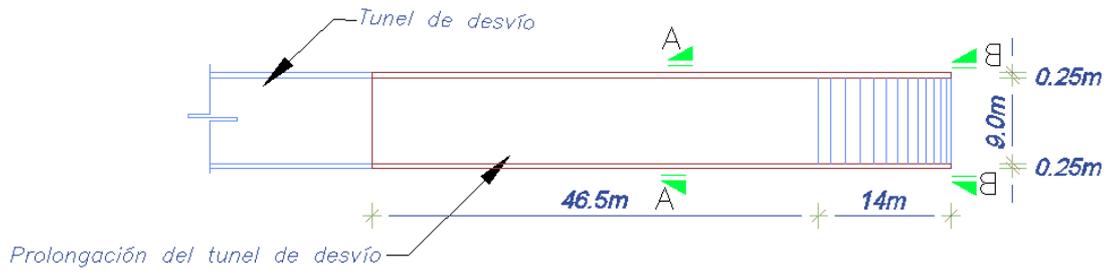


Figura No. 63.- Esquema en planta de las modificaciones propuestas.

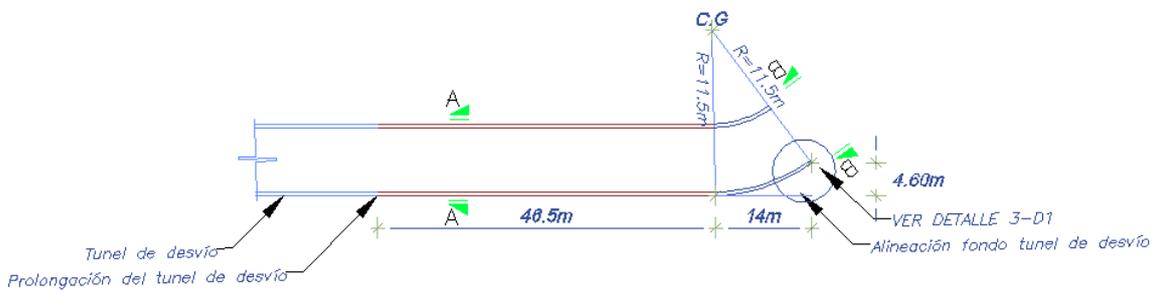


Figura No. 64.- Vista de perfil de las modificaciones propuestas.

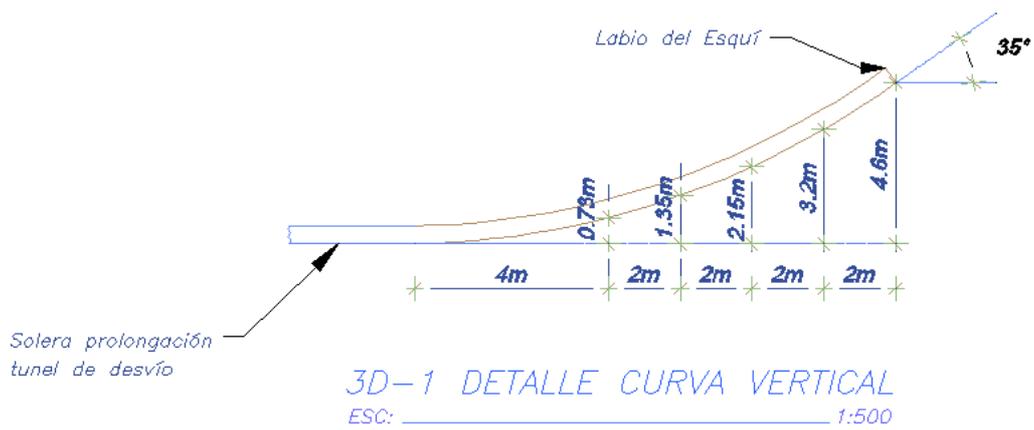


Figura No. 65.- Detalle de la curva vertical.

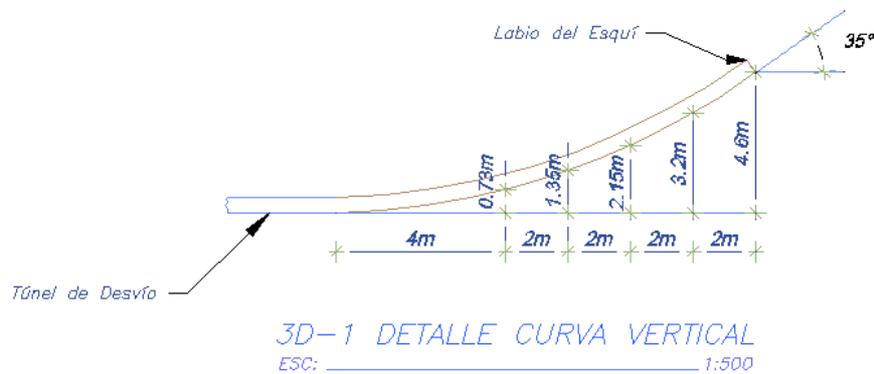


Figura No.- 68.- Detalle de la curva vertical.

5.4 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS MODIFICACIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN

5.4.1 DISIPADOR TIPO IV – VARIANTE 2

Con el objetivo de poder evaluar el comportamiento del disipador para cada caudal, la disipación de energía se midió en la sección A-A impuesta y mostrada anteriormente.

Cuando los datos son medidos en la sección A – A, la disipación de energía aumenta, esto tiene sentido ya que la cubeta está ubicada aguas arriba de la sección A-A, lo cual da como resultado mayor turbulencia en el flujo debido a que el lecho rocoso del cauce natural incrementa la disipación producto de la cubeta.

A continuación se presenta una serie de fotografías donde se puede observar el funcionamiento del disipador para cada uno de los diferentes caudales:



Fotografía No.54.- Vista frontal del funcionamiento de la cubeta modificada. $Q=1130 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.55.- Vista lateral de la zona del escalón negativo de la cubeta modificada. $Q=1130 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.56.- Vista aérea del funcionamiento del disipador. $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.57.- Vista lateral del escalón negativo del disipador. $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.58.- Vista aérea del funcionamiento del disipador. $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.59.- Vista lateral del escalón negativo del disipador. $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.60.- Vista aérea del funcionamiento del dissipador. $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.61.- Vista lateral del escalón negativo del dissipador. $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.62.- Vista aérea del funcionamiento del disipador. $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.



Fotografía No.63.- Vista lateral del escalón negativo del disipador. $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 2.

En la tabla que se muestra a continuación se puede observar los resultados de la disipación de energía para los caudales $Q = 100, 200, 500 \text{ m}^3/\text{s}$, sobre el umbral final, es decir al final de la cubeta de disipación:

Determinación de la Disipación de Energía hasta el final de la Cubeta de Disipación								
Caudal Prototipo (m ³ /s)	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	Pérdida de energía (m)	% Disipación
100	9.11	12.233	2.130	0	0.849	6.350	12.480	66.15
200	9.11	14.425	2.600	0	1.414	7.930	14.284	64.01
500	9.11	18.102	4.300	0	1.838	10.840	19.099	63.43

Tabla No.12.- Disipación de energía a la salida de la cubeta de disipación Tipo IV – Variante 2

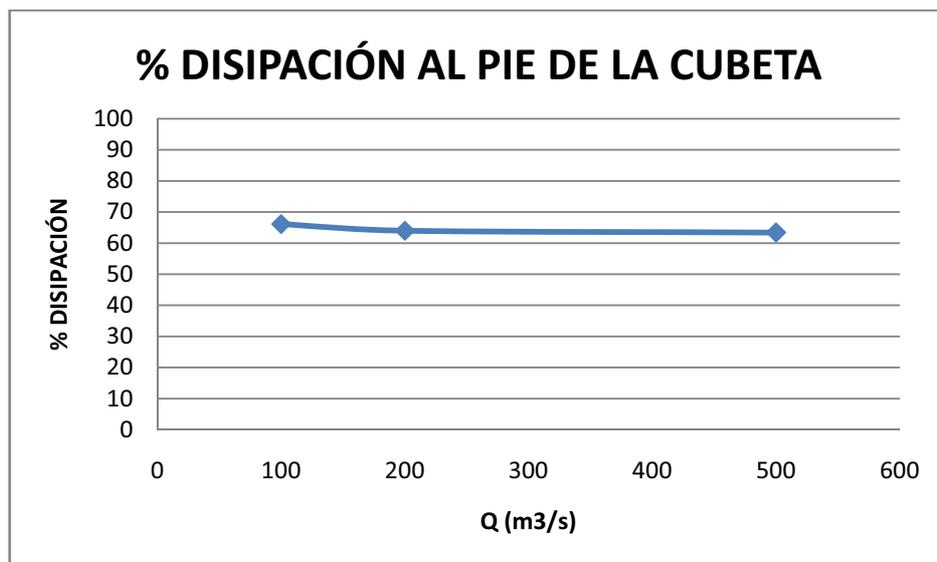


Figura No.- 69.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega del disipador para la variante 2.

En la tabla No. 12 se puede notar que la disipación de energía se mantuvo muy similar, sin embargo la modificación propuesta aumentó el porcentaje de disipación, es decir la viga añadida y el aumento en altura del escalón negativo tuvieron éxito en la modelación.

Sin embargo la tendencia de disipación continúa, es decir que conforme caudal aumenta, la disipación de energía disminuye.

En la tabla que se muestra a continuación, se presenta la disipación de energía que se obtiene cuando es medida en la sección A – A aguas abajo del río:

Determinación de la Disipación de Energía hasta la Sección del Río A - A Aguas Abajo del Disipador								
Caudal Prototipo (m³/s)	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	Pérdida de energía (m)	% Disipación
100	9.48	12.233	2.130	0	1.036	2.350	16.832	87.50
200	9.48	14.425	2.600	0	1.082	3.250	19.376	85.41
500	9.48	18.102	4.300	0	1.867	4.500	25.804	84.65
800	9.48	20.082	5.750	0	3.543	5.350	29.795	83.26
1130	9.48	20.860	7.300	0	5.226	6.150	31.416	80.64

Tabla No.13.- Disipación de Energía medida en la sección A – A, Alternativa 2 - Cuenco Tipo IV

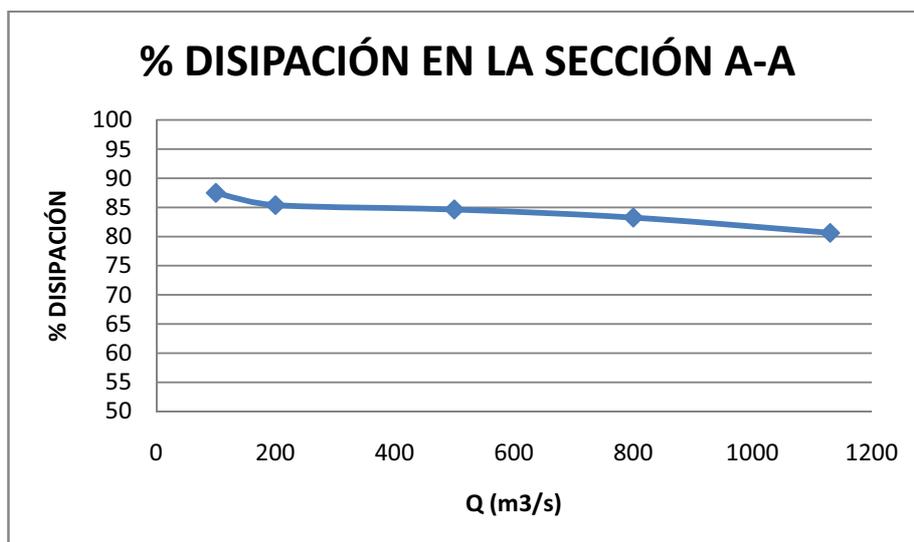


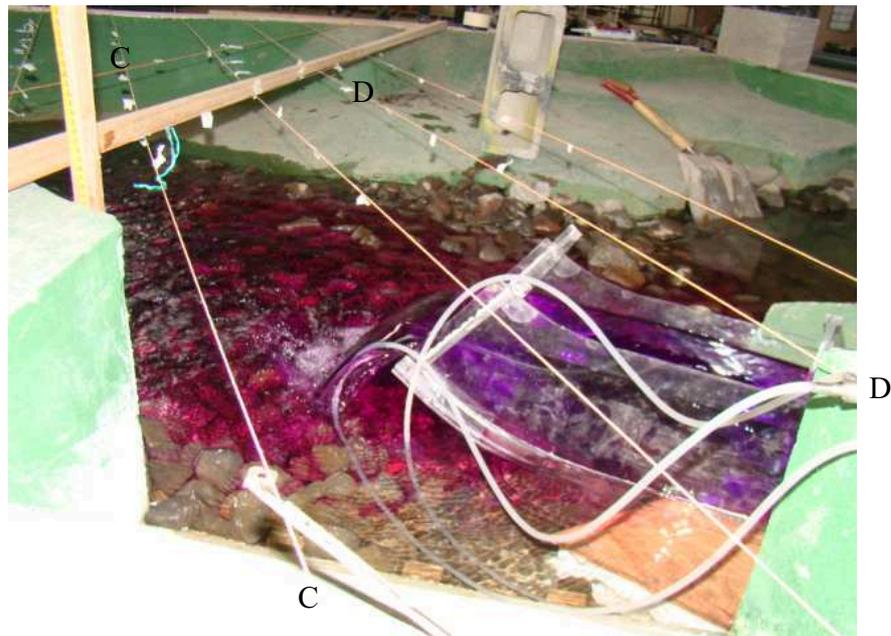
Figura No.- 70.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega del disipador para la alternativa 2.

En la tabla No. 13 se puede observar que la disipación de energía es muy buena, esto se debe a que los puntos donde ésta fue medida están a mayor distancia de la cubeta de disipación, lo cual indica que la razón de tal incremento en la disipación de energía es que el lecho rocoso proporciona una gran turbulencia y chapoteo lo cual es propicio para la disipación.

5.4.2 Salto de Esquí – Variante 3

En las observaciones realizadas de esta alternativa, se identificó que el cuenco de socavación fue menos profundo que en las variantes 1 y 2, además al ser esta la posible opción definitiva de diseño, se procedió con la medición de la disipación de energía en la sección A – A, para los caudales $Q = 500, 800, 1130 \text{ m}^3/\text{s}$, B – B para el caudal $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ y C – C para el caudal $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ por lo cual no podremos obtener un patrón de resultados que permitan comparar los resultados en obtenidos en una misma sección de estudio, sin embargo son suficientes para realizar una comparación de los caudales más influyentes e importantes que son $Q = 500, 800, 1130 \text{ m}^3/\text{s}$.

Además para los caudales $Q = 100, 200 \text{ m}^3/\text{s}$ se determinó la disipación producida por el resalto hidráulico y también la energía que se disipa por la acción del salto de esquí, para finalmente presentar la disipación de toda la estructura en conjunto.



Fotografía No.64.- Vista lateral del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.65.- Vista del remanso producido por la altura del esquí. $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.66.- Vista lateral del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.67.- Vista del resalto hidráulico producido por la altura del esquí. $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.

En la tabla a continuación, se muestran los valores de disipación de energía producida tanto por el resalto hidráulico al interior del túnel, como de la estructura del salto de esquí, en este caso no es posible hacer una comparación entre resultados de disipación ya que fueron medidas en secciones distintas, lo cual hace que la disipación no siga un patrón de medidas.

Disipación de Energía por la Variante 3 - Salto de Esquí									
Q Prototipo (m³/s)	Determinación de la pérdida de energía por el resalto hidráulico								Sección C - C
	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	Δf (m)	% Disipación	
100	0.950	12.16	2.84	0	1.84	7.00	4.15	36.66	Sección C - C
	Determinación de la pérdida de energía por el salto en esquí								
	0.695	1.84	7.00	0	1.48	2.30	5.45	69.34	
	Energía Total Disipada =						9.61	79.93	
200	Determinación de la pérdida de energía por el resalto hidráulico								Sección B - B
	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	Δf (m)	% Disipación	
	0.842	14.35	3.00	0	3.11	8.10	5.75	40.07	
	Determinación de la pérdida de energía por el salto en esquí								
	1.100	3.11	8.10	0	1.52	3.25	6.33	65.26	
Energía Total Disipada =						12.07	78.19		

Tabla No.14.- Disipación de Energía del resalto hidráulico al interior del túnel, producto del control del esquí
– Variante 3

Para los caudales $Q = 500, 800, 1130 \text{ m}^3/\text{s}$, la disipación de energía fue tomada en una misma sección, lo cual permitirá que se identifique un patrón bastante claro de lo que sucede con la disipación de energía.

D



D

Fotografía No.68.- Vista aérea del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.

C

D



C

D

Fotografía No.69.- Vista lateral del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.70.- Vista aérea del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.71.- Vista lateral del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.72.- Vista aérea del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=1130 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.73.- Vista lateral del funcionamiento de la tercera variación del salto en esquí. $Q=1130 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.

En la siguiente tabla se muestra la disipación de energía medida para esta alternativa:

Disipación de Energía por Variante 3 - Salto en Esquí								
Caudal del prototipo m ³ /s	Determinación de la pérdida de energía por el salto en esquí							
	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	Δf (m)	% Disipación
500	5.05	16.688	3.6	0	1.63	4.5	18.21	79.71
	Energía Total Disipada =						18.21	79.71
800	5.05	18.385	5.12	0	3.17	5.35	21.53	78.60
	Energía Total Disipada =						21.53	78.60
1130	5.05	19.233	6.65	0	5.04	6.15	23.11	75.63
	Energía Total Disipada =						23.11	75.63

Sección A - A

Tabla No.15.- Disipación de Energía en Sección A – A, Variante 3 – Salto de Esquí

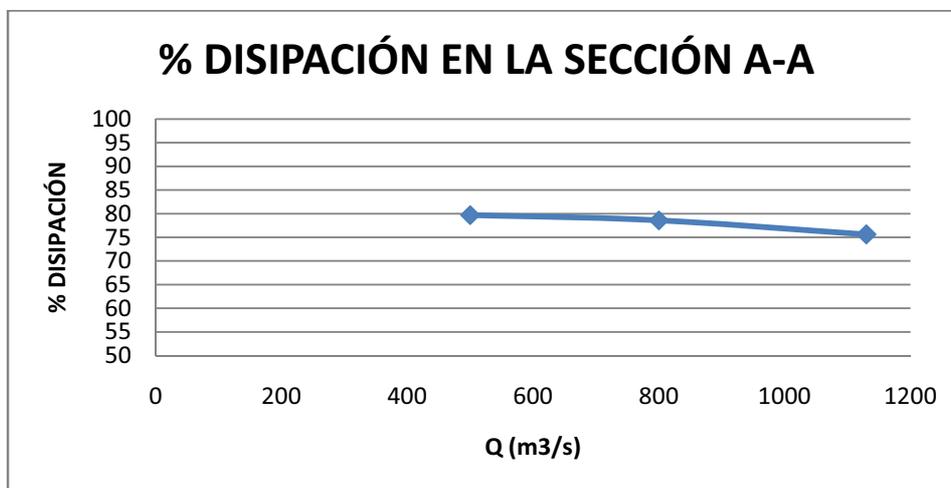


Figura No.- 71.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega del disipador para la variante 3.

En la tabla No. 15 se puede notar que la disipación de energía mantiene el patrón de resultados que se ha dado en las anteriores alternativas, es decir que conforme el caudal de prueba aumenta, la disipación de energía disminuye.

Se observó además que la restitución del flujo al cauce natural mantuvo el arrastre de sedimentos, pero además se observó que dicho arrastre no fue tan crítico como en la variante 2, ya que el fondo del lecho del cauce no se limpió completamente como en el caso anterior.



Fotografía No.74.- Cuenco de socavación producto de la alternativa 3. $Q=1130 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



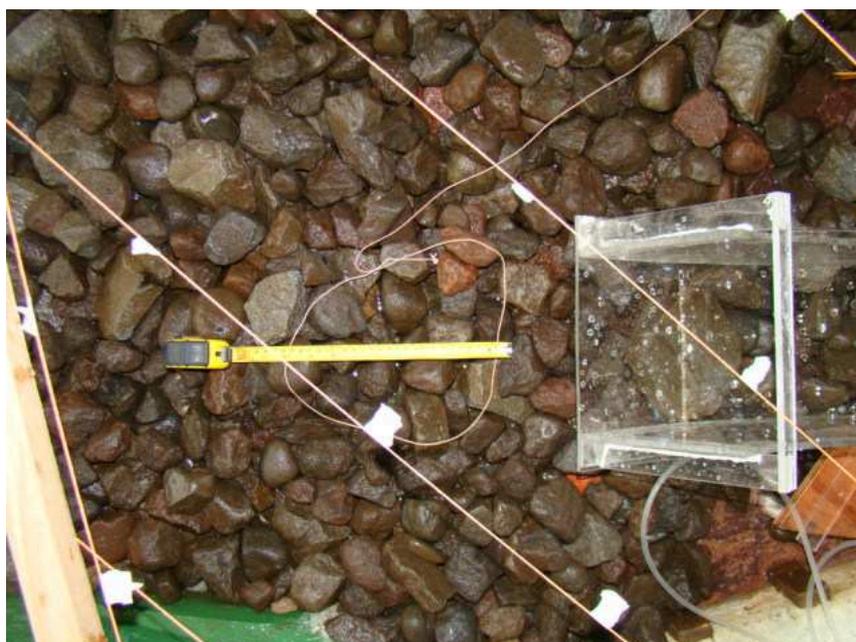
Fotografía No.75.- Cuenco de socavación producto de la alternativa 3. $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.76.- Cuenco de socavación producto de la alternativa 3. $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.77.- Cuenco de socavación producto de la alternativa 3. $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.



Fotografía No.78.- Cuenco de socavación producto de $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 3.

En la siguiente tabla se muestran las profundidades máximas de los cuencos de socavación producidos para cada uno de los caudales estudiados en esta variante:

Variante de Disipador	Caudal prototipo (m ³ /s)	Cuenco de socavación		
		Longitud mayor (m)	ancho mayor (m)	profundidad mayor(m)
Φ = 35° Altura del labio del esquí = 4.6 m	1130	67	37	7
	800	51.5	28	6
	500	32.5	27.5	3.25
	200	19.5	12	1.5
	100	12.5	12	1.5

Tabla No.16.- Características de los cuencos de socavación producidos en la variante 3 – Salto de Esquí

5.4.3 Salto de Esquí – Variante 4

Para la evaluación de esta variante, se definió con antelación el cuenco preexcavado, mismo que fue conformado para un caudal de $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ bajo funcionamiento del modelo hidráulico como se muestra en la fotografía No. 79 y con el cuenco definido colocar una lechada de cemento como muestra la fotografía No. 80, provocando de esta manera un colchón de agua donde se prevé caerá el chorro para el caudal de diseño y gran parte del chorro de los caudales grandes de esta manera no se afectará demasiado el lecho del río, eliminándose en un gran porcentaje el problema erosivo que produce este tipo de disipador.

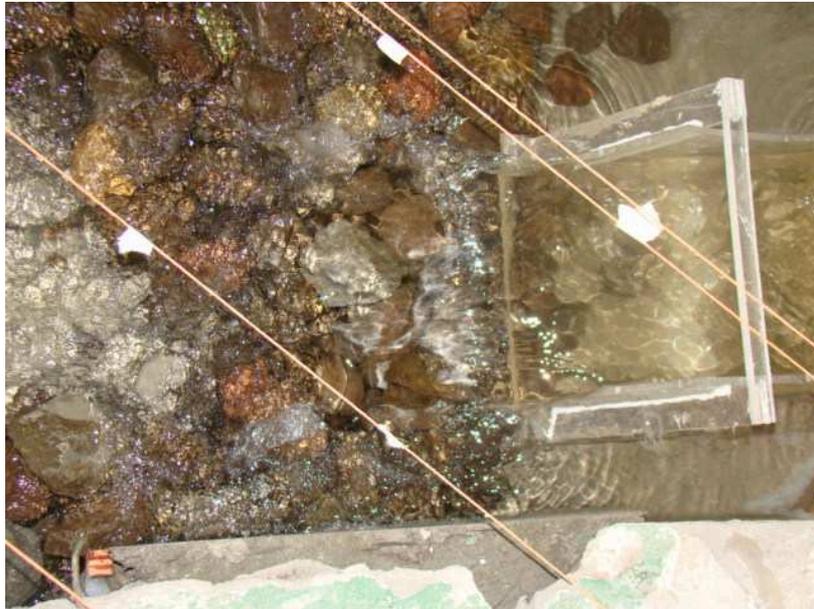


Fotografía No.79.- Cuenco de socavación que definió el cuenco preexcavado producto del funcionamiento del modelo. $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 4



Fotografía No.80.- Cuenco de preexcavado con lechada de cemento. $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 4

El funcionamiento del dissipador y comportamiento de la configuración del cuenco preexcavado para cada uno de los caudales de prueba se muestran a continuación:



Fotografía No.81.- Funcionamiento del dissipador y comportamiento del cuenco preexcavado para $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ - Variante 4



Fotografía No.82.- Funcionamiento del dissipador y comportamiento del cuenco preexcavado para $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$
- Variante 4



Fotografía No.83.- Funcionamiento del dissipador y comportamiento del cuenco preexcavado para $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$
– Variante 4



Fotografía No.84.- Funcionamiento del dissipador y comportamiento del cuenco preexcavado para $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$
– Variante 4



Fotografía No.85.- Funcionamiento del disipador y comportamiento del cuenco preexcavado para $Q=1130$ m^3/s – Variante 4

En la siguiente tabla se muestran los resultados de disipación de energía para la variante 4 del Salto de Esquí:

Disipación de Energía por Variante 4 - Salto en Esquí								
Caudal del prototipo m^3/s	Determinación de la pérdida de energía por el salto en sky							
	z_1 (m)	v_1 (m/s)	y_1 (m)	z_2 (m)	v_2 (m/s)	y_2 (m)	Δf (m)	% Disipación
100	5.5	12.02	2.23	0	0.51	2.30	12.78	84.67
200	5.5	14.21	2.87	0	0.60	3.25	15.40	82.49
500	5.5	17.32	3.705	0	0.98	4.50	19.95	81.44
800	5.5	19.16	5.105	0	1.88	5.35	23.79	81.14
1130	5.5	19.52	7.545	0	2.48	6.15	26.00	80.09

Sección A - A

Tabla No.17.- Disipación de Energía en la sección A – A, Variante 4 – Salto en Esquí

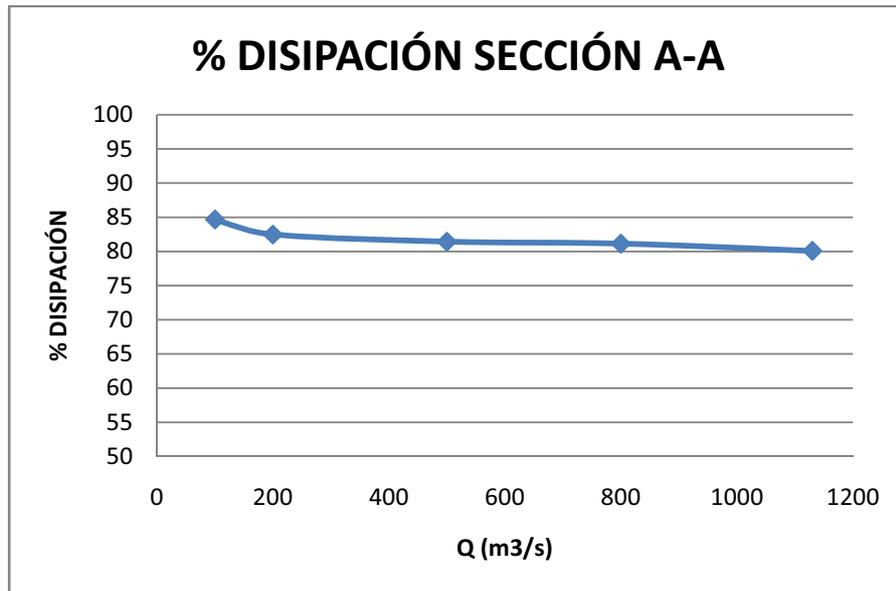


Figura No.- 72.- Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega del disipador para la variante 4.

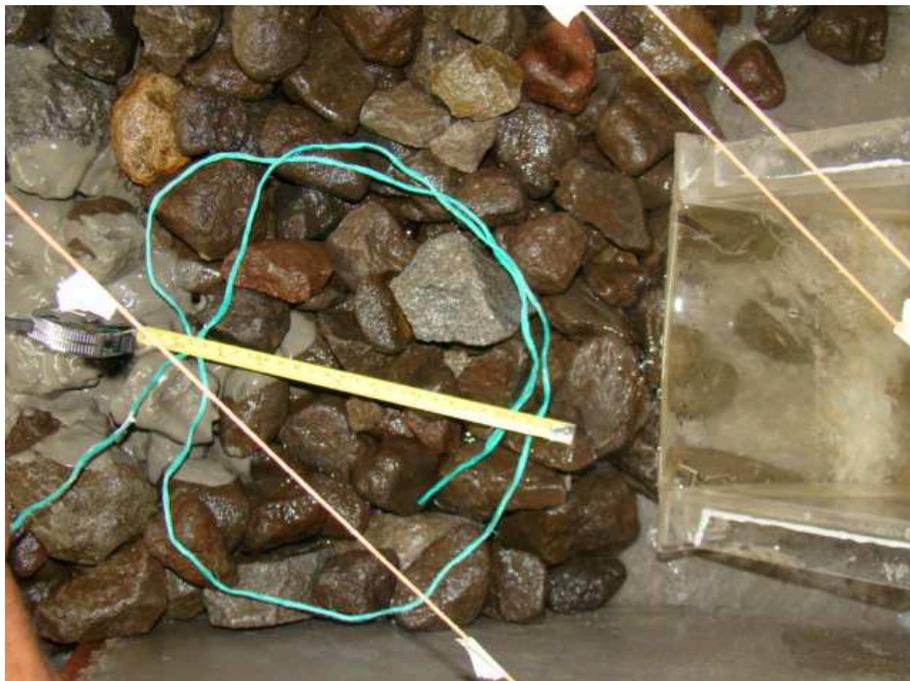
En la tabla No. 17 se muestra la disipación de energía para la variante 4, obteniéndose un buen porcentaje de disipación de energía que será la definitiva para el prototipo. Se puede notar que los resultados obtenidos siguen el patrón de disipación que se obtuvo para las variantes anteriores, conforme el caudal aumenta, la disipación disminuye.

El funcionamiento de la configuración del cuenco preexcavado, presenta una gran eficiencia ya que el arrastre de material fue mínimo, y por consiguiente los cuencos producidos por cada uno de los caudales no tienen el efecto erosivo que se produjo en la evaluación de las variantes anteriores.

A continuación se presentan fotografías de los cuencos producidos con esta configuración:



Fotografía No.86.- Cuenco de socavación producto de $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 4



Fotografía No.87.- Cuenco de socavación producto de $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 4



Fotografía No.88.- Cuenco de socavación producto de $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 4



Fotografía No.89.- Cuenco de socavación producto de $Q=1130 \text{ m}^3/\text{s}$ – Variante 4

En la siguiente tabla se muestran las características de los cuencos de socavación producidos por el chorro en la alternativa 4 del Salto en Esquí:

Variante de Disipador	Caudal prototipo (m ³ /s)	Cuenco de socavación		
		Longitud mayor (m)	ancho mayor (m)	profundidad mayor(m)
$\Phi = 35^\circ$ Altura del labio del esquí = 4.6 m	1130	49.64	29.655	3.715
	800	39.545	19.225	3.715
	500	39.545	19.225	3.715
	200	10	6	3
	100	7.5	2.5	1.5

Tabla No.18.- Características del cuenco de socavación, Variante 4 – Salto en Esquí.

En la tabla No. 18 se nota las características de cada uno de los cuencos de socavación que se conformaron con los diferentes caudales de prueba.

Se puede notar que los cuencos tienen la misma configuración para los caudales $Q = 500, 800 \text{ m}^3/\text{s}$, los resultados se presentan de esta manera debido a que los dos chorros tienen similares características lo cual permite que el chorro del caudal $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ caiga precisamente sobre el colchón de agua formado por el cuenco producto del caudal $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que muestra que el cuenco preexcavado es eficiente.

5.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS Y SUS MODIFICACIONES

A continuación se presenta una comparación de resultados obtenidos de disipación de energía, en los puntos donde sea factible la comparación de los mismos.

5.5.1 Disipador Tipo IV

Comparación de Disipación de Energía al final de la cubeta del disipador		
Caudal Prototipo (m ³ /s)	% de Disipación de Energía	
	Variante 1	Variante 2
100	60.58	52.63
200	63.31	54.96
500	76.97	62.56

Tabla No.19.- Comparación de Disipación de Energía al final de la cubeta de disipación.

A simple vista se puede pensar que las modificaciones realizadas en este disipador no fueron efectuadas con buen criterio ya que la disipación determinada en la variante 2 es menor a la variante 1, sin embargo la razón de estos resultados es que al profundizar la cubeta de disipación por medio de un escalón negativo de mayor longitud, produjo conjuntamente con el nivel del agua en el río, que el resalto hidráulico que se produjo trabaje con mayor sumergencia en la segunda variante con lo que la eficiencia del disipador aumenta.

La disipación de energía también fue medida en la sección nombrada como A – A, donde se aprecia que la disipación disminuye conforme el caudal aumenta como se muestra a continuación en la tabla No. 20:

Comparación de Disipación de Energía en la sección A - A del río		
Caudal Prototipo (m ³ /s)	% de Disipación de Energía	
	Variante 1	Variante 2
100	85.90	87.50
200	83.90	85.41
500	83.66	84.66
800	67.18	83.26
1130	61.75	80.64

Tabla No.20.- Comparación de Disipación de Energía en la sección A – A.

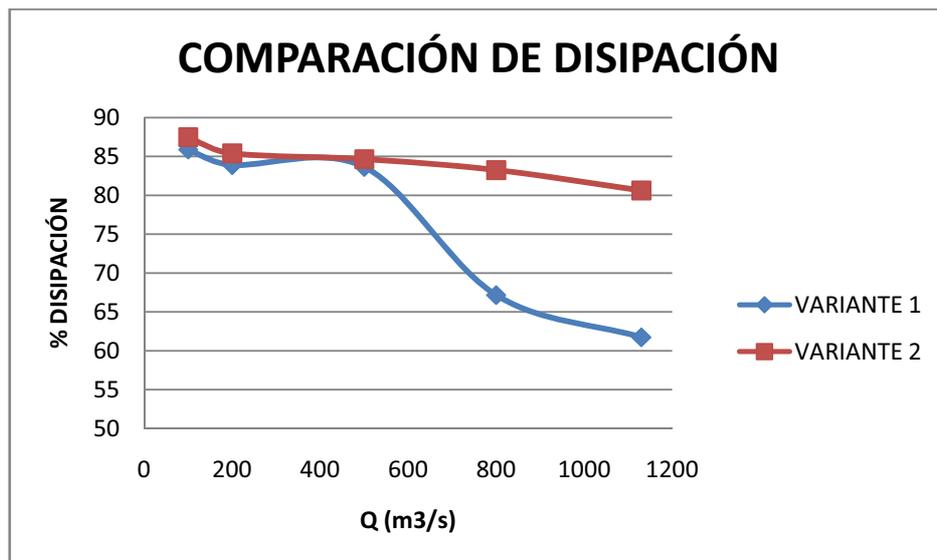


Figura No.73.- Curva de tendencia de la eficiencia del proceso de disipación de energía en función del caudal.

Comparación de Disipación de Energía en la sección A – A.

En la tabla No. 20 se puede notar que la disipación de energía es muy similar en los caudales menores, aunque para los dos caudales grandes se puede apreciar una gran diferencia, esto debido a la distancia entre el final del resalto hidráulico y

la sección A – A de medida, además se la gran diferencia debido al impacto del fluido en la pared de roca que incluye la topografía de la zona.

Respecto a cuencos de socavación, no se podría hacer comparación alguna ya que en el cauce natural del lecho del río no se produjo movimiento, ni remoción del material de fondo.

5.5.2 Salto de Esquí

En primer lugar, debido a que, para las dos primeras variantes no se hizo mediciones de disipación no habrá puntos de comparación, pero en su lugar se hace una comparación de los cuencos socavados.

Para la tercera y cuarta variantes se elaborará un cuadro donde se compare la disipación de energía generada, para posteriormente presentar una comparación de la configuración de los cuencos de socavación.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los cuencos de socavación producida por el chorro en el lecho del río, entre todas las variantes que fueron ensayadas:

Variantes de Disipador	Caudal prototipo (m ³ /s)	Cuenco de socavación		
		Longitud mayor (m)	Ancho mayor (m)	Profundidad mayor(m)
$\Phi = 35^\circ$ Altura del labio del esquí = 6.6 m Variante 1	1130	53.50	37.00	4.50
	1000	51.50	35.00	4.30
$\Phi = 27^\circ$ Altura del labio del esquí = 4.09 m Variante 2	1130	63.50	40.50	8.50
	800	40.50	38.00	5.80
	500	36.50	29.50	5.90
	330	27.00	19.50	1.75
	200	12.00	9.00	1.75
	100	13.00	7.50	1.50
$\Phi = 35^\circ$ Altura del labio del esquí = 4.6 m Variante 3	1130	67.00	37.00	7.00
	800	51.50	28.00	6.00
	500	32.50	27.50	3.25
	200	19.50	12.00	1.50
	100	12.50	12.00	1.50
$\Phi = 35^\circ$ Altura del labio del esquí = 4.6 m, y Lechada de cemento Variante 4	1130	49.64	29.66	3.72
	800	39.55	19.23	3.72
	500	39.55	19.23	3.72
	200	10.00	6.00	3.00
	100	7.50	2.50	1.50

Tabla No.21.- Comparación de cuencos de socavación producidos por los Saltos de Esquí evaluados.

En la tabla No. 21 se puede notar la influencia que tiene el ángulo de salida del labio del esquí y a su vez de la altura del labio, ya que los resultados obtenidos muestran que en el caso del ángulo $\Phi = 27^\circ$ se produce la condición más crítica de todos los ensayos.

A su vez las condiciones menos desfavorables las presenta la variante 4, esto debido a que la presencia del cuenco preexcavado evitó la erosión excesiva que

existió en los casos anteriores, incluso manteniéndose similar socavación para los caudales $Q = 500, 800 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo ésta la opción a adoptarse para el diseño definitivo del Disipador Salto de Esquí.

Para poder comparar la disipación de energía producida por este disipador, se hizo necesario hacer dicha comparación en una misma sección, por lo cuál para que el estudio sea correcto se podrá comparar tan solo los resultados de los caudales $Q = 500, 800, 1130 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que los caudales menores fueron medidos en secciones diferentes y los resultados son mostrados en la siguiente tabla:

Comparación de Disipación de Energía en la sección A - A del río		
Caudal Prototipo (m^3/s)	% de Disipación de Energía	
	Variante 3	Variante 4
500	79.71	81.44
800	78.59	81.14
1130	75.62	80.09

Tabla No.22.- Comparación de Disipación de energía producida por el Salto de Esquí en Variantes 3 y 4.

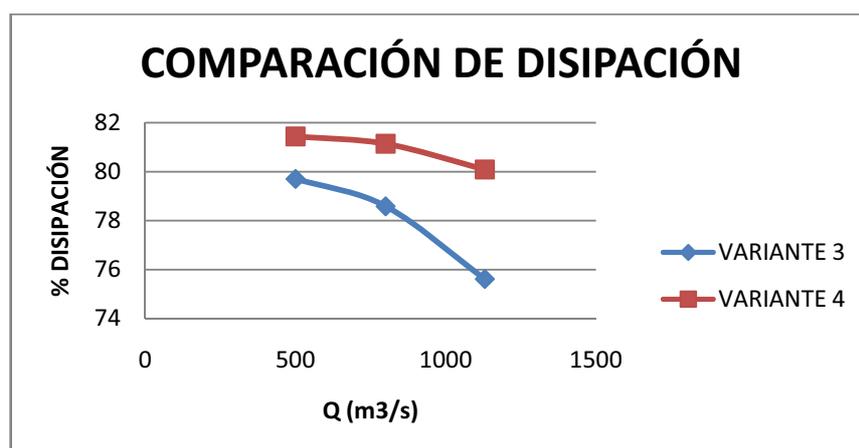


Figura No.74.- Curva de tendencia de la eficiencia del proceso de disipación de energía en función del caudal. Comparación de Disipación de Energía producida por el Salto de Esquí. Variantes 3-4.

En la tabla No. 22 se puede notar que la mejora producida por las modificaciones propuestas no fue tan significativa, sin embargo se lograron mejorar los resultados de porcentaje de disipación y a su vez la forma de restitución del flujo al cauce natural.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

- Posterior a la evaluación experimental del diseño original propuesto en el convenio entre el CGM – EPN, se concluye que la eficiencia en la disipación no fue adecuada, razón por la cual fue preciso continuar con el estudio de la disipación de energía con las dos alternativas propuestas y sus respectivas variantes.
- Las pruebas realizadas con caudales $Q = 100, 200 \text{ m}^3/\text{s}$ para el disipador en esquí y el cuenco tipo IV demuestran que la disipación necesaria para que mantengan una restitución estable al cauce del río es mínima ya que la distribución del flujo es casi uniforme por lo que no se presentan daños erosivos en la zona de restitución al cauce natural, no así con las pruebas realizadas con caudales $Q = 500, 800, 1130 \text{ m}^3/\text{s}$, que muestran una distribución de flujo con una tendencia hacia la margen izquierda especialmente en el disipador Salto de Esquí, lo cuál produce que la socavación en la zona de restitución siempre tienda a ser mas severa en la margen izquierda del lecho del cauce.

6.2 CONCLUSIONES CUENCO TIPO IV

- Con la implementación del Cuenco Disipador tipo IV, se hizo necesario añadir una transición en proporción 2:1 con el fin de obtener un menor calado, permitiendo de esta manera que la transición se ajuste a condiciones ideales de funcionamiento del

cuenco, la cual una vez implantada en el modelo no sólo logra un correcto desempeño, sino que permite disminuir el problema de ondas cruzadas.

- En la evaluación de la segunda variante del cuenco disipador tipo IV efectuada con la disminución de la curvatura en planta del túnel de desvío se observa una influencia positiva en el funcionamiento del disipador y una mejor distribución transversal del flujo, debido a que se logró disminuir la concentración del flujo hacia la margen izquierda de la estructura de disipación.
- Luego de la evaluación experimental de las dos variantes de disipador tipo IV se concluye que la longitud de la cubeta de disipación es adecuada para el desarrollo del resalto hidráulico.
- La evaluación del cuenco disipador tipo IV no produjo remoción del material suelto del lecho del río, lo que permite concluir que el umbral colocado al final de la cubeta de disipación cumple con su función y adicionalmente evita que el material del río ingrese a la cubeta de disipación.
- Con las pruebas realizadas en el modelo con el disipador cuenco tipo IV se observó, que el factor relevante para que el resalto hidráulico sea óptimo es el nivel de agua que tiene en el cauce natural, lo cual controla principalmente la ubicación del resalto hidráulico y por consiguiente la eficiencia del disipador, puesto que a niveles de agua más altos que la cota del disipador en la rampa, el resalto se desarrolla en condición de sumergencia, por consiguiente se disipa más energía.

- La eficiencia de este dissipador tipo IV en su segunda variante es relativamente alta para la serie de caudales ensayados. Si bien se menciona en la literatura técnica que este tipo de estructura es recomendable para el rango $2,5 < Fr < 4,5$; en el presente caso, con valores de Fr entre 2 y 3.5 su eficiencia es adecuada y las velocidades de flujo a la salida del dissipador son admisibles para garantizar la estabilidad del enrocado de protección así como del cauce natural del río Paute, razones por la cual el Dissipador Tipo IV en su segunda variante es el recomendado como dissipador de energía en esta investigación experimental.

6.3 CONCLUSIONES SALTO EN ESQUÍ

- Gracias al colchón de agua que se forma en el río debido al estrechamiento natural, el chorro de agua producido por el Salto de Esquí, no impacta directamente sobre el lecho del cauce natural, lo cual evita que la profundidad de socavación en el lecho sea excesivo, favoreciendo la condición de restitución del flujo al cauce natural.
- La complejidad de cimentación en las proximidades del cauce real, precisó la modificación del modelo en el Salto de Esquí en su variante 4, de tal forma que las condiciones que se presentan en los caudales menores no represente un problema.
- En el salto en esquí en la variante 4 se produce un remanso aguas arriba dentro del túnel, sin embargo su funcionamiento no fue afectado para los caudales mas altos, razón por la cual se

define esta variante como propuesta definitiva para solucionar el problema de disipación de energía.

- Para la variante de salto en esquí, de acuerdo al estudio hidrológico del proyecto se estima que la probabilidad de ocurrencia del caudal de crecida $Q = 1130 \text{ m}^3/\text{s}$ retorne una vez cada diez años, razón para definir como variante de solución, la socavación producto del caudal $Q=500\text{m}^3/\text{s}$, ésta configuró el cuenco preexcavado, con lo cual se observó el funcionamiento óptimo del disipador y la alteración nula del cuenco para caudales de hasta $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.4 RECOMENDACIONES

- Con el fin de evitar la formación de Cuencos de socavación que provoquen inestabilidad en la estructura del salto en esquí, es recomendable que se conforme un cuenco preexcavado, mismo que se conformará con el caudal de diseño $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ y deberá iniciarse a no mas de 2.5 m de la abscisa correspondiente a la del labio del esquí, de modo que la serie de caudales $Q = 100, 200, 500, 800 \text{ m}^3/\text{s}$ no produzcan ningún tipo de socavación en el lecho del cauce natural, el cuenco que se deberá conformar será de 40m de largo, 20m de ancho y 4m de profundidad en el centro con taludes en proporción 2:1 hasta llegar a la parte superior del mismo.
- Se sugiere que la máxima altura de enrocado sea similar a la altura del umbral final es decir no mayor a 7m, con el fin de evitar que ingrese el material del lecho del río a la cubeta.

- Es recomendable mantener la cubeta de disipación a una profundidad suficiente para que el resalto hidráulico formado por el caudal $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ sea óptimo y de esta manera disipar un porcentaje de energía mayor.
- Se hace necesaria la implementación de muros de ala con un 30% de incremento en su altura, de modo que el agua no salpique demasiado en la zona de formación del resalto hidráulico.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Naudascher, E., Castro, M.: *“Hidráulica de Canales”*, Limusa-Noriega Editores, Méjico, 2000
- [2] United States Department of the Interior, USBR.: *“Design of Small Canal Structures”*, A Water Resources Technical Publication, Denver, Co., 1974
- [3] Heller, V; Hager, W; Hans-Erwin: *“Ski Jump Hydraulics”*
- [4] Bureau of Reclamation: *“Design of small canal structures”*, United States, 1978
- [5] Bureau of Reclamation: *“Research Study on Stilling Basins, Energy Dissipators, and Associated Appurtenances”*, United States, 1955
- [6] Bureau of Reclamation: *“Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators – Engineering Monograph N° 25”*, United States, 1984
- [7] Vischer, D.L.; Hager, W.H.: *“Energy Dissipators”*, Swis Federal Institute of Technology, ETH, Zurich, Switzerland, 1995
- [8] Carrera, J; Lara, V. *“Estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío y el túnel de descarga intermedia de la central hidroeléctrica sopladora”*, Tesis-EPN, Quito – Ecuador, 2010.
- [9] Hidalgo, Marcelo. *Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas*. Ecuador. E.P.N. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- [10] Rouse, H.: *“Engineering Hydraulics”*, McGraw Hill Ed., 1950
- [11] Rouse, H.: *“Selected Writings”*, McGraw Hill Ed., 1975
- [12] Rouse, H.: *“Mecánica de los Fluidos para Ingenieros Hidráulicos”*, McGraw Hill Co., New York 1960.
- [13] Rouse, H.: *“Hidráulica”*, McGraw Hill Co. Ed., New York 1950.
- [14] Chow, V.T.: *“Hidráulica de los Canales Abiertos”*, McGraw Hill Ed. Co., New York – Bogotá, 1959.
- [15] Ranga Raju, K.G.: *“Flow Through Open Channels”*, Tata McGraw Hill Ed. New Delhi, 1990.
- [16] Henderson, F.M.: *“Open Channel Flow”* MacMillan Co. Ed., New York 1970.
- [17] Subramanya, S.: *“Flow in Open Channels”*, Tata McGraw Hill Ed., New Delhi, 1985.
- [18] Chanson, H.: *“Hidráulica del Flujo en Canales Abiertos”*, McGraw Hill Interamericana de Colombia Ed., 2002
- [19] Domínguez, F.: *“Hidráulica”*, Santiago de Chile, 1950.
- [20] ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings and Monographs. Información obtenible desde el Internet.
- [21] Saldarriaga, J.: *“Hidráulica de Acueductos”*, Ed. McGraw Hill, New York – Bogotá, 2003.
- [22] Textos de Hidrología Básica e Hidrología Aplicada
- [23] Tesis de Grado y Proyectos de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional

- [24]** Memorias de los Congresos Mundiales y de los Congresos Latinoamericanos de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas – IAHR –
- [25]** Páginas Web sobre el desarrollo y evaluación del flujo no uniforme no permanente en cursos naturales o en ríos.

ANEXOS
PLANOS MODELO Y PROTOTIPO