

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA
DISIPACIÓN DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO
DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA.**

**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGISTER
EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

BOLÍVAR FERNANDO ORTEGA NOVILLO

bfortegan@gmail.com

DIRECTOR: ING. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE

Ximena.hidalgob@gmail.com

Quito, Mayo 2012

DECLARACIÓN

Yo, Bolívar Fernando Ortega Novillo, declaro que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para 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.

ING.BOLÍVAR FERNANDO ORTEGANOVILLO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el siguiente trabajo fue desarrollado por el Ing. Bolívar Fernando Ortega Novillo bajo mi supervisión.

**ING. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE
DIRECTORA DEL PROYECTO**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida y por todas las bondades que he recibido a lo largo de toda mi existencia.

A mi esposa por todo el cariño y motivación que me ha transmitido, lo cual ha sido un pilar fundamental para lograr concluir este trabajo de tesis.

A mis padres y a mis suegros por su apoyo incondicional, con el que hicieron posible la realización de este proyecto académico, que conjuntamente con mi esposa emprendimos a fin de alcanzar un mayor nivel de conocimiento en nuestras respectivas profesiones.

A mi hija, que inconscientemente ha sido una gran motivación para cumplir este objetivo propuesto, así como en todos mis proyectos y actividades cotidianas.

A la Ingeniera Ximena Hidalgo, al Doctor Marco Castro, al Ingeniero Ciro Menéndez, que en calidad de catedráticos han compartido su valioso conocimiento y por su predisposición a colaborar en todo lo requerido.

DEDICATORIA

Con mucho cariño a mi esposa, a mi hija Romina y a mi segunda hija que esta próxima a nacer.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI-XVI
RESUMEN.....	XVII
PRESENTACIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO 1: LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	1
1.1. RESALTO HIDRÁULICO.....	1
1.1.1 RESALTO EN CANALES HORIZONTALES RECTANGULARES.....	2
1.1.2 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO.....	2
1.1.3 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO.....	4
1.1.3.1 PÉRDIDA DE ENERGÍA.....	4
1.1.3.2 EFICIENCIA.....	4
1.1.3.3 LONGITUD DEL RESALTO.....	4
1.1.3.4 PERFIL SUPERFICIAL DEL RESALTO.....	5
1.1.3.5 LOCALIZACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO.....	6
1.2. TIPOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA.....	6
1.2.1 DISIPADORES DE ENERGÍA POR EXPANSIONES Y DESVIACIONES.....	7
1.2.2 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CONTRA FLUJO.....	8
1.2.3 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CANALES RUGOSOS Y CASCADAS.....	10
1.2.4 DISIPADORES DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LA FORMACIÓN DE VÓRTICES.....	11
1.2.5 DISIPADORES DE ENERGÍA POR ENTRADA DE AIRE.....	14
1.2.6 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CHORROS DIFUSORES.....	15
1.2.6.1 EL SALTO EN ESQUÍ.....	17
1.2.6.1.1 DIFUSIÓN DEL CHORRO.....	19
1.2.6.1.2 ALCANCE MÁXIMO.....	20
1.2.6.1.3 CUENCO DE SOCAVACIÓN.....	22

1.2.7	DISIPADORES DE ENERGÍA CON BLOQUES DE IMPACTO O CON UMBRALES.....	27
1.2.8	DISIPADORES DE ENERGÍA POR ESCALONES.....	29
1.2.8.1	ESCALÓN NEGATIVO.....	29
1.2.8.2	ESCALÓN POSITIVO.....	31
1.3.	DISIPADORES DE ENERGÍA CONVENCIONALES.....	33
1.3.1	DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	33
	CAPÍTULO 2: MODELACIÓN FÍSICA.....	37
2.1	ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	38
2.1.1	MÉTODOS DEL TEOREMA II.....	38
2.1.1.1	MATRIZ DIMENSIONAL.....	39
2.1.1.2	ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS PRODUCTOS ADIMENSIONALES DE UN CONJUNTO COMPLETO.....	39
2.1.2	APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA EL ESTUDIO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA.....	41
2.1.2.1	APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA EL ESTUDIO DE SOCAVACIÓN EN EL SALTO EN ESQUÍ.....	41
2.1.2.2	APLICACIÓN DE ANÁLISIS DIMENSIONAL EN EL ESTUDIO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	44
2.1.3	IMPORTANCIA FÍSICA DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES.....	47
2.1.3.1	NÚMERO DE FROUDE.....	47
2.1.3.2	NÚMERO DE REYNOLDS.....	47
2.2	LEYES DE SIMILITUD.....	48
2.2.1	SIMILITUD GEOMÉTRICA.....	48
2.2.2	SIMILITUD CINEMÁTICA.....	49
2.2.3	SIMILITUD DINÁMICA.....	49
2.2.4	SIMILITUD ABSOLUTA.....	50
2.2.5	SIMILITUD RESTRINGIDA Y EFECTOS DE ESCALA.....	50

2.3 TIPOS DE MODELOS DE ACUERDO A LA LEY DE SIMILITUD.....	51
2.3.1 MODELOS EULERIANOS.....	51
2.3.2 MODELOS DE REYNOLDS.....	52
2.3.3 MODELOS DE FROUDE.....	53
2.3.4 MODELOS DE FROUDE Y REYNOLDS.....	54
2.4 LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	57
2.4.1 LIMITACIÓN POR EFECTOS DE LA VISCOSIDAD.....	57
2.4.2 LIMITACIÓN POR EFECTOS DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL.....	58
CAPÍTULO 3: MODELACIÓN FÍSICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA.....	59
3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL TÚNEL DE DESVÍO.....	63
3.2 APLICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS TEÓRICOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA, EN EL TÚNEL DE DESVÍO.....	68
3.2.1 PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	68
3.2.2 ANÁLISIS DE LA ESCALA DEL MODELO.....	72
3.3 CONDICIONES DE FLUJO EN EL TÚNEL DE DESVÍO.....	74
CAPÍTULO 4: MODELACIÓN FÍSICA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA.....	76
4.1 CRITERIOS DEL DISEÑO PROPUESTO PARA LA MODELACIÓN FÍSICA DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO DEL PROYECTO SOPLADORA	76
4.1.1 CRITERIOS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	76
4.1.1.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO AL PIE DEL ESCALÓN.....	81
4.1.1.2 DETERMINACIÓN DEL CUENCO DISIPADOR A EMPLEARSE Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	82
4.1.1.2.1 DISEÑO DEL UMBRAL FINAL.....	83
4.1.1.3 UBICACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO.....	83
4.1.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO SALTO EN ESQUÍ.....	84
4.2 ALTERNATIVAS PLANTEADAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO.....	86

4.2.1	DISPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	86
4.2.2	DISIPADOR DEL TIPO SALTO EN ESQUÍ.....	86
CAPÍTULO 5: MODELACIÓN FÍSICA Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....		87
5.1	PLAN DE PRUEBAS CON LOS DISEÑOS PROPUESTOS.....	87
5.1.1	PLAN DE PRUEBAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON EL SALTO EN ESQUÍ	87
5.1.2	PLAN DE PRUEBAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON EL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	88
5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DISEÑOS PROPUESTOS.....	89
5.2.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA SE1, PROPUESTA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL SALTO EN ESQUÍ.....	89
5.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA 1, PROPUESTA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	91
5.3	MODIFICACIONES PLANTEADAS.....	97
5.3.1	MODIFICACIONES PLANTEADAS EN EL DISIPADOR DE SALTO EN ESQUÍ.....	99
5.3.2	MODIFICACIONES PLANTEADAS EN EL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	100
5.4	PLAN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS MODIFICACIONES PROPUESTAS.....	101
5.4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS SE2, SE3 Y SE4, PROPUESTAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL SALTO EN ESQUÍ.....	101
5.4.1.1	ALTERNATIVA SE2.....	101
5.4.1.2	ALTERNATIVA SE3.....	104
5.4.1.3	ALTERNATIVA SE4.....	109
5.4.1.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTAL Y TEÓRICO DE LOS CUENCOS DE SOCAVACIÓN.....	114

5.4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA IV.2, PROPUESTA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL DISIPADOR TIPO IV.....	115
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	125
6.1 CONCLUSIONES.....	118
6.1.1 SALTO EN ESQUÍ.....	127
6.1.1.1 DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON EL DISIPADOR TIPO SALTO EN ESQUÍ.....	128
6.1.1.2 CUENCO DE SOCAVACIÓN EN EL DISIPADOR TIPO SALTO EN SQUÍ.....	129
6.1.2 DISIPADOR TIPO IV DE BUREAU OF RECLAMATION.....	131
6.2 RECOMENDACIONES.....	133
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134
ANEXOS	
A.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA ALTURA DE FLUJO CON PRESENCIA DE ONDAS POR EFECTO DE CAMBIOS GRADUALES DE DIRECCIÓN.....	136
A.2 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL ESCALÓN DEL CUENCO TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	139
A.3 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA UBICACIÓN TENTATIVA DEL RESALTO HIDRÁULICO EN EL DISIPADOR TIPO IV.....	142
A.4 CUADROS DE RESULTADOS DE ANÁLISIS EXPERIMENTAL TEÓRICO DE LOS CUENCOS DE SOCAVACIÓN.....	148
A.5 PLANOS DE DISEÑO.....	152
A.5.1 PLANOS DE LAS ALTERNATIVAS DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	152-160
A.5.2 PLANOS DE LAS ALTERNATIVAS DEL DISIPADOR TIPO SALTO EN ESQUÍ.....	161-169
A.5.2.1 PLANOS DE CUENCOS DE SOCAVACIÓN.....	170-204

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1.1 GRÁFICO ADIMENSIONAL PARA DETERMINAR LA LONGITUD DEL RESALTO.....	5
FIGURA 1.2 CURVAS ADIMENSIONALES PARA DETERMINAR EL PERFIL DEL RESALTO HIDRÁULICO.....	6
FIGURA 1.3 DISIPADORES DE ENERGÍA CON RESALTO FORZADO.....	8
FIGURA 1.4 DISIPADOR DE ENERGÍA POR COLISIÓN DE DOS CHORROS IGUALES.....	9
FIGURA 1.5 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CONTRAFLUJO.....	10
FIGURA 1.6 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CANALES RUGOSOS Y CASCADAS.....	1
1	
FIGURA 1.7 DISIPADORES DE ENERGÍA A TRAVÉS DE VÓRTICES.....	13
FIGURA 1.8 FOTOGRAFÍA DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA DEL TIPO VÓRTICES EN POZOS.....	14
FIGURA 1.9 DISIPADORES DE ENERGÍA CON AIREADORES.....	15
FIGURA 1.10 DISIPADORES DE ENERGÍA POR MEDIO DE CHORROS DIFUSORES.....	17
FIGURA 1.11 TRAYECTORIA DEL CHORRO CON RESISTENCIA DEL AIRE..	21
FIGURA 1.12 VALORES DEL PARÁMETRO ψ EN FUNCIÓN DEL CAUDAL UNITARIO Y DEL ANCHO DEL DEFLECTOR.....	22
FIGURA 1.13 CUENCO DE SOCAVACIÓN Y FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE DISTURBIO.....	24
FIGURA 1.14 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL CHORRO Y EL CUENCO EN EL SALTO EN ESQUÍ.....	26
FIGURA 1.15 ÁNGULO DE ENTRADA DEL CHORRO EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE SALIDA DEL CHORRO EN EL SALTO EN ESQUÍ.....	26
FIGURA 1.16 DISIPADOR CON BLOQUES DE IMPACTO Y SUS RESPECTIVAS FUERZAS ACTUANTES.....	28
FIGURA 1.17 CURVA PARA DETERMINAR LA LONGITUD DEL RESALTO	

HIDRÁULICO EN UN CUENCO CON BLOQUES DE IMPACTO (TIPO III EN LA CLASIFICACIÓN DEL BUREAU OF RECLAMATION).....	29
FIGURA 1.18 DISIPADOR DE ENERGÍA POR ESCALÓN NEGATIVO.....	30
FIGURA 1.19 GRÁFICO DE (Y_2/Y_1) , EN FUNCIÓN DE $(\Delta Z_0/Y_1)$ Y FR_1	31
FIGURA 1.20 CUENCO DISIPADOR CON ESCALÓN POSITIVO.....	32
FIGURA 1.21 PROFUNDIDADES CONJUGADAS EN UN DISIPADOR DE ENERGÍA CON ESCALÓN POSITIVO Y ANCHO DE CANAL CONSTANTE.....	32
FIGURA 1.22 GEOMETRÍA DEL DISIPADOR TIPO IV Y DIMENSIONAMIENTO RECOMENDADO.....	34
FIGURA 1.23 CURVA PARA DETERMINAR LA LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO EN UN CUENCO TIPO IV DE LA CLASIFICACIÓN DEL BUREAU OF RECLAMATION.....	35
FIGURA 1.24 CURVA PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL UMBRAL DE FONDO.....	36
FIGURA 3.1 ESQUEMA DEL PROYECTO SOPLADORA.....	59
FIGURA 3.2 ESQUEMA DE UBICACIÓN DE TÚNELES DE DESVÍO Y DESCARGA INTERMEDIA.....	61
FIGURA 3.3 ESTADO ORIGINAL Y DEFINITIVO DE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA.....	65
FIGURA 3.4 FLUJO EN LA ESTRUCTURA DE UNIÓN DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DESCARGA INTERMEDIA.....	66
FIGURA 3.5 ESQUEMA DE DISIPADOR TIPO KUMIN (VISTA FRONTAL).....	67
FIGURA 3.6 MODELO DE DISIPADOR TIPO KUMIN.....	67
FIGURA 3.7 DIAGRAMA DE MOODY.....	70
FIGURA 3.8 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN λ CON LA PENDIENTE.....	71
FIGURA 3.9 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN λ CON EL CAUDAL.....	71
FIGURA 4.1 CURVA DE TRANSICIÓN PARA ENSANCHAMIENTOS ÓPTIMOS DE UN CANAL.....	78
FIGURA 4.2 ALTURA DEL UMBRAL EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE	

FROUDE.....	83
-------------	----

FIGURA A.2.1 CURVA DE DESCARGA EN EL TRAMO DEL RÍO PAUTE, AL FINAL DEL TÚNEL DE DESVÍO.....	144
---	-----

LISTADO DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 VARIABLES GEOMÉTRICAS EN EL DISIPADOR EN ESQUÍ.....	42
GRÁFICO 2.2 VARIABLES GEOMÉTRICAS QUE INTERVIENEN EN LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN EL DISIPADOR TIPO IV.....	44
GRÁFICO 2.3 VARIABLES GEOMÉTRICAS QUE INTERVIENEN EN LA DISIPACIÓN ENERGÉTICA DEL DISIPADOR SALTO EN ESQUÍ.....	45
GRÁFICO 3.1 ESQUEMA TÚNEL DE DESVÍO CONFORME A DISEÑO PRELIMINAR A LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.....	63
GRÁFICO 4.1 TRANSICIÓN EN TÚNEL DE DESVÍO REFERIDO AL PROTOTIPO.....	80
GRÁFICO 5.1 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE1 Q= 1000m ³ /s:.....	90
GRÁFICO 5.2 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE1 Q= 1130m ³ /s:.....	90
GRÁFICO 5.3 IMPLANTACIÓN DE LA ALTERNATIVA IV.1 EN MODELO Y UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN.....	91
GRÁFICO 5.4 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, Q= 100m ³ /s.....	93
GRÁFICO 5.5 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, Q= 200m ³ /s.....	94
GRÁFICO 5.6 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, Q= 500m ³ /s.....	95
GRÁFICO 5.7 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, Q= 800m ³ /s.....	96
GRÁFICO 5.8 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, Q= 1130m ³ /s.....	96
GRÁFICO 5.9 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2,	

Q=100 m ³ /s.....	103
GRÁFICO 5.10 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2, Q=200 m ³ /s.....	103
GRÁFICO 5.11 ESQUEMA DE FLUJO DE MODELO, ALTERNATIVA SE2 Q=500 m ³ /s.....	103
GRÁFICO 5.12 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2, Q= 800 m ³ /s.....	104
GRÁFICO 5.13 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2, Q= 1130m ³ /s.....	104
GRÁFICO 5.14 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 100m ³ /s.....	106
GRÁFICO 5.15 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 200m ³ /s.....	106
GRÁFICO 5.16 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 500m ³ /s.....	106
GRÁFICO 5.17 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 800m ³ /s.....	107
GRÁFICO 5.18 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 1130m ³ /s.....	107
GRÁFICO 5.19 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, Q= 100m ³ /s.....	111
GRÁFICO 5.20 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, Q= 200m ³ /s.....	111
GRÁFICO 5.21 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, Q= 500m ³ /s.....	111
GRÁFICO 5.22 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, Q= 800m ³ /s.....	112
GRÁFICO 5.23 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, Q= 1130m ³ /s.....	112
GRÁFICO 5.24 SOCAVACIÓN TEÓRICA ADIMENSIONAL PARA VARIOS CAUDALES ($\Phi=35$).....	114
GRÁFICO 5.25 SOCAVACIÓN TEÓRICA ADIMENSIONAL PARA VARIOS	

CAUDALES ($\Phi=27$).....	115
GRÁFICO 5.26 IMPLANTACIÓN DE LA ALTERNATIVA IV.2 EN MODELO Y UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN.....	116
GRÁFICO 5.27 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, Q= 100m ³ /s	118
GRÁFICO 5.28 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, Q= 200m ³ /s	119
GRÁFICO 5.29 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, Q= 500m ³ /s	120
GRÁFICO 5.30 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, Q= 800m ³ /s	121
GRÁFICO 5.31 ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, Q= 1130m ³ /s	121
GRÁFICO A.1.1 ESQUEMA DE INCÓGNITAS PARA CÁLCULO DE ESCALÓN.....	140

LISTADO DE CUADROS

CUADRO 1.1 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO SEGÚN EL NÚMERO DE FROUDE.....	3
CUADRO 2.1 RELACIONES ADIMENSIONALES EN MODELOS DE REYNOLDS.....	52-53
CUADRO 2.2 RELACIONES ADIMENSIONALES EN MODELOS DE FROUDE.....	54
CUADRO 3.1 RESUMEN DE AFOROS TOMADOS EN LA ABSCISA 23.43 DEL MODELO, EXTRAPOLADOS AL PROTOTIPO.....	72
CUADRO 4.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA FIGURA 4.1 PARA EL CASO DE ESTUDIO.....	79
CUADRO 5.1 DATOS, ALTERNATIVA SE1 SALTO EN SKY EN MODELO.....	89
CUADRO 5.2 DATOS EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1.....	92
CUADRO 5.3 DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA IV.1, REFERIDA AL MODELO.....	97

CUADRO 5.4 RESULTADO DE MEDICIONES EN ALTERNATIVA SE2 (SALTO EN SKY).....	102
CUADRO 5.5 RESULTADOS DE MEDICIONES EN ALTERNATIVA SE3 (SALTO EN SKY).....	105
CUADRO 5.6 DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA SE3, REFERIDA AL MODELO....	108
CUADRO 5.7 RESULTADOS DE MEDICIONES EN ALTERNATIVA SE4 (SALTO EN SKY).....	110
CUADRO 5.8 DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA SE4, REFERIDA AL MODELO....	113
CUADRO 5.9 RESULTADO DE MEDICIONES EN MODELO ALTERNATIVA IV.....	117
CUADRO 5.10 DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA IV.2, REFERIDA AL MODELO...	123
CUADRO 6.1 VALORES MEDIDOS EN EL MODELO Y EXTRAPOLADOS AL PROTOTIPO.....	125
CUADRO A.1.1 ITERACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE FLUJO A LO LARGO DE LA TRANSICIÓN, HACIENDO USO DE LAS ECUACIONES 4.1, 4.2 Y 4.3.....	137
CUADRO A.4.1 DISEÑO TEÓRICO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN EN PROTOTIPO.....	149-150
CUADRO A.4.2 SOCAVACIÓN TEÓRICA RELATIVA, EN BASE DISTINTAS ECUACIONES.....	150
CUADRO A.4.3 SOCAVACIÓN EXPERIMENTAL RELATIVA.....	151

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se estudia en modelo físico, dos estructuras para la disipación de energía del flujo a la salida del túnel de Desvío del proyecto Hidroeléctrico Sopladora, cuyas estructuras han sido escogidas en base a un profundo análisis de las posibles opciones y de las condiciones físicas y de flujo presentes. En base a este análisis se determina conveniente el estudio de las siguientes alternativas:

- Disipador tipo Salto en Esquí.
- Disipador Tipo IV, de acuerdo a la clasificación de Bureau of Reclamation.

Con las dos propuestas, se realiza algunas variantes con la finalidad de investigar su comportamiento y sus efectos, para de esta manera optimizar al máximo dichas estructuras disipadoras de energía.

El modelo físico ha sido representado a una escala 1:50, con respecto al prototipo y se ha plasmado en un material tipo plexiglás, material que se ajusta a los requerimientos del modelo para simular adecuadamente las condiciones de flujo en prototipo.

Para cuantificar los resultados de las propuestas investigadas, se realizan mediciones de energía del flujo en el modelo, aguas arriba y aguas abajo de la estructura disipadora, con lo que finalmente, luego de analizar con algunas variantes, es posible alcanzar exitosos efectos de disipación de energía en las dos alternativas investigadas.

PRESENTACIÓN

En el diseño preliminar del proyecto hidroeléctrico Sopladora, se ha planteado un disipador de energía tipo Kumin para el flujo a la salida del túnel de desvío, disipador que ha sido analizado en modelo físico, dando como resultado una disipación de energía ineficiente. Adicionalmente se presenta también, un flujo de aproximación a la estructura de disipación de energía con presencia de ondas cruzadas, producto de las curvaturas en planta existentes en el desarrollo del trazado del túnel, lo que produce la formación de un flujo asimétrico, dificultando de esta manera la disipación de energía.

El túnel de desvío en el proyecto Sopladora es una obra que permanecerá durante la vida útil del proyecto, más allá de la etapa de construcción. Por lo tanto la importancia de esta estructura, su costo, complejidad y la necesidad de garantizar una buena operación del disipador de energía, justifican la investigación experimental que permita identificar la solución más adecuada.

Debido a que las condiciones del flujo de aproximación presentan características especiales, que no han sido consideradas en la literatura técnica disponible sobre el tema de eficiencia de disipadores de energía, resulta indispensable su análisis y optimización mediante el uso de la modelación física, es decir, la visualización del comportamiento de la estructura en tres dimensiones que permite observar, el comportamiento lo más aproximado al fenómeno real, el mismo que no es posible incluirlo dentro del análisis teórico.

Para la elaboración de este trabajo, primeramente se ha realizado un análisis completo de las alternativas de disipación existentes, con la finalidad de definir dos alternativas que mejor se ajusten a las condiciones del proyecto, para posteriormente estudiarlas de forma experimental en modelo físico. Este análisis se presenta en el capítulo uno.

En el capítulo dos, se estudian los fundamentos teóricos de la modelación física, para en base a estos fundamentos aplicar en esta investigación y definir las condiciones y características del modelo físico a ser estudiado.

En el capítulo tres, se analiza las características del túnel de desvío como línea base para el estudio del dissipador de energía, para lo cual se resumen las principales características y los resultados de la modelación física preliminar aplicada a dicha estructura.

En el capítulo cuatro, se estudian los criterios para el diseño de las alternativas propuestas como dissipadores de energía a la salida del túnel de desvío del proyecto hidroeléctrico Sopladora.

En el capítulo cinco, se analiza los resultados de la investigación en las diferentes alternativas.

En el capítulo seis, se plantean las conclusiones y recomendaciones.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

a) OBJETIVO GENERAL:

El objetivo general de la investigación propuesta es, identificar la estructura más adecuada para optimizar la disipación de energía a la salida del túnel de desvío del proyecto hidroeléctrico Sopladora.

b) OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Analizar el comportamiento hidráulico de dos alternativas de disipación de energía, para garantizar la estabilidad de la zona de entrega del flujo desde el túnel de desvío hacia el cauce natural del río Paute.
- Comparar la eficiencia en la disipación de energía alcanzada por cada una de las alternativas propuestas.
- Obtener y analizar las diferencias y semejanzas, entre el comportamiento hidráulico esperado en el diseño teórico con los observados en el modelo físico, para cada una de las alternativas planteadas.

CAPÍTULO 1

LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA

El objetivo de la disipación de energía es, prevenir la erosión aguas abajo de los vertederos de rebose, rápidas, compuertas deslizantes y todo tipo de estructura hidráulica que genere elevada energía en el flujo. Al producirse la disipación de energía, se reduce rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido, hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho aguas abajo.

La esencia de la disipación de energía se fundamenta, en el calor generado al detenerse un flujo bruscamente por diferentes causas. El aumento de temperatura en el agua es mínimo, del orden de 0.24°C en una caída de 100m, por lo que se considera como destrucción de la energía hidráulica más que como una conversión.

El mecanismo de disipación es similar a la pérdida de energía que tiene un flujo a lo largo de su trayectoria, como fruto de las fuerzas de fricción y de corte pero con un alto porcentaje de disipación en cortas distancias, lo cual se produce debido a la turbulencia generada, ya sea por partículas de flujo dentro de una gran corriente de flujo o también por gotas de agua en una corriente de aire. En el primer caso la disipación, se relaciona con los remolinos formados en zonas de alta velocidad, por efecto de fuerzas cortantes y en el segundo, resulta como efecto de la resistencia del aire ejercida a las partículas de agua.

El resalto hidráulico es el caso más común de disipación de energía, generada por partículas de flujo dentro de otra corriente de flujo, razón e importancia de su estudio en el presente capítulo.

1.1 RESALTO HIDRÁULICO

El resalto hidráulico es adecuado para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico. El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía, a

menudo se confina total o parcialmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación o cuenco de aquietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación.

Debido al costo que implica recubrir un fondo extenso en un cuenco disipador, es práctica común colocar accesorios para conseguir que el resalto se produzca dentro de este cuenco.

1.1.1 RESALTO EN CANALES HORIZONTALES RECTANGULARES

Para flujo supercrítico en un canal horizontal rectangular, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un aumento en el calado en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se dará en un canal cuando se satisface la siguiente ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right) \text{Ec. (1.1)}$$

Donde:

Y_2 = calado conjugado al final del resalto hidráulico

Y_1 = calado conjugado a inicio del resalto hidráulico

F_1 = número de Froude al inicio del resalto hidráulico

1.1.2 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO

De acuerdo a los estudios realizados por U.S. Bureau of Reclamation, el resalto hidráulico puede clasificarse de acuerdo con el número de Froude al inicio del resalto (F_1) en los siguientes tipos:

CUADRO 1.1

TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO SEGÚN EL NÚMERO DE FROUDE

Rangos del # Froude al inicio del R.H.	Tipo de resalto según el # Froude	Características del resalto	Esquema de acuerdo al tipo de resalto
$F_1=1$	No se forma resalto		
$1 < F_1 < 1.7$	Resalto ondulante	La superficie del agua muestra ondulaciones	
$1.7 \leq F_1 \leq 2.5$	Resalto débil	Se forman pequeños rollos a lo largo del salto, la superficie aguas abajo del salto es lisa. La pérdida de energía es baja.	
$2.5 \leq F_1 \leq 4.5$	Resalto oscilante	Se produce un chorro oscilante entrando al salto del fondo a la superficie una y otra vez sin periodicidad. Formándose una onda de periodo irregular que comúnmente puede viajar por varios kilómetros causando daños aguas abajo.	
$4.5 \leq F_1 \leq 9$	Resalto estable	La extremidad aguas abajo del rollo de la superficie y el punto en el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurre prácticamente en la misma sección vertical. El rendimiento en la disipación de energía varía entre el 45% y el 70%.	
$F_1 \geq 9$	Resalto fuerte	El chorro de alta velocidad agarra golpes intermitentes de agua rodando hacia abajo, generando ondas aguas abajo, y puede prevalecer una superficie áspera. La efectividad del salto puede llegar al 85%.	

Fuente: Energy Dissipators, V. Y H., (1995). Hidráulica de Canales, Ven Te Chow, (1994)

Elaboración: Fernando Ortega

1.1.3 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO

1.1.3.1 Pérdida De Energía

En el resalto hidráulico la pérdida de energía es igual a las diferencias de energías específicas antes y después del resalto:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

La relación $\frac{\Delta E}{E_1}$, se conoce como la pérdida relativa.

1.1.3.2 Eficiencia

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

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Por lo tanto la eficiencia de un resalto depende únicamente del número de Froude y del flujo de aproximación. La pérdida relativa es igual a $1 - \frac{E_2}{E_1}$

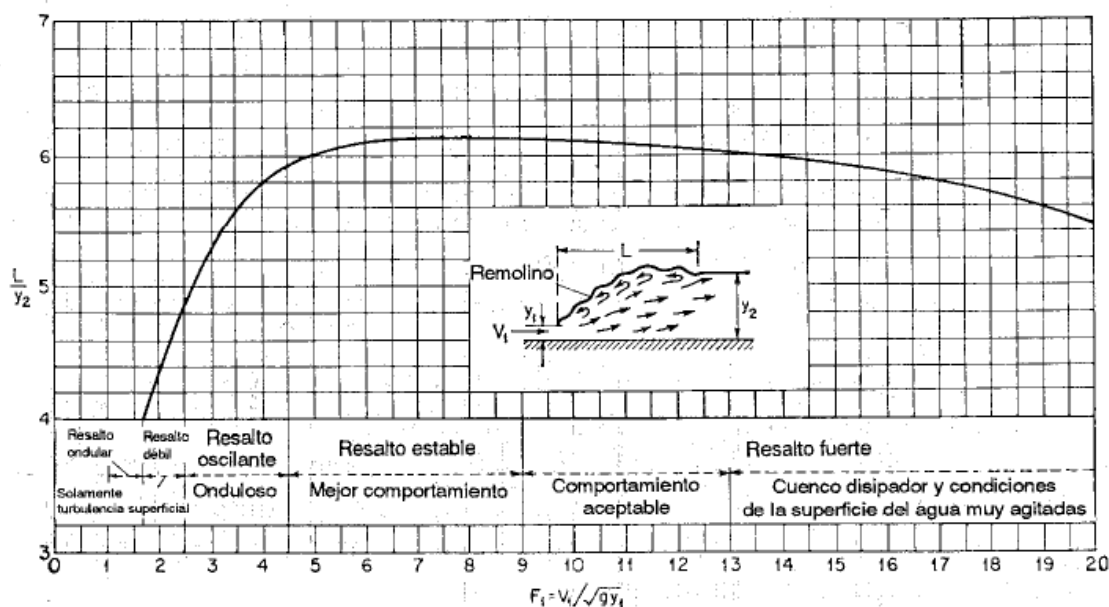
1.1.3.3 Longitud Del Resalto

Se define como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino. Hasta la actualidad esta longitud no puede ser determinada matemáticamente pero ha sido estudiada experimentalmente por muchos investigadores.

La figura 1.1, presenta los resultados de una investigación realizada por el U.S Bureau of Reclamation, estudio realizado en seis canales rectangulares. En ausencia de un estudio para canales trapezoidales, puede usarse los resultados de los estudios en canales rectangulares para determinar la longitud de un resalto hidráulico con una aproximación bastante buena.

FIGURA 1.1

GRÁFICO ADIMENSIONAL PARA DETERMINAR LA LONGITUD DEL RESALTO



Fuente: Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, 1994

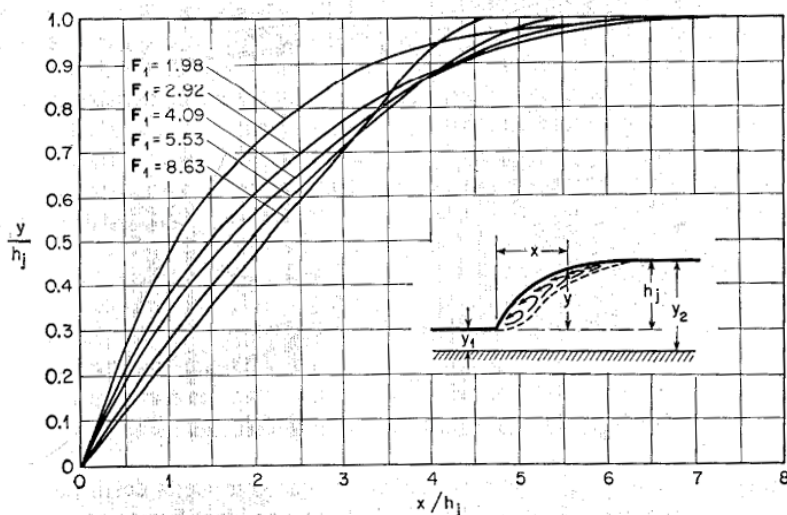
1.1.3.4 Perfil Superficial Del Resalto

El conocimiento del perfil superficial de un resalto es necesario en el diseño del borde libre para los muros laterales donde ocurre el resalto, además es importante para determinar la presión que debe utilizarse en el diseño estructural del colchón amortiguador, debido a que experimentos han demostrado que la presión vertical en el piso horizontal bajo la acción de un resalto hidráulico, es prácticamente la misma que indicaría el perfil de la superficie del agua.

En base a los datos experimentales de Backhmeteff y Matzke, en la figura 1.2, se presenta una serie de curvas adimensionales para distintos valores de F_1 , con las que se puede determinar el perfil superficial de un resalto hidráulico.

FIGURA 1.2

CURVAS ADIMENSIONALES PARA DETERMINAR EL PERFIL DEL R.H



Fuente: Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, 1994

1.1.3.5 Localización Del Resalto Hidráulico

El resalto hidráulico puede ser localizado, determinando y comparando las energías específicas en el flujo supercrítico y en el flujo subcrítico y de esta forma, conocer si el resalto es sumergido o rechazado. Una vez conocido el tipo de resalto y el calado uniforme aguas abajo, valiéndonos de la curva de energía específica Vs altura de agua, se determina el tipo de curva de remanso y con esto el inicio del resalto hidráulico.

1.2 TIPOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA

De acuerdo a las características de los disipadores de energía, se los puede clasificar de la siguiente manera:

- Disipadores de energía con expansiones bruscas.
- Disipadores de energía con desviaciones bruscas.
- Disipadores de energía con contraflujo.

- Disipadores de energía con fondo rugoso
- Disipadores de energía con mecanismo de vórtices
- Disipadores de energía por entrada de aire
- Disipadores de energía induciendo flujo en espray
- Disipadores de energía con bloques de impacto o con umbrales
- Disipadores de energía por escalones

1.2.1 DISIPADORES DE ENERGÍA POR EXPANSIONES Y DESVIACIONES

Una expansión repentina en una tubería induce a la conocida pérdida de Borda-Carnot, este tipo de pérdida usualmente describe el comportamiento de una pérdida de impacto, en la que una corriente rápida impacta con otra de menor velocidad, produciéndose separación del flujo y una zona de altas velocidades. Por lo tanto, muchos disipadores de energía son basados en expansiones bruscas, debido a que la velocidad aguas abajo en este tipo de estructura es mucho menor que la del flujo de entrada.

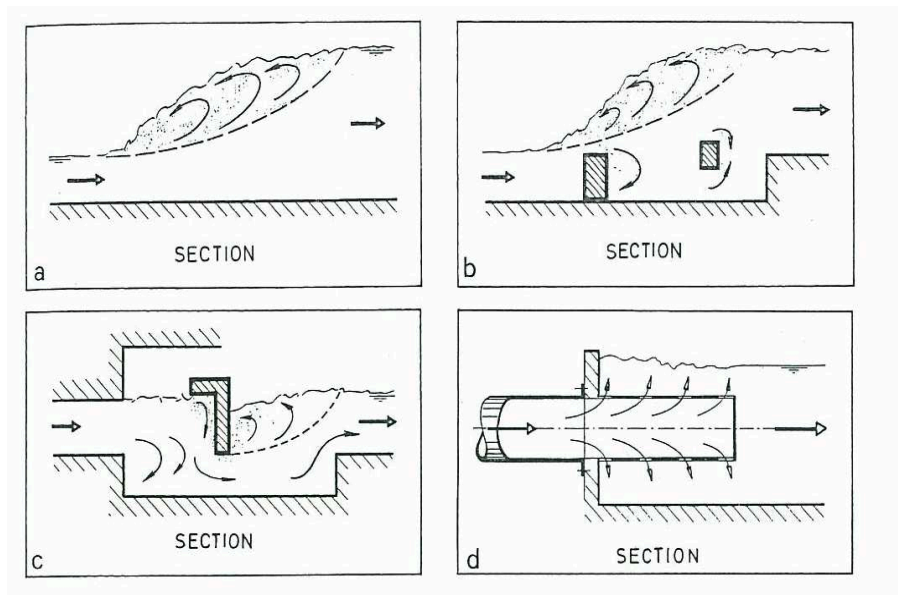
El clásico resalto hidráulico como el de la figura 1.3a. es el más conocido fenómeno relacionado a la disipación de energía. Este puede ser comparado con una expansión brusca en una tubería y en cierto modo trabajan de la misma forma. El clásico resalto hidráulico se produce por el cambio del tipo de flujo de supercrítico a subcrítico, pero si las condiciones en un canal no permiten el cambio natural del tipo de flujo, este puede ser forzado por la presencia de diferentes tipos de accesorios, como es el caso de los llamados disipadores de energía forzados en un cuenco disipador, los accesorios utilizados para forzar el resalto pueden ser rampas, gradas, umbrales, deflectores, vigas, etc. En la figura 1.3b. se muestra un tipo de obstrucción de través de vigas.

En la figura 1.3c. se puede observar un tipo de disipador con una viga colgada como obstrucción y con una expansión brusca en planta.

El disipador mostrado en la figura 1.3d con una tubería perforada descargando sumergido en un tanque, es otra alternativa de forzar el clásico resalto hidráulico.

FIGURA 1.3

DISIPADORES DE ENERGÍA CON RESALTO FORZADO



Fuente: Energy Dissipators, Vischer y Hager, 1995

1.2.2 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CONTRAFLUJO

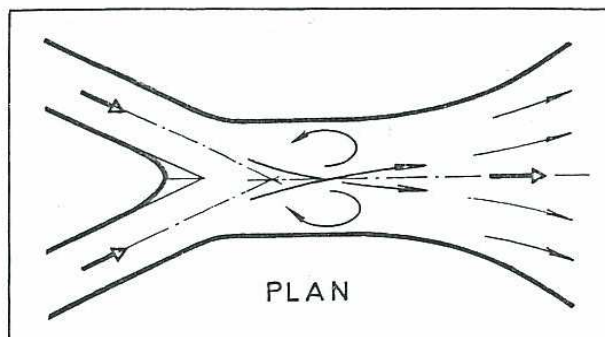
El principio de contraflujo se refiere, a que la energía de un chorro puede ser disipada dividiendo en dos o más partes el chorro de entrada y luego direccionando estos chorros para que se produzca un choque entre ellos.

Una importante característica del contraflujo es la diferencia entre chorros, en la que el uno puede tener más fuerza que el otro y también el ángulo de choque, las mismas que influyen en la cantidad de disipación.

En el cuenco disipador mostrado en la figura 1.4, en donde los dos chorros tienen similar tamaño y velocidad de impacto, formando un pequeño ángulo entre ellos, se produce una baja disipación, ya que solamente pequeñas velocidades son generadas. Este mecanismo podría ser ventajoso formando un espray que puede ser beneficioso en otro contexto.

FIGURA 1.4

**DISIPADOR DE ENERGÍA POR COLISIÓN DE DOS
CHORROS IGUALES**



Fuente: Energy Dissipators, Vischer y Hager, 1995

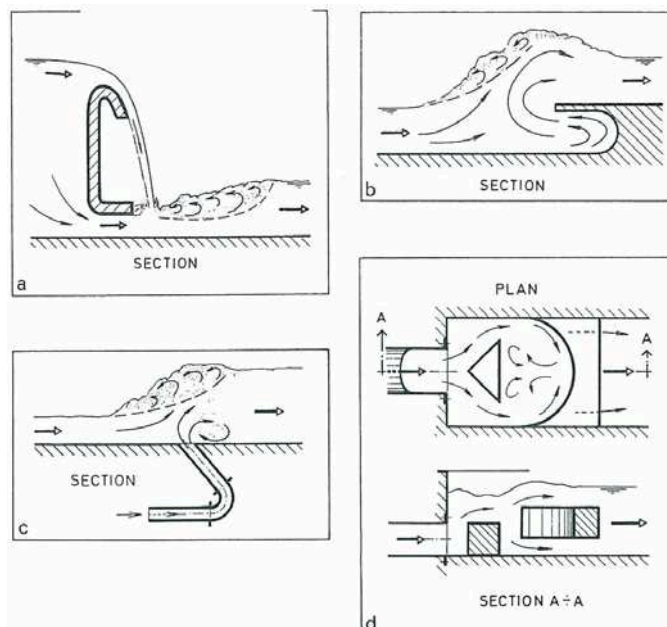
La interacción de dos corrientes como las mostradas en la figura 1.5a es más efectiva. Este caso es típico de una compuerta de doble salida, en donde la lámina de agua superior perturba a la inferior, produciéndose un fenómeno similar al desatado por la obstrucción de una viga colgada, forzando el resalto hidráulico aguas abajo.

Una estructura para un caudal con bajo contenido de sedimentos es mostrada en la figura 1.5b, similar a un cuenco disipador con un umbral de fondo y se comporta igual a un disipador de energía con obstrucción, en la que en este caso el contraflujo producido por el umbral en arco provoca la formación de un resalto hidráulico.

El disipador mostrado en la figura 1.5c es un chorro productor de resalto hidráulico, el cual su principal objetivo no es generar pérdidas por impacto sino generar la formación del resalto hidráulico.

FIGURA 1.5

DISIPADORES DE ENERGÍA POR CONTRAFLUJO



Fuente: Energy dissipators, Vischer y Hager, 1995

1.2.3 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CANALES RUGOSOS Y CASCADAS

Un canal con gran rugosidad puede disipar una gran parte de energía de su flujo en una distancia relativamente corta. La rugosidad puede obtenerse de diferentes formas. Entre las más comunes tenemos pequeños dientes deflectores para canales o vertederos de cresta gruesa, estos deflectores se distribuyen como se muestra en la figura 1.6a. Para el caso de canales o vertederos con pendientes mayores al 50%. Peterka (1964) recomienda dientes con alturas del 80% de la altura crítica del caudal de diseño, este valor de la altura da una idea de lo grande que tiene que ser la rugosidad del canal. Similares a los dientes deflectores son los canales con fondo de mampostería de piedra que en los últimos años han empezado a hacerse muy populares (figura 1.6 b)

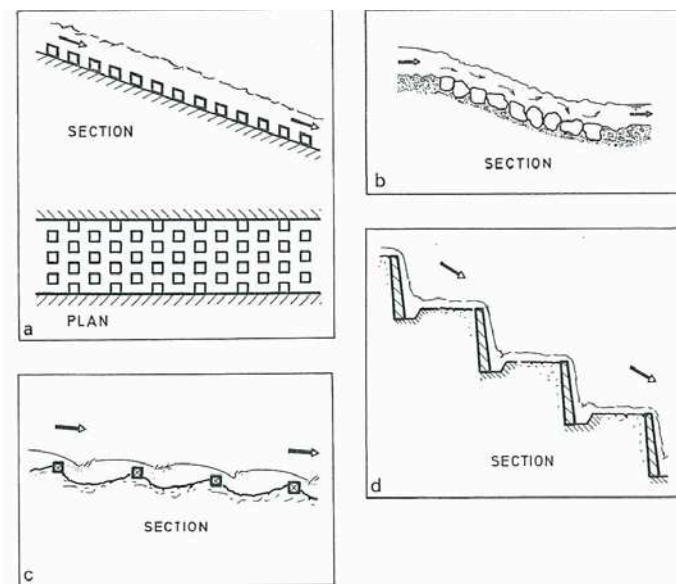
Una variedad de este tipo de disipadores son los disipadores de energía en cascadas.

Casi todos los tipos de disipadores mencionados anteriormente pueden ser diseñados en series, como es el caso del tipo mostrado en la figura 1.6c, en el

que se observa una serie de umbrales de fondo y en la figura 1.6d se observa una serie de vertederos de cresta delgada con fuertes caídas.

FIGURA 1.6

DISIPADORES DE ENERGÍA POR CANALES RUGOSOS Y CASCADAS



Fuente: Energy Dissipators, Vischer y Hager, 1995

1.2.4 DISIPADORES DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LA FORMACIÓN DE VÓRTICES

Los disipadores de energía a través de formación de vórtices no son muy comunes como los estudiados anteriormente, aunque su principio ha sido conocido hace mucho tiempo, la amplia aplicación en la Ingeniería Hidráulica ha sido mucho más reciente.

La figura 1.7a muestra uno de los mecanismos básicos. En Europa disipadores de este tipo son llamados vórtices de cámara o vórtices estranguladores, los cuales fueron exitosamente desarrollados por Brombach (1982), en Estados Unidos estos son conocidos como "hydrobrake".

Este disipador consiste principalmente en un tanque plano cilíndrico con un ingreso tangencial y una salida axial del flujo, por lo tanto el flujo entrante crea fuertes vórtices y el flujo saliente es giratorio y muchas veces en hondonadas con

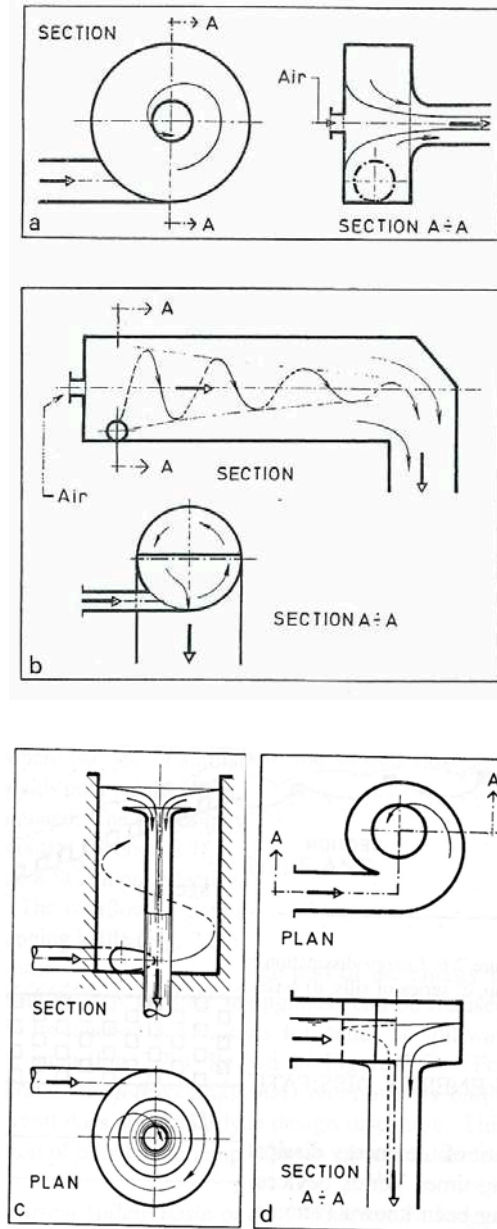
núcleo de aire, de este modo parte de esta energía es disipada. En el caso de que el flujo saliente sea sumergido aguas abajo, es recomendado colocar un aireador axial. Estos disipadores principalmente son usados en sistemas de alcantarillado pluvial.

El mismo principio es aplicado en vórtices en tubos como se muestra en la figura 1.7b. El flujo es guiado tangencialmente en un tubo y realiza un recorrido helicoidal a lo largo de las paredes del tubo, para salir en una vena axial, la energía es principalmente disipada por la fricción. Este tipo de disipadores son usualmente utilizados en el vaciado de turbinas y para pequeñas descargas.

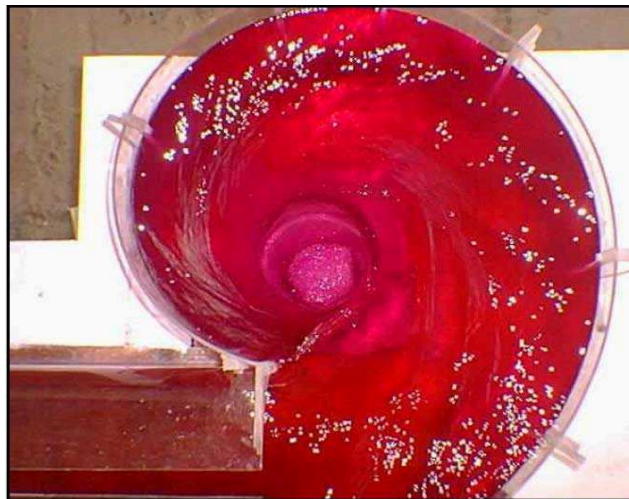
Otro mecanismo de los disipadores en vórtices son los producidos en cámaras con un nivel libre de agua como se muestra en la figura 1.7c, este es una variante de los del tipo vórtices de pozo (figura 1.7d), este último consiste en una forma espiral para la entrada del flujo y un pozo vertical. El flujo de entrada es guiado hacia las paredes del pozo con una fuerza centrífuga que se mantiene durante la caída debido al efecto del "Coanda", como consecuencia de esto, el flujo sigue una trayectoria helicoidal hacia abajo, similar al recorrido de las ranuras de un tornillo, generando pérdidas debido a la fricción a lo largo de las paredes. En la parte final de un largo pozo el flujo se mueve prácticamente vertical y es casi un chorro de caída libre, la energía disipada es parcial por lo que es necesario completar la disipación con un cuenco sumergido en el fondo del pozo. Este tipo de disipador fue originalmente usado al final del túnel de carga en hidroeléctricas, pero actualmente es más utilizado para salvar desnivel en sistemas de alcantarillado pluvial.

FIGURA 1.7

DISIPADORES DE ENERGÍA A TRAVÉS DE VÓRTICES



Fuente: Energy Dissipators, Vischer y Hager, 1995

FIGURA 1.8**FOTOGRAFÍA DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA DEL TIPO VÓRTICES EN POZOS**

Fuente: Escuela Politécnica Nacional

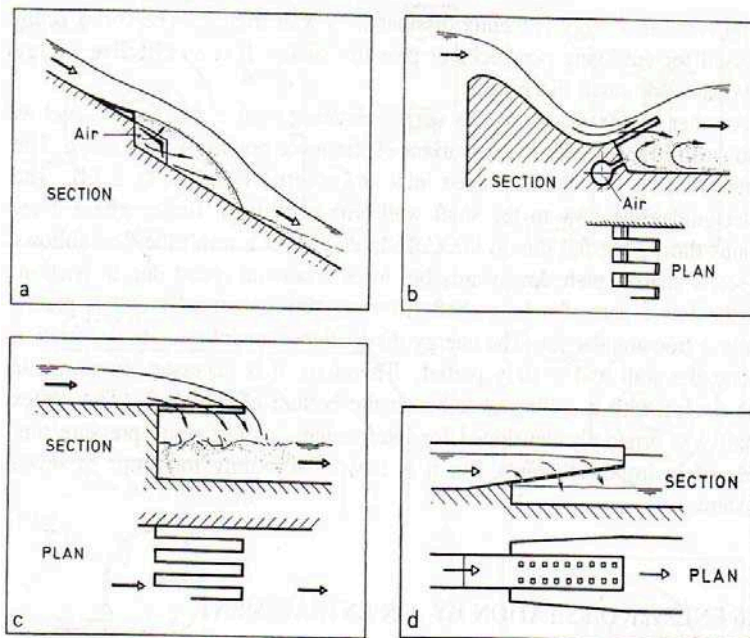
1.2.5 DISIPADORES DE ENERGÍA POR ENTRADA DE AIRE

Diversos tipos de disipadores usan procesos en los cuales un flujo rápido y un lento son mezclados y la energía cinética es así disipada. La pregunta surge si mezclando una corriente rápida con una corriente de aire tiene similar efecto, esto no es así por supuesto, es claro que todos los procesos de mezclas consumen energía, pero si en flujos de altas velocidades ingresa aire, la pérdida de energía no es muy alta.

En el caso de que el agua choque con una masa de aire y considerando que la densidad del agua es aproximadamente 800 a 900 veces la densidad del aire, las pérdidas por impacto son insignificantes aunque la masa de aire sea mucho mayor que la del agua. Por esta razón los aireadores de fondo (figura 1.9a) como los usados hoy en día sirven para prevenir cavitación en canales y en vertederos de gran longitud y no son efectivos como disipadores de energía, aunque existe la posibilidad de combinar mecanismos de disipación con aireadores como los mostrados en la figura 1.9b. Existen otros tipos de combinaciones como las mostradas en la figura 1.9c y 1.9d.

FIGURA 1.9

DISIPADORES DE ENERGÍA CON AIREADORES



Fuente: Energy Dissipators, Vischer y Hager, 1995

1.2.6 DISIPADORES DE ENERGÍA POR CHORROS DIFUSORES

Como se dijo en la sección anterior, una entrada normal de aire no resulta en una eficiente disipación de energía. Este estado sin embargo es dependiente del grado de entrada de aire, porque si el ingreso de aire alcanza un grado donde la corriente de agua es transformada en espray, la disipación de energía puede ser alta, la razón se encuentra en la transformación del flujo de agua a un fluido agua-aire, que consiste en una nube de gotas de agua en aire. Estas gotas son fuertemente afectadas por el arrastre de aire, especialmente si son pequeñas y se mueven a velocidades que son relativamente altas con respecto al medio aire que las rodea.

Un clásico ejemplo de un chorro difusor es el surtidor mostrado en la figura 1.10a, aunque este es generalmente usado para adorno y no como disipador de energía. El mismo principio es usado en las válvulas de chorro tipo hondonada y en las válvulas tipo "HowellBunger" (figuras 1.10b y 1.10c). Estos chorros son

intencionalmente sujetos a una fuerte difusión y ellos son generalmente dirigidos horizontalmente y posiblemente en un cuenco disipador, las válvulas tienen el objeto de incrementar la combinación agua-aire y convertir el chorro de agua en espray, estos son usualmente colocados en las descargas de fondo en presas.

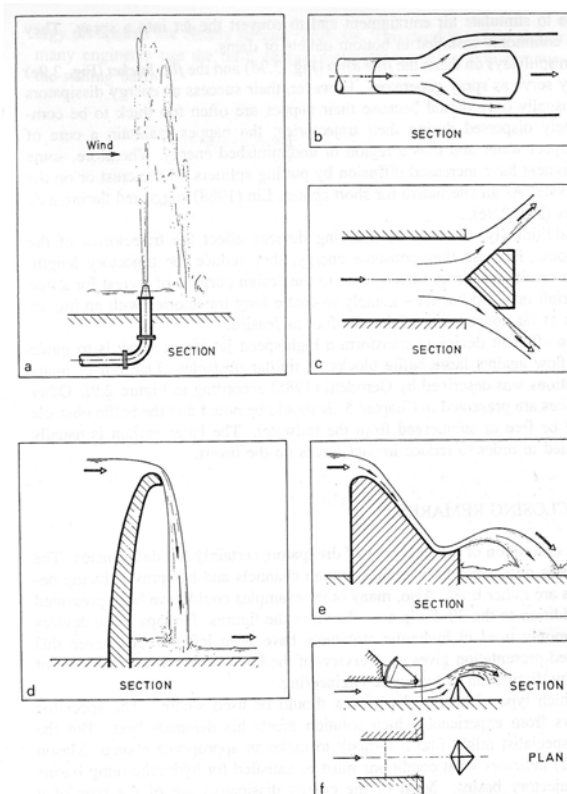
En vertederos en presas de caída libre y deflectores dispersores de energía (figura 1.10d) pueden servir como generadores de espray, sin embargo su éxito como disipadores de energía es usualmente solo parcial, porque la lámina de agua es generalmente demasiado gruesa para ser completamente dispersa durante su trayectoria, la lámina de agua mantiene un núcleo compacto de agua y así una región de energía sin disminución, por lo tanto algunos diseñadores han incrementado la dispersión adicionando separadores de flujo sobre la cresta de un dispersor. Como una alternativa para canales cortos, Lin (1988) sugiere colocar dientes abocinados al final de un vertedero de cresta gruesa (figura 1.10e).

Adicionalmente, el mecanismo de inducir espray afecta la trayectoria de la lámina de agua, porque ellos consumen energía, lo que reduce la longitud de la trayectoria, este resultado muchas veces es opuesto a lo requerido por el diseñador, que aspira llegar con el chorro lo más lejos posible con la finalidad de evitar daños al pie de una estructura.

Un mecanismo eficiente para transformar chorros de altas velocidades en un espray, es guiar el flujo hacia largos bloques deflectores o a otros obstáculos similares, una de estas soluciones fue descrita por Gerodetti (1985) de acuerdo con la figura 1.10f, esta variante también es aplicada para reducir las fuerzas de impacto en la solera.

FIGURA1.10

DISIPADORES DE ENERGÍA POR MEDIO DE CHORROS DIFUSORES



Fuente: Energy Dissipators, Vischer y Hager, 1995

1.2.6.1 El Salto En Esquí

Previo a definir este tipo de disipador, es conveniente mencionar, que ha sido uno de los dos disipadores de energía usados para cumplir los objetivos del presente trabajo de investigación.

La cuchara del salto en Esquí, es el elemento que dirige el flujo de un vertedero o canal hacia aguas abajo lejana al pie de la estructura, ya sea vertedero, casa de máquinas u otras, con la finalidad de no ocasionar daños en las estructuras mencionadas, sino que el aire circundante puede atacar la mayor área posible y mover el impacto erosivo del agua fuera del pie de la estructura.

Entre algunos tipos de cucharones, tres de ellos se pueden distinguir como más importantes, ellos son (Ref.12):

- Cucharón longitudinal
- Dispensor de energía (flipBucket)
- Deflector

El cucharón longitudinal, tiene normalmente forma de arco circular y su radio es generalmente entre 10m y 20m o cinco veces el calado inmediatamente aguas arriba. Si el radio es demasiado pequeño puede ocasionar vibración y turbulencia. (Ref.12)

El dispensor de energía, se caracteriza por la sección transversal que varía en la dirección del flujo, este dispensor es capaz de cambiar la dirección del flujo tanto transversal como longitudinalmente.

El deflector consiste en una simple superficie curva con un labio alto y una pendiente al final que dirige el flujo lejos de la salida. La forma del deflector es normalmente optimizada en modelos físicos.

En general todos ellos se usan para el disipador del tipo el Salto en Esquí, en este sistema la energía es disipada por tres acciones; por el contacto aire-agua, por la turbulencia del agua y por la fricción del flujo con el cauce del río.

En el diseño del cucharón interviene la pendiente de aproximación, la curvatura del cucharón, el ángulo de salida y el labio del cucharón.

Para el caso que el cucharón se construya aguas abajo de un vertedero, el límite superior de la pendiente del vertedero es 4(vertical) a 1(horizontal) (Ref.8), para valores mayores el flujo empieza a dar problemas en el salto.

El ángulo de salida del cucharón determina la longitud de trayectoria, un salto adecuado ocurre para ángulos entre 20° y 40° (Ref.12), ángulos mayores dispersan el chorro aguas abajo y producen mayor combinación agua-aire, además que para caudales pequeños se forman lagunas en el cucharón, en el que al llegar el chorro produce una onda que es repetitiva y que tiene un carácter muy erosivo.

Una de las consideraciones más importantes en el diseño de un disipador del tipo salto en esquí, es determinar la trayectoria del chorro, trayectoria que si se

desprecia la resistencia del aire y la separación del chorro, se la puede obtener por las ecuaciones de un proyectil, es decir que su desplazamiento sería parabólico.

La trayectoria del chorro depende de la descarga, de su energía en el extremo y del ángulo con el que sale del trampolín, de esta manera teóricamente el mayor recorrido se daría para un ángulo del labio de 45° , situación que varía por la resistencia del aire y la difusión como se ha mencionado anteriormente.

En el trayecto, el chorro contiene grandes cantidades de aire, debido a los procesos de difusión y aireación. Análisis experimentales indican que la difusión de la trayectoria del chorro en el aire, es consistente con la regla ordinaria de la difusión del chorro. Su rango de difusión es como de 1:40. Pero durante descargas pequeñas la difusión del chorro no es notoria, incluso hay encogimiento, se sabe que la difusión del chorro depende del número de Reynolds en el esquí, ya que está en relación con la turbulencia. (Ref. 1).

1.2.6.1.1 Difusión Del Chorro

En base a la experimentación, el espesor de difusión del chorro puede ser escrito como: (Ref.1).

$$b_1 = \frac{h_0 + (j \cdot X)}{20} \text{ (Ec. 1.4)}$$

$$J = \frac{0.8 \cdot 10^4}{R_e + 0.1} \text{ (Ec. 1.5)}$$

Para: $(0.8 \cdot 10^4 < R_e < 1.0 \cdot 10^5)$

Donde:

b_1 = Espesor del chorro difuso

h_0 = Calado en el esquí (m)

X = Longitud de trayectoria del chorro, (m)

J = Coeficiente de Reynolds

R_e = Número del Reynolds en el esquí.

1.2.6.1.2 Alcance Máximo

-Fórmula de Elevatorsky(Ref.1)

Medidas realizadas por investigadores en algunas presas, para flujos menores que la mitad de la máxima descarga, muestran aproximadamente que del 19 a 20% de la energía disipada es por interacción del chorro con el aire, para compensar ésta reducción de velocidad y pérdida de energía del chorro durante su trayectoria, se sugiere que la siguiente ecuación sea utilizada para el cálculo del alcance:

$$X = 1.9 h * \text{Sen}(2\Phi) \text{Ec. 1.6}$$

Donde:

X = Distancia medida desde el final del cucharón o labio del esquí hasta el punto de intersección del chorro con el flujo del río.

h = Carga de presión, medida en el fondo el cucharón

Φ = Ángulo a la salida del cucharón

- Fórmula de Kawakami: (Ref. 1)

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

$$L_o = \frac{V_o^2}{g} * \text{Sen}(2\Phi) \text{(Ec. 1.7)}$$

Donde:

L_o = Distancia medida desde el final del cucharón o labio del esquí hasta el punto de intersección del chorro con el flujo del río.

V_o = Velocidad del flujo de aproximación a la ubicación del cucharón.

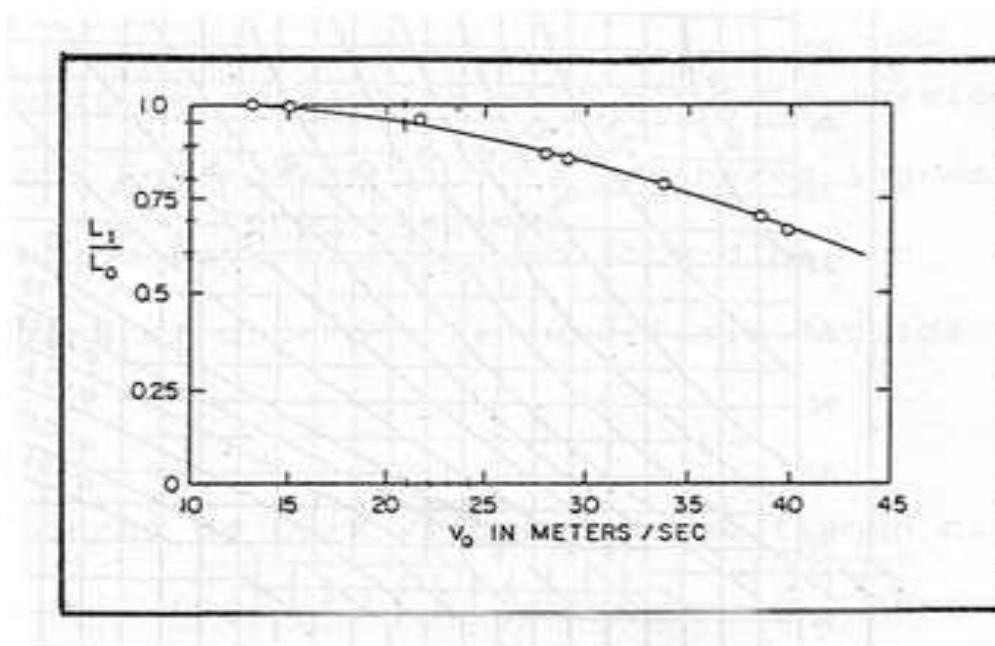
g = aceleración de la gravedad

Φ = ángulo a la salida del cucharón.

Kawakami, presentó sus resultados de algunas investigaciones de campo de las trayectorias de un chorro con vertedero en salto en 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 1.11:

FIGURA 1.11

TRAYECTORIA DEL CHORRO CON RESISTENCIA DEL AIRE



Fuente: 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, 1991.

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

- **Fórmula de Burkov:** (Ref.1)

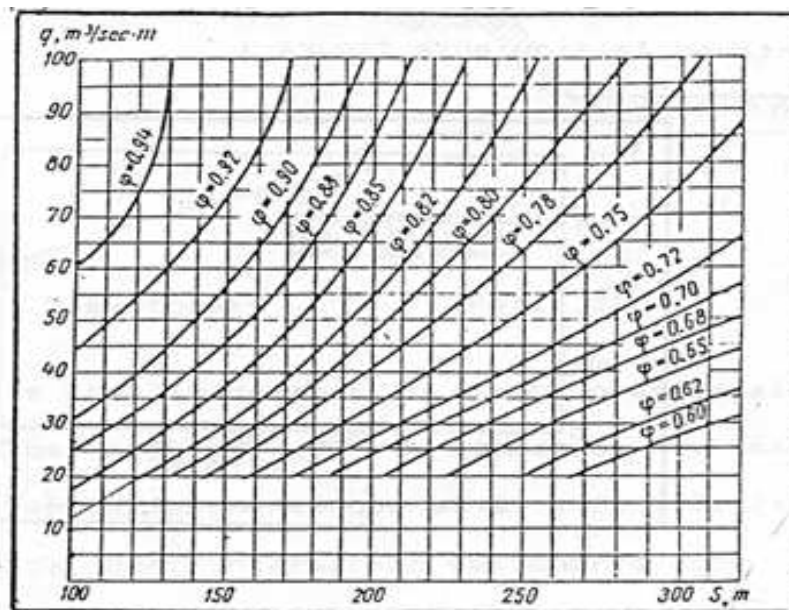
La distancia entre el labio de salida del deflector y un punto de impacto del chorro puede ser dado por la ecuación:

$$X=2\psi^2 \left(H_1 - \frac{h_0}{2} \right) \text{Cos}\phi \left[\text{Sen}\phi + \sqrt{\text{Sen}^2\phi + \left[\frac{Ht-H_1+h_0/2}{2*(H_1-\frac{h_0}{2})} \right]} \right] \text{(Ec. 1.8)}$$

Donde ψ se obtiene de la figura 1.12, en función del caudal unitario (q) y del ancho del deflector S .

FIGURA 1.12

VALORES DEL PARÁMETRO ψ EN FUNCIÓN DEL CAUDAL UNITARIO Y DEL ANCHO DEL DEFLECTOR



Fuente: 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, 1991.

1.2.6.1.3 *Cuenca De Socavación*

El dissipador del tipo salto en esquí, produce un choque de una vena líquida difusa con una masa de agua, genera un torbellino y da lugar a la formación de un cuenco de socavación.

Las características de este cuenco están bajo la influencia de factores directos e indirectos, los directos, son las características hidráulicas del chorro como el caudal, la carga energética, su ángulo de impacto, la aireación y los indirectos comprenden las características del lecho aguas abajo, incluyendo la resistencia a socavación, su profundidad, geometría, etc.

Cuando el ángulo de impacto tiende a ser horizontal, aumenta la recirculación del flujo y provoca una mayor extensión del cuenco, en el caso contrario cuando se incrementa el ángulo de impacto, aumenta la profundidad del hueco pero se reduce su extensión. Uno de los principios del Salto en Esquí, es inducir un desplazamiento hacia aguas abajo del chorro a través de un salto, de tal manera de proteger la cimentación de la estructura existente, por lo que un cuenco de socavación de mayor extensión puede provocar distorsionar este principio y afectar la cimentación, de tal manera que se debe evitar ángulos de impacto bajos.

La formación del cuenco se produce por una remoción de las partículas del lecho del río por efecto del torbellino formado, esta remoción se genera de tal modo que las partículas del lecho son transportadas hacia aguas abajo por el efecto de arrastre y otra porción menor son llevadas hacia aguas arriba por efecto de succión, parte de las partículas arrastradas aguas abajo se apilan hasta que se alcanza su máxima capacidad de estabilidad y luego colapsan, rellenando nuevamente el hueco, generándose un proceso cíclico, que también depende de las variaciones de caudal y energía aguas arriba.

La máxima profundidad de socavación depende de la profundidad de disturbio, que es la profundidad que alcanza el torbellino sumergido. Cuando la profundidad del cuenco es mayor a la profundidad de disturbio, no se genera socavación, de allí la ventaja de construir un cuenco pre excavado.

La posibilidad que el cuenco alcance la profundidad de disturbio, depende del material del lecho, es más factible esta posibilidad, cuando las partículas del lecho son en promedio pequeñas.

A través de la experimentación, ha sido posible obtener una ecuación para determinar la profundidad de disturbio (Figura 1.13)

$$T_o = \frac{K.V.q \text{Sen}^2 \alpha}{g.b_1(1-b_o/b_1)} \text{(Ec.1.9)(Ref.1)}$$

En donde:

T_o = Profundidad de disturbio (m)

V = Velocidad del chorro en el punto de incidencia (m/s)

g = gravedad (m/s)

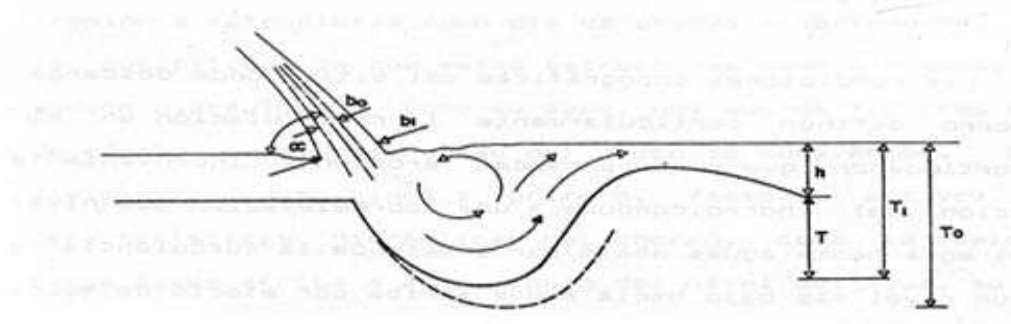
α = ángulo de incidencia

b_1 = ancho del chorro disperso (incluido la aireación, obtenida por ec. 1.4)

b_o = ancho del chorro sin dispersión

FIGURA 1.13

CUENCO DE SOCAVACIÓN Y FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE DISTURBIO



Fuente: 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, 1991.

1.2.6.1.3.1 Profundidad Máxima Del Cuenco De Socavación

Para determinar el efecto erosivo 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 y de la profundidad del pozo amortiguador.

La máxima profundidad “ Y_s ” medida desde la superficie libre del agua resulta ser 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 ” dependen de las siguientes variables:

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

d_n = Diámetro nominal del material

q = Caudal específico ($m^3/s.m$)

H = Desnivel entre la altura de carga del embalse y el nivel de restitución o bien la carga de presión.

F = Número de Froude $F = \frac{V_o}{\sqrt{gh_o}}$

α = Ángulo de entrada del chorro en el cuenco

h_r = Tirante de aguas abajo con respecto al lecho no erosionado

-Fórmula de Veronese. (Ref.12)

$$y_s = 1.90 * H^{0.225} * q^{0.54} * \text{Sen } \alpha \text{ (Ec. 1.10)}$$

- Fórmula de C.WU. (Ref.1)

$$y_s = 1.127 * H^{0.235} * q^{0.51} \text{ (Ec. 1.11)}$$

$$y_s = 2.018 * H * \left(\frac{q}{\sqrt{g * H^3}} \right)^{0.51} \text{ (Ec. 1.12)}$$

-Fórmula De Damle. (Ref.12)

$$y_s = C_s(qH_o)^{1/2} \text{ (Ec. 1.13)}$$

En esta fórmula de Damle las unidades son:

$q = ft^2/s$, $H_o = ft$, $Y_s = ft$

$C_s = 0.30$ (adimensional)

- Fórmula De Soloveva. (Ref.1)

$$y_s = 0.45 * h_o * F^{3/2} * \left(\frac{h_r}{d_n} \right)^{1/4} \text{ (Ec. 1.14)}$$

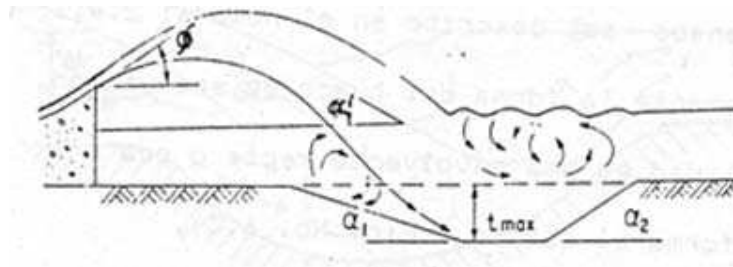
- Fórmula De Chee y Kung. (Ref. 1)

$$y_s = 3.3 * H * \left(\frac{q}{\sqrt{g * H^3}} \right)^{0.6} * \left(\frac{H}{d_{90}} \right)^{0.1} * \phi^{0.1} \text{ (Ec. 1.15)}$$

El ángulo de llegada del chorro está en función del ángulo de salida y se puede determinar a través de la figura 1.15, cuyos componentes se pueden observar en la figura 1.14.

FIGURA 1.14

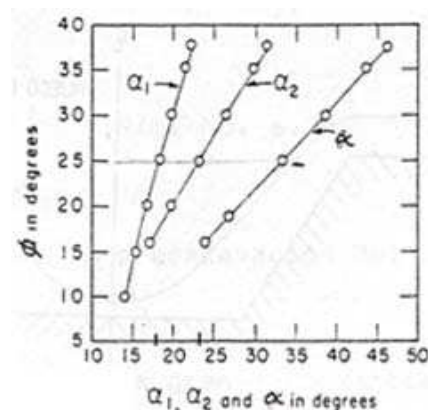
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL CHORRO Y EL CUENCO EN EL SALTO EN ESQUÍ



Fuente: 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, 1991.

FIGURA 1.15

ÁNGULO DE ENTRADA DEL CHORRO EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE SALIDA DEL CHORRO EN EL SALTO EN ESQUÍ



Fuente: 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, 1991.

1.2.7 DISIPADORES DE ENERGÍA CON BLOQUES DE IMPACTO O CON UMBRALES

Una parte muy importante en el diseño de los disipadores de energía son las medidas para la estabilización del resalto hidráulico, con la finalidad que este resalto no se salga de los límites del lecho disipador o ya sea forzar un lecho de menor tamaño.

Entre las medidas más comunes utilizadas para la estabilización del resalto hidráulico se encuentran los bloques de impacto, que se colocan dentro del colchón amortiguador en una o más filas (figura 1.16). El efecto de estos bloques se fundamenta en una fuerza adicional F_B (figura 1.16) que se debe añadir a las fuerzas exteriores actuantes sobre el volumen de control en la ecuación del impulso, de tal manera que la ecuación resulta así:

$$P_1 - P_2 - F_B = \rho Q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Donde:

P_1 = Fuerza de presión al inicio del resalto hidráulico

P_2 = Fuerza de presión al final del resalto hidráulico

F_B = Fuerza de reacción que produce el bloque de impacto

ρ = Densidad del líquido

Q = Caudal

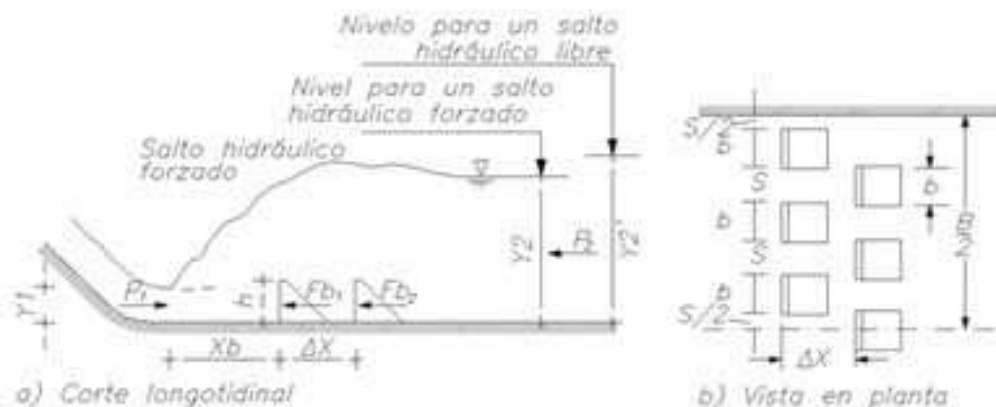
$\beta_1 = \beta_2$ = Coeficiente de Boussinesq

V_1 = Velocidad al inicio del resalto hidráulico

V_2 = Velocidad al final del resalto hidráulico

FIGURA 1.16

DISIPADOR CON BLOQUES DE IMPACTO Y SUS RESPECTIVAS FUERZAS ACTUANTES



Fuente: Hidráulica de canales, Naudascher, (2001)

Elaboración: Fernando Ortega N.

La magnitud F_b , depende de la ubicación del resalto hidráulico con respecto a la ubicación de los bloques, ya que está relacionada con la velocidad del flujo local V_b , cerca de los bloques de impacto. Mientras más cerca estén los bloques del inicio del resalto mayor será la magnitud de la fuerza F_b y mientras más cerca estén los bloques del final del resalto menor será la magnitud de F_b .

$$F_b = C_w \cdot A_b \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_b^2 \quad (\text{Ec. 1.17})$$

La variación de F_b desde su valor máximo hasta su valor mínimo, debido a la ubicación relativa del resalto y los bloques de impacto, se presenta en la Ec. 1.18.

$$\left(C_w \cdot A_B \cdot \frac{\rho}{2} \right) V_2^2 < F_B < \left(C_w \cdot A_B \cdot \frac{\rho}{2} \right) V_1^2 \quad (\text{Ec. 1.18})$$

En donde:

F_B = Fuerza de reacción que produce el bloque de impacto.

C_w = Coeficiente de resistencia.

A_b = Suma de las áreas de las proyecciones normales al flujo de todos los bloques de impacto.

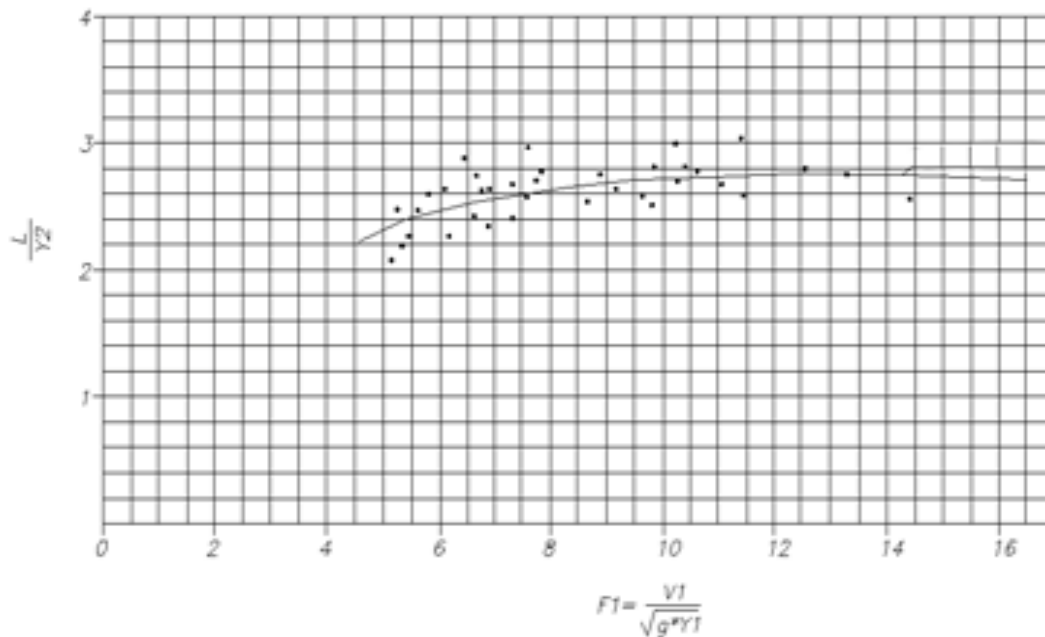
ρ = Densidad del líquido.

V_b = Velocidad en la cara frontal del resalto hidráulico

Los bloques de impacto conducen a una reducción de la longitud del resalto hidráulico, esta reducción se la puede determinar de acuerdo a la figura 1.17, que es el resultado de una serie de ensayos experimentales.

FIGURA 1.17

CURVA PARA DETERMINAR LA LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO EN UN CUENCO CON BLOQUES DE IMPACTO (TIPO III EN LA CLASIFICACIÓN DEL BUREAU OF RECLAMATION)



Fuente: Bureau of reclamation.

1.2.8 DISIPADORES DE ENERGÍA POR ESCALONES

1.2.8.1 Escalón Negativo

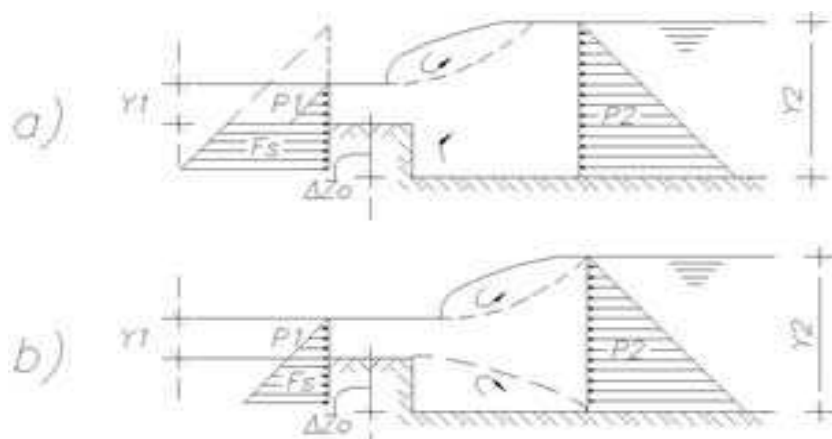
Otra de las formas de estabilización del resalto hidráulico es profundizar el fondo del canal aguas arriba del colchón disipador (figura 1.18), esta medida también es útil en casos de flujos asimétricos y con presencia de ondas, ya que permite fijar el pie del remolino en toda la sección transversal.

La estabilización del resalto en disipadores con escalón negativo se produce por efecto de una fuerza F_s (figura 1.18a y 1.18b), que conjuntamente con las fuerzas de presión P_1 y P_2 , producen un cambio en las condiciones de equilibrio.

La fuerza F_s produce un efecto similar al de la fuerza F_B de la Ec. 1.16, y consiste en una reacción normal a la sección transversal de la contrahuella del escalón, que varía según si el resalto es sumergido (fig. 1.18a) o rechazado (fig.1.18b) al pie de este escalón.

FIGURA 1.18

DISIPADOR DE ENERGÍA POR ESCALÓN NEGATIVO



Fuente: Hidráulica de canales, Naudascher, (2001)

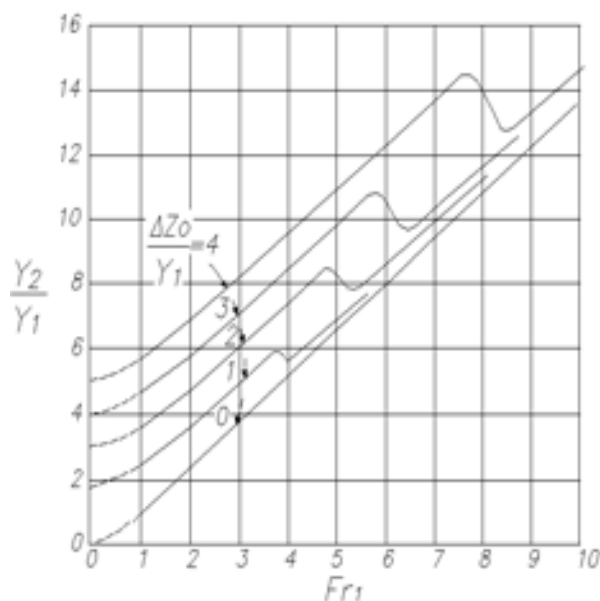
Elaborado: Fernando Ortega N.

Según las investigaciones realizadas por Rouse y sus colaboradores, cuando el resalto es sumergido se aplica la Ec.1.19 y cuando es rechazado se aplica la Ec.1.20. Estas ecuaciones también se muestran graficadas en la Fig.1.19, para diferentes valores de $\frac{\Delta Z}{y_1}$, para valores conocidos de Fr_1 .

$$Fr_1^2 = \frac{y_2/y_1}{2(1-y_2/y_1)} \left[1 - \left(\frac{y_2}{y_1} - \frac{\Delta Z_0}{y_1} \right) \right] \quad (\text{caso a})(\text{Ec. 1.19})$$

$$Fr_1^2 = \frac{y_2/y_1}{2(1-y_2/y_1)} \left[\left(\frac{\Delta Z_0}{y_1} + 1 \right)^2 - \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 \right] \quad (\text{caso b})(\text{Ec. 1.20})$$

FIGURA 1.19

GRÁFICO DE (Y_2/Y_1) , EN FUNCIÓN DE $(\Delta Z_0/Y_1)$ Y FR_1 (EC.1.19 Y EC1.20)

Fuente: Hidráulica de canales, Naudascher, (2001)

Elaborado: Fernando Ortega N.

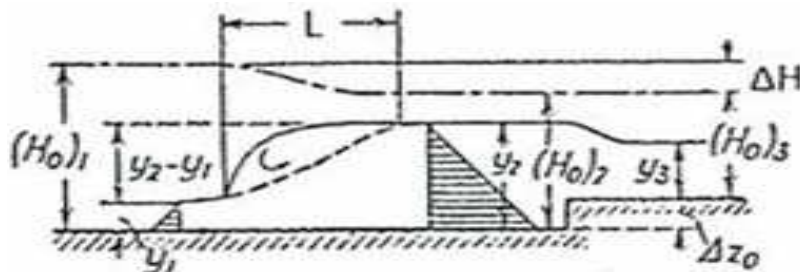
En la figura 1.19, la línea de puntos corresponde a los casos en que el inicio del resalto hidráulico se produce libre en el pie del escalón, el primer tramo recto de cada curva corresponde a los casos en que el resalto se produce sumergido al pie del escalón y el segundo tramo recto en los casos que el resalto se produce rechazado al pie del escalón, la curva que une los dos tramos rectos corresponde a la transición entre los dos casos.

1.2.8.2 Escalón Positivo

El escalón positivo puede ubicarse al final y dentro del resalto, en el primer caso sirve como medio para estabilizar el resalto hidráulico, y en el segundo caso tiene efectos similares al del escalón negativo. Cuando se ubica al final del resalto hidráulico, su objetivo principal es reducir el calado aguas abajo, también se lo usa frecuentemente para evitar el ingreso de material del fondo en el cuenco disipador, es necesario considerar que un escalón muy alto puede ocasionar socavación aguas abajo.

FIGURA 1.20

CUENCO DISIPADOR CON ESCALÓN POSITIVO



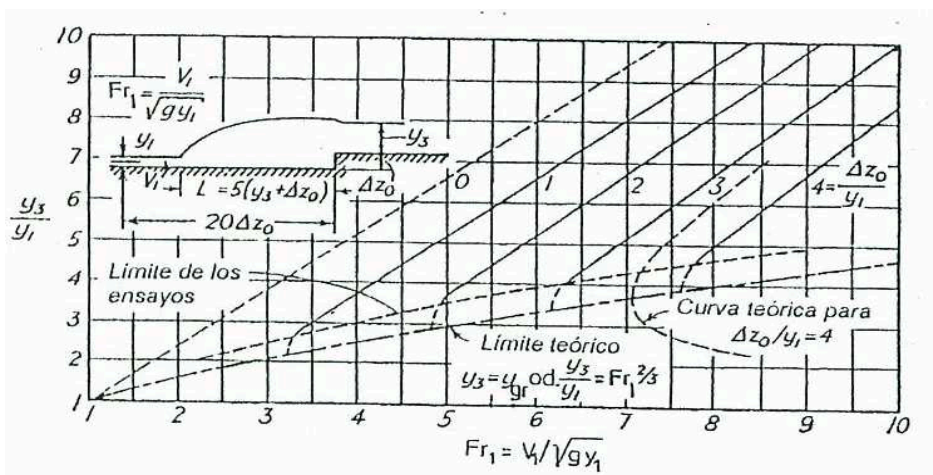
Fuente: Hidráulica de canales, Naudascher, 2001

De las investigaciones realizadas en cuencos con escalón positivo, se conoce que la altura del escalón (ΔZ_0), está directamente relacionada con los parámetros y_3/y_1 y Fr_1 . Esta relación ha sido constituida mediante la Ec.1.21, la cual se muestra gráficamente en la Fig.1.21

$$\frac{y_1^2}{2} - \frac{y_3^2}{2} - \Delta z_0 (y_3 - \Delta z_0) = \frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{y_3} - \frac{1}{y_1} \right) \text{ (Ec. 1.21)}$$

FIGURA 1.21

PROFUNDIDADES CONJUGADAS EN UN DISIPADOR DE ENERGÍA CON ESCALÓN POSITIVO Y ANCHO DE CANAL CONSTANTE



Fuente: Hidráulica de canales, Naudascher, 2001

1.3 DISIPADORES DE ENERGÍA CONVENCIONALES

Existen algunos disipadores de energía que son comúnmente usados, los cuales son una combinación de la clasificación anterior y se han definido en una serie de estudios experimentales, entre ellos tenemos el disipador tipo SAF, los disipadores del Bureau of Reclamation clasificados como tipo I, tipo II, tipo III, tipo IV, tipo V, tipo VI, tipo VII.

En el capítulo dos de la “Referencia 5”, se encontrará un resumen detallado y los parámetros de diseño de cada uno de estos disipadores, bajo el título de estructuras normalizadas.

En el presente trabajo se hace referencia únicamente al disipador Tipo IV del Bureau of Reclamation, ya que es uno de los dos disipadores usados en la investigación objeto de esta tesis.

1.3.1 DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION

Este disipador es una combinación de disipadores de energía por chorros difusores, por el contrario flujo, cuenco disipador con escalón negativo y cuenco disipador con escalón positivo.

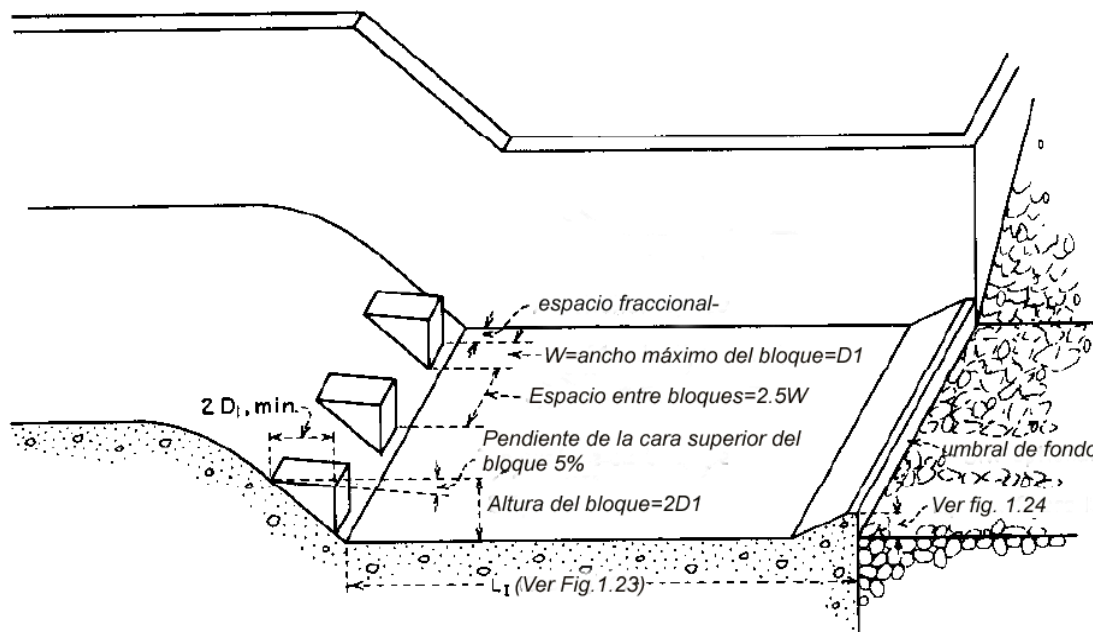
Este tipo de disipador es adecuado para los casos de resalto hidráulico formado en flujos con números de Froude aguas arriba del resalto entre 2.5 y 4.5. El resalto hidráulico formado en este rango ocasiona la formación de oscilaciones intermitentes desde el fondo hasta la superficie sin un periodo particular, cada oscilación produce ondas que son difíciles de amortiguar y que para estructuras estrechas pueden avanzar cientos de metros, por lo que es indispensable el diseño de supresores de onda ya que estas ondas destruyen las estructuras de conducción así como los cuencos disipadores.

De las investigaciones realizadas en flujos con presencia de ondas, se ha determinado que la mejor forma de combatir estas ondas no es eliminarlas sino mas bien intensificarlas y de este modo estabilizar el resalto. Una forma de intensificar las ondas es a través de chorros dirigidos formados por la presencia de largos bloques, como los de la fig.1.22

El uso de supresores de onda es otro mecanismo que sirve para atenuar dichas ondas y consiste en accesorios colocados en el cuenco como vigas u otros, este tipo de supresores se puede observar en (anexos) láminas 6 y 8.

FIGURA.1.22

GEOMETRÍA DEL DISIPADOR TIPO IV Y DIMENSIONAMIENTO RECOMENDADO



Fuente: Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25.

El número de bloques debe ser el menor posible, ya que el volumen ocupado por estos accesorios provoca un remanso aguas arriba, el número de bloques mostrado en la figura 1.22, es el mínimo necesario para cumplir el objetivo propuesto, el ancho de los bloques recomendado es igual al calado aguas arriba (D_1) y corresponde al máximo recomendado, desde el punto de vista hidráulico es aconsejable que el ancho de los bloques sea menor al máximo, preferiblemente $0.75D_1$. La relación del ancho del bloque con respecto al espacio entre bloques debe mantenerse en el rango 1:2.5, la cara superior del bloque debe quedar a una altura de dos veces el calado aguas arriba ($2D_1$) con respecto a la base del cuenco dissipador y la longitud del bloque debe ser $2D_1$. Los bloques pueden tener la apariencia de ser muy altos y en algunos casos extremadamente largos, pero es esencial para que el chorro choque en la base de la onda. Además la cara superior del bloque debe tener una inclinación hacia abajo de 5° , lo cual es beneficioso especialmente para caudales menores al de diseño.

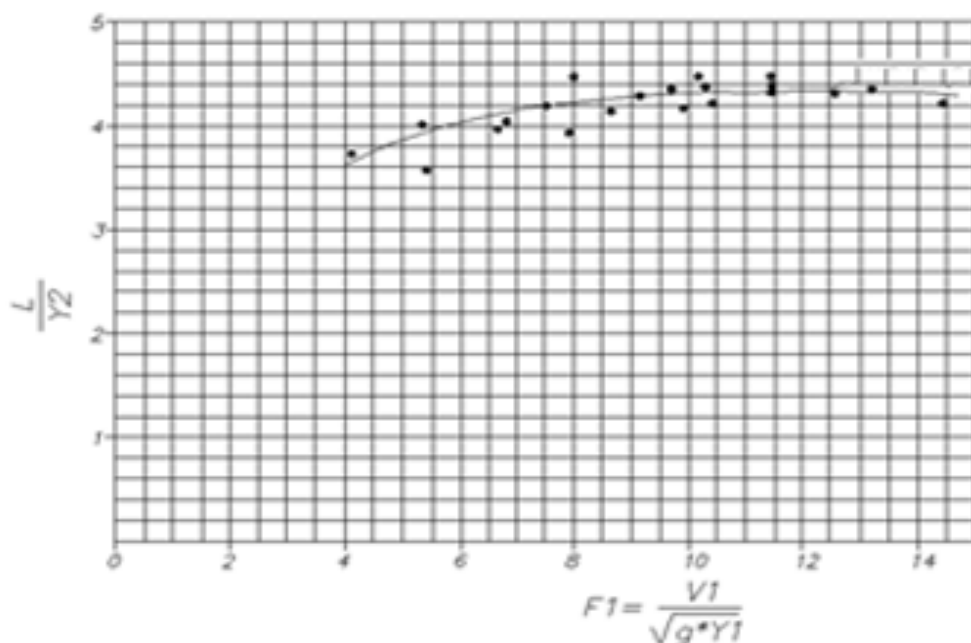
En este tipo de disipadores es necesario que la profundidad aguas abajo sea de 5% a 10% mayor a la profundidad conjugada, ya que por la inestabilidad del resalto para este rango de números de Froude, una baja en el calado puede ocasionar el desbordamiento del agua del cuenco, además que una mayor profundidad aguas abajo reduce el efecto de las ondas.

La longitud del cuenco disipador puede ser determinada a través de la figura 1.19, no es necesario el uso de otros accesorios ya que provocaría mayores desventajas que ventajas, el uso de un umbral al final del cuenco es recomendable para el control de arrastre de sedimentos hacia el cuenco.

Si el cuenco IV, es diseñado para la máxima descarga, este rendirá satisfactoriamente para caudales menores. Este disipador es aplicable solamente para secciones del cuenco rectangulares.

FIGURA 1.23

CURVA PARA DETERMINAR LA LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO EN UN CUENCO TIPO IV DE LA CLASIFICACIÓN DEL BUREAU OF RECLAMATION

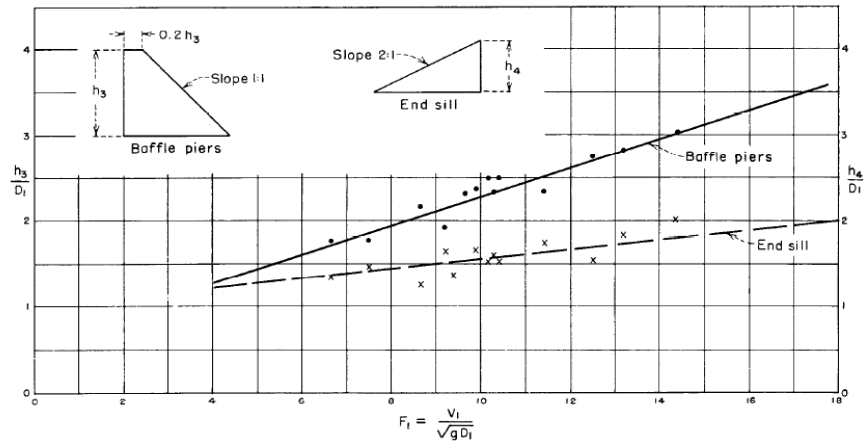


Fuente: Bureau of reclamation, Engineering Monogtaph 25.

Umbral Final: La altura del umbral final depende del número de Froude, en la figura 1.24, se muestra la altura de diseño de acuerdo al correspondiente número de Froude.

FIGURA 1.24

CURVA PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL UMBRAL DE FONDO



Fuente: Bureau of reclamation, Engineering Monogtaph 25.

CAPÍTULO 2

MODELACIÓN FÍSICA

Un modelo en su amplio sentido es una simplificada representación de un sujeto, estado o evento.

La modelación física es una herramienta que actualmente se usa en muchas ramas de la Ingeniería y es un instrumento esencial en la concepción y diseño de obras.

La necesidad de llevar a cabo la modelación física, ha surgido por la dificultad de resolver ciertas ecuaciones que gobiernan un fenómeno en particular, así como la imposibilidad de cumplir condiciones iniciales y de frontera, situaciones que se han ido facilitando con el uso de computadoras y se prevé que en un futuro se facilitará aun más estas condiciones. Otra circunstancia aún más crítica en donde la modelación física es indispensable, se presenta en los casos en que las ecuaciones exactas del movimiento se desconocen, no se han medido los parámetros intervinientes y las condiciones iniciales y de frontera son imprecisas.

El uso de modelos físicos no inhibe el uso de modelos numéricos, más bien estos son complementarios y se nutren mutuamente.

Es necesario tener presente que en modelación física existe un grado de limitación con respecto del fenómeno en la naturaleza, por el hecho que no es posible simular a la vez todas las condiciones existentes en la naturaleza, por este motivo es imprescindible tener en cuenta estas condiciones al momento de transferir los datos del modelo al prototipo. El uso de modelos de aire ha sido una alternativa de solución para ciertas de las mencionadas dificultades de modelación, así como también otra solución es el uso de otro tipo de fluidos con respecto a los de la naturaleza.

La teoría de la similitud y a su vez el análisis dimensional son la base de la modelación física y permiten conseguir un adecuado diseño y una óptima operación de un modelo físico, además la modelación física demanda un amplio conocimiento teórico y físico del fenómeno a estudiar.

2.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional busca obtener información sobre determinado fenómeno reflexionando simplemente sobre su forma.

Existen algunos métodos para el análisis dimensional, en el presente trabajo nos basaremos en el método de teorema Π .

2.1.1 MÉTODO DEL TEOREMA Π

El teorema Π o de Vaschy-Buckingham (T-V-B), es considerado la base del análisis dimensional. Este teorema se basa en la definición de un conjunto completo de productos adimensionales, definición que dice:

“Un conjunto de productos adimensionales entre variables dadas es completo, si cada producto es independiente de los otros y todo producto adimensional de las variables es un producto de potencias de los productos adimensionales ya definidos.” (Ref 9)

De esta definición se deduce que si una ecuación es dimensionalmente homogénea, puede ser reducida a una relación entre un conjunto completo de productos adimensionales, de lo que resulta el teorema de Vaschy-Buckingham (T-V-B).

Teorema de Vaschy-Buckingham:

“Dada una relación dimensionalmente homogénea entre n variables, ella podrá expresarse a través de una relación entre $p = n - r$ productos adimensionales, en donde p es el número de productos que forman un conjunto completo de productos adimensionales de las variables en juego.” (Ref.9)

Para determinar r , en la mayoría de los casos es igual al número de dimensiones básicas que se empleen, pero no es una regla infalible, ya que estas dimensiones varían de acuerdo al sistema de unidades utilizado, por lo tanto es recomendable usar la norma enunciada por Van Driest, la que dice:

“El número p será igual a n disminuido en el máximo número de variables que no formarán un producto adimensional.” (Ref.9)

Otra regla al respecto es la enunciada por Langhaar, que dice:

“El número p , será igual a n disminuido en el rango de su matriz dimensional.”
(Ref.9).

2.1.1.1 Matriz Dimensional

Si se tiene n variables X_j con r' dimensiones fundamentales x_i , se puede expresar como:

$$X_j = \prod_{i=1}^{r'} x_i^{\alpha_{ij}} \quad (\text{Ec.2.1})$$

Los exponentes α_{ij} son los de la fórmula dimensional de X_j respecto de las dimensiones x_i . Estos exponentes constituyen una matriz, llamada matriz dimensional de las variables, y que pueden representarse de la siguiente forma:

	X_1	X_2	X_3	...	X_j	...	X_n
X_1	α_{11}	α_{12}	α_{13}	...	α_{1j}	...	α_{1n}
X_2	α_{21}	α_{22}	α_{23}	...	α_{2j}	...	α_{2n}
X_3	α_{31}	α_{32}	α_{33}	...	α_{3j}	...	α_{3n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
X_i	α_{i1}	α_{i2}	α_{i3}	...	α_{ij}	...	α_{in}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$X_{r'}$	$\alpha_{r'1}$	$\alpha_{r'2}$	$\alpha_{r'3}$...	$\alpha_{r'j}$...	$\alpha_{r'n}$

El rango de la matriz dimensional es equivalente al valor mínimo del orden de un determinante que no sea nulo, de esta matriz.

2.1.1.2 Ecuaciones Para El Cálculo De Los Productos Adimensionales De Un Conjunto Completo

Simbólicamente se puede representar un producto adimensional completo, de la siguiente manera:

$$\Pi = \prod_{j=1}^n X_j^{K_j} \text{ (Ec 2.2)}$$

En donde los (n) exponentes k_j deben determinarse de modo que la ecuación 2.2 sea adimensional. Introduciendo la ecuación 2.1 en la ecuación 2.2, se tiene:

$$\Pi = \prod_{i=1}^n \left[\prod_{i=1}^r x_i^{\alpha_{ij}} \right]^{k_j} \text{ (Ec.2.3)}$$

La ecuación 2.3 también se la puede escribir de la siguiente manera:

$$\Pi = \prod_{i=1}^r x_i^{\left[\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} K_j \right]} \text{ Ec.2.4}$$

Para un mejor entendimiento de las ecuaciones 2.3 y 2.4, a continuación se presenta un ejemplo, siendo $n=r=2$:

$$\Pi = X_1^{K_1} * X_2^{K_2}$$

$$X_1 = x_1^{\alpha_{11}} * x_2^{\alpha_{21}}$$

$$X_2 = x_1^{\alpha_{12}} * x_2^{\alpha_{22}}$$

Aplicando la ecuación 2.3

$$\Pi = (x_1^{\alpha_{11}} * x_2^{\alpha_{21}})^{K_1} (x_1^{\alpha_{12}} * x_2^{\alpha_{22}})^{K_2}$$

Desarrollando la ecuación anterior obtenemos como resultado lo formulado por la ecuación 2.4:

$$\Pi = x_1^{\alpha_{11}K_1 + \alpha_{12}K_2} x_2^{\alpha_{21}K_1 + \alpha_{22}K_2}$$

Como es conocido, los productos contenidos en la ecuación 2.4 son adimensionales, por lo tanto su fórmula dimensional es 1, lo que implica que sus componentes sean nulos.

De donde:

$$\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} k_j = 0 \text{ (Ec. 2.5)}$$

Por lo tanto la ecuación 2.5, contiene r ecuaciones lineales homogéneas para los exponentes desconocidos k_j .

De esta manera las ecuaciones se pueden plantear, ya que los α_{ij} , son precisamente los coeficientes de la matriz dimensional de las variables.

2.1.2 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA EL ESTUDIO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA

2.1.2.1 Aplicación Del Análisis Dimensional Para El Estudio De Socavación En El Salto En Esquí

La determinación de los parámetros adimensionales característicos, se lo hace a través del análisis dimensional, para lo cual se consideran las variables geométricas, cinemáticas y dinámicas que intervienen en este fenómeno.

a) Variables geométricas:

φ = ángulo de salida del chorro

y_s = profundidad de socavación

d = diámetro del material

H = desnivel de agua existente desde el inicio del túnel de desvío, hasta aguas abajo del impacto del chorro

b) Variables Cinemáticas:

q = Caudal unitario

c) Variables Dinámicas

γ = peso específico del agua

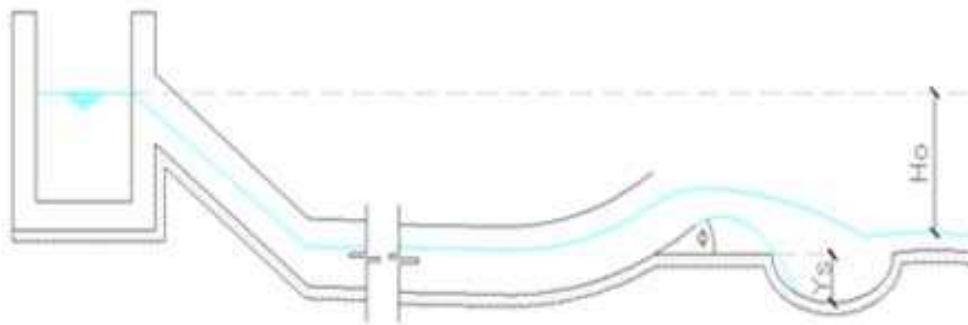
γ_s = peso específico del material

g = gravedad

En el grafico 2.1, se puede observar algunas de las variables geométricas:

GRÁFICO 2.1

VARIABLES GEOMÉTRICAS EN EL DISIPADOR EN ESQUÍ



Elaboracion: Fernando Ortega

Del Teorema de Vaschy-Buckingham se puede plantear:

$$0 = f(\varphi, y_s, d, H, q, \gamma, \gamma_s, g)$$

Reduciendo las variables a sus componentes dimensionales, se tiene:

$$\varphi = \text{adimensional}; \quad y_s = L; \quad d = L; \quad H = L; \quad q = L^2T^{-1}; \quad \gamma = ML^{-3}; \quad \gamma_s = ML^{-3}; \quad g = LT^{-2}$$

El ángulo de salida del chorro definido por φ es fijo, mantiene una posición constante, por lo tanto se lo excluye del análisis dimensional.

Para el análisis dimensional se considera a las variables (y_s, H, γ_s, q) como básicas y a las variables (d, g, γ) como repetitivas.

De la ecuación 2.1, obtenemos la siguiente matriz:

	1	2	3	4	5	6	7
	y_s	H	γ_s	q	D	g	γ
M	0	0	1	0	0	0	1
L	1	1	-3	2	1	1	-3
T	0	0	0	-1	0	-2	0

Aplicando el teorema de Buckingham, la ecuación general se expresa como:

$$0 = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4)$$

Se resuelve el sistema, despejando las constantes de las variables repetitivas en función de las constantes de las variables básicas, y se obtiene:

	1	2	3	4	5	6	7
	y_s	H	γ_s	q	D	G	γ
Π_1	1	0	0	0	-1	0	0
Π_2	0	1	0	0	-1	0	0
Π_3	0	0	1	0	0	0	-1
Π_4	0	0	0	1	-3/2	-1/2	0

Por lo tanto:

$$\Pi_1 = y_s \cdot d^{-1} = \frac{y_s}{d}$$

$$\Pi_2 = H \cdot d^{-1} = \frac{H}{d}$$

$$\Pi_3 = \gamma_s \cdot \gamma^{-1} = \frac{\gamma_s}{\gamma}$$

$$\Pi_4 = q \cdot d^{-3/2} \cdot g^{-1/2} = \frac{q}{d^{3/2} \cdot g^{1/2}}$$

De lo que resulta:

$$0 = f_1 \left(\frac{y_s}{d}, \frac{H}{d}, \frac{\gamma_s}{\gamma}, \frac{q}{d^{3/2} \cdot g^{1/2}} \right) \quad (\text{Ec.2.6})$$

La relación $\frac{y_s}{\gamma}$ puede ser eliminada debido a que es una relación constante dependiendo del material.

Por lo tanto se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{y_s}{d} = f_2 \left(\frac{H}{d}, \frac{q}{d^{3/2} \cdot g^{1/2}} \right) \quad (\text{Ec.2.7})$$

O lo que es igual:

$$\frac{y_s}{d} = f_2 \left(\frac{H}{d}, \frac{q}{d\sqrt{dg}} \right) \quad (\text{Ec.2.8})$$

El segundo término de la función (f_2), es el número de Froude del grano.

Por lo tanto de la ecuación 2.8 se deduce, que la máxima profundidad de socavación será función de la carga H , del caudal unitario y del diámetro del material.

2.1.2.2 Aplicación De Análisis Dimensional En El Estudio De La Disipación De Energía

a) Variables geométricas:

R = Radio hidráulico (Área mojada/perímetro mojado)

ΔH = Pérdida de carga energética

Y = Profundidad hidráulica

b) Variables Cinemáticas:

V = Velocidad

c) Variables Dinámicas

μ = viscosidad dinámica

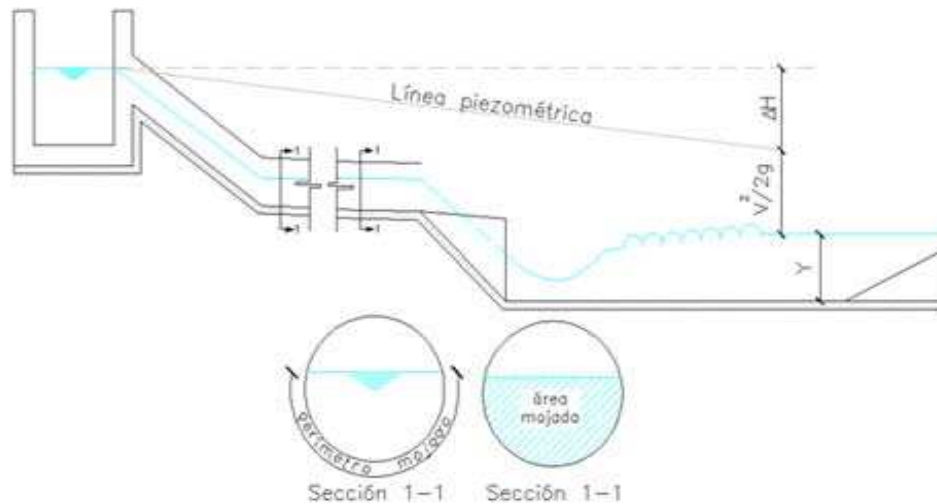
g = aceleración de la gravedad

ρ = densidad del fluido

En el gráfico 2.2 y 2.3, se presenta las variables geométricas, para cada uno de los disipadores en estudio.

GRÁFICO 2.2

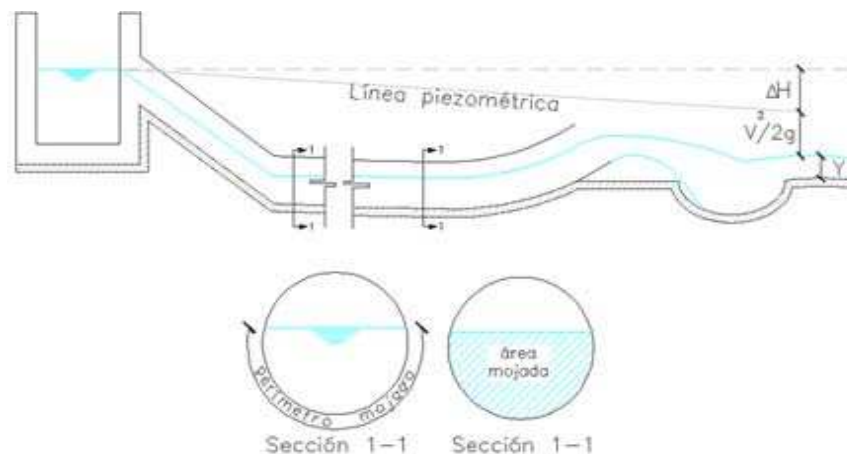
VARIABLES GEOMÉTRICAS QUE INTERVIENEN EN LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN EL DISIPADOR TIPO IV



Elaboración: Fernando Ortega

GRÁFICO 2.3

VARIABLES GEOMÉTRICAS QUE INTERVIENEN EN LA DISIPACIÓN ENERGÉTICA DEL DISIPADOR SALTO EN ESQUÍ



Elaboración: Fernando Ortega N.

Reduciendo las variables a sus componentes dimensionales, tenemos:

$$V = LT^{-1}; R = L; \Delta H = L; \mu = ML^{-1}T^{-1}; g = LT^{-2}; Y = L; \rho = ML^{-3}$$

Para este análisis se considera a las variables (V , R , L , μ) como básicas y a las variables (g , Y , ρ) como repetitivas.

De la ecuación 2.1, se obtiene la siguiente matriz:

1 2 3 4 5 6 7

	V	R	ΔH	M	g	Y	P
M	0	0	0	1	0	0	1
L	1	1	1	-1	1	1	-3
T	-1	0	0	-1	-2	0	0

Aplicando el teorema de Buckingham, la ecuación general se expresa como:

$$0 = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4)$$

Se resuelve el sistema, despejando las constantes de las variables repetitivas en función de las constantes de las variables básicas, y se obtiene:

	1	2	3	4	5	6	7
	V	R	L	M	G	Y	P
Π_1	1	0	0	0	-1/2	-1/2	0
Π_2	0	1	0	0	0	-1	0
Π_3	0	0	1	0	0	-1	0
Π_4	0	0	0	1	-1/2	-3/2	-1

Por lo tanto:

$$\Pi_1 = V \cdot g^{-1/2} \cdot Y^{-1/2} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Y}}$$

$$\Pi_2 = R \cdot Y^{-1} = \frac{R}{Y}$$

$$\Pi_3 = \Delta H \cdot Y^{-1} = \frac{\Delta H}{Y}$$

$$\Pi_4 = \mu \cdot g^{-1/2} \cdot Y^{-3/2} \cdot \rho = \frac{\mu}{g^{1/2} \cdot Y^{3/2} \cdot \rho}$$

Operando:

$$\Pi_4' = \frac{\Pi_1 \cdot \Pi_2}{\Pi_4} = \frac{V \cdot g^{-1/2} \cdot Y^{-1/2} \cdot R \cdot Y^{-1}}{\mu \cdot g^{-1/2} \cdot Y^{-1/2} \cdot Y^{-1} \cdot \rho^{-1}}$$

$$\Pi_4' = \frac{V \cdot R}{\mu \cdot \rho}$$

De lo que resulta:

$$0=f_1\left(\frac{V}{\sqrt{g^*Y}}, \frac{R}{Y}, \frac{\Delta H}{Y}, \frac{V.R}{v}\right) \quad (\text{Ec.2.9})$$

Finalmente se obtiene:

$$\frac{\Delta H}{Y}=f_2\left(\frac{V}{\sqrt{g^*Y}}, \frac{R}{Y}, \frac{V.R}{v}\right) \quad (\text{Ec.2.10})$$

$$\frac{\Delta H}{Y}=f_2\left(\text{Fr}, \frac{R}{Y}, \text{Re}\right) \quad (\text{Ec.2.11})$$

Por lo tanto de la ecuación 2.11 se deduce, que la disipación de energía, será función del número de Froude, del radio hidráulico y del número de Reynolds.

2.1.3 IMPORTANCIA FÍSICA DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES

El significado físico de los parámetros adimensionales, es primordial en la modelación física, a continuación se definirá los parámetros adimensionales que intervienen en la presente investigación, conforme ha resultado del análisis dimensional.

2.1.3.1 Número De Froude

El número de Froude, es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, la gravedad es la fuerza motriz en los escurrimientos a superficie libre, de ahí que en el túnel de desvío y en el dissipador de energía del proyecto hidroeléctrico Sopladora, el número Froude es un parámetro indispensable para definir el comportamiento del flujo.

$$\text{Fr}=\frac{V}{\sqrt{g^*y}} \quad (\text{Ec.2.12})$$

Cuando:

$\text{Fr}<1$, el flujo se encuentra en régimen subcrítico

$\text{Fr} = 1$, el flujo se encuentra en régimen crítico

$\text{Fr} >1$, el flujo se encuentra en régimen supercrítico

En donde:

V = velocidad

g = aceleración de la gravedad

y = profundidad hidráulica

2.1.3.2 Número De Reynolds

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Desde un punto de vista matemático el número de Reynolds de un problema o situación concreta se define por medio de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

En donde:

Re = número de Reynolds

V = velocidad media

D = diámetro

ν = viscosidad cinemática

2.2 LEYES DE SIMILITUD

2.2.1 SIMILITUD GEOMÉTRICA

La similitud geométrica de un modelo, existe, si todas las relaciones de longitud entre modelo y prototipo son constantes. Esta relación es llamada escala del modelo.

$$\lambda_L = \text{constante} = \frac{L_m}{L_n} \quad (\text{Ec 2.14})$$

En donde:

L_n = longitud en la naturaleza o prototipo

L_m = Longitud en el modelo

λ_L = Razón de parámetros longitudinales en el modelo a parámetros longitudinales en la naturaleza.

2.2.2 SIMILITUD CINEMÁTICA

La similitud cinemática requiere que los eventos en el modelo tengan una razón constante con respecto de los eventos en el prototipo.

$$\lambda_t = \text{constante} = \frac{t_m}{t_n} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

En donde:

t_n = Tiempo en la naturaleza o prototipo

t_m = Tiempo en el modelo

λ_t = Razón de tiempo en el modelo a tiempo en la naturaleza

Al hablar de similitud cinemática, el concepto puede extenderse inmediatamente a velocidades y aceleraciones.

2.2.3 SIMILITUD DINÁMICA

La similitud dinámica, es necesaria para lograr que en modelos geoméricamente semejantes, se produzca similitud cinemática. Esta correspondencia está implícita en la relación existente entre fuerzas actuantes y el campo de flujo, expresadas en la ecuación de movimiento.

La similitud dinámica se produce cuando las fuerzas actuantes en el modelo están en relación constante, con las fuerzas del prototipo.

$$\lambda_F = \frac{F_m}{F_n} \quad (\text{Ec 2.16})$$

En donde:

F_n = Fuerzas en la naturaleza o prototipo

F_m = Fuerzas en el modelo

λ_F = Razón de fuerzas en el modelo a fuerzas en la naturaleza

2.2.4 SIMILITUD ABSOLUTA

Una vez que se ha realizado un análisis dimensional correcto y completo de un fenómeno, se encontrará una expresión del tipo:

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots) = 0$$

Debido a que los Π son adimensionales, ellos permanecerán invariables bajo un cambio de unidades y como las magnitudes del modelo pueden interpretarse siempre como un cambio de unidades bajo las escalas ya definidas, para que el funcionamiento del modelo y del prototipo sean similares, se requiere que todos los Π sean iguales respectivamente.

$$\Pi_i'' = \Pi_i' (i=1,2,3,\dots)$$

En donde:

Π_i'' = factor adimensional en el modelo

Π_i' = factor adimensional en el prototipo

En adelante se representará lo concerniente al prototipo precedido de una vez el apóstrofe (') y lo concerniente al modelo precedido de dos veces el apóstrofe ('').

En estas condiciones, modelo y prototipo se encuentran en similitud absoluta.

2.2.5 SIMILITUD RESTRINGIDA Y EFECTOS DE ESCALA

La similitud absoluta por lo general no es factible de forjarse, debido al impedimento de cumplir con todos los factores adimensionales en un mismo modelo. La ventaja al respecto es que no todos estos factores influyen apreciablemente en los resultados de dicha modelación, por lo que es posible pasar por alto aquellos factores adimensionales que no influyen en el análisis y resultados investigados.

Existe también la posibilidad de que fenómenos que son despreciables en el prototipo, influyan significativamente en el modelo, como es el caso de las ondas capilares y de la acción de la tensión superficial, a estos efectos se los conoce como efectos de escala.

2.3 TIPOS DE MODELOS DE ACUERDO A LA LEY DE SIMILITUD

2.3.1 MODELOS EULERIANOS

Los flujos que son dominados exclusivamente por fuerzas de presión e inercia, para los cuales las fuerzas viscosas y de gravedad son despreciables, pueden ser representados por el número de Euler, el mismo que es una función exclusiva de la forma de los contornos por donde circula el flujo. Por lo tanto siempre que el modelo cumpla con la similitud geométrica, el número de Euler asume un valor constante en modelo y prototipo, resultando que este número es independiente del tamaño del modelo, de la velocidad del flujo y de la presión.

Como ejemplo de esto se puede considerar el caso de un elemento fluido de longitud (L) y densidad (ρ), sujeto a una presión diferencial ΔP , y moviéndose con una velocidad (V). La reacción inercial (aceleración de la masa) del elemento puede ser escrita como:

$$F = \left(\frac{V^2}{2L} \right) * (\rho L^3) = \frac{\rho}{2} * V^2 * L^2 \text{ (Ec. 2.17)}$$

Si esta reacción inercial es relacionada con la fuerza de presión actuante ($\Delta p * L^2$) sobre el elemento, se obtiene el número de Euler elevado al cuadrado, así:

$$\frac{\rho}{2} * V^2 * L^2 = \Delta P * L^2$$

$$\frac{\frac{\rho}{2} * V^2}{\Delta P} = 1$$

$$\frac{V^2}{2\Delta P/\rho} = 1$$

$$\frac{V^2}{2\Delta P/\rho} = Eu^2$$

$$Eu = \frac{V}{\sqrt{2\Delta P/\rho}} = \frac{\text{inercial reaction}}{\text{pressure force}} \quad \text{Ec. 2.18}$$

2.3.2 MODELOS DE REYNOLDS

En flujos con una significativa influencia de la viscosidad, los números de Euler y Reynolds, tienen que ser iguales en modelo y prototipo.

De lo que resulta:

$$\lambda_{Re} = 1 \quad (\text{Ec.2.19})$$

Esta ley puede ser satisfecha, si la velocidad en el modelo se selecciona de tal manera que resulte:

$$\lambda_V = \frac{\lambda_v}{\lambda_L} \quad (\text{Ec.2.20})$$

La ecuación 2.20 es consecuencia de la ecuación 2.21, cuando $\lambda_{Re} = 1$

$$\lambda_{Re} = \frac{\lambda_V * \lambda_L}{\lambda_v} \quad (\text{Ec.2.21})$$

Haciendo uso del mismo fluido en modelo y prototipo ($\lambda_v = 1$), en este caso, los modelos de Reynolds se reducen al requerimiento que la escala de velocidades sea igual al inverso de la escala de longitudes, en este caso:

$$\lambda_V = \frac{1}{\lambda_L} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

De este requerimiento resulta, que la velocidad en el modelo será mayor a la del prototipo.

Haciendo uso de la ley de los modelos de Reynolds, cuando $\lambda\rho$ y $\lambda\nu$ son iguales a uno, se derivan varias relaciones, las cuales se presentan en el cuadro 2.1

CUADRO 2.1

RELACIONES ADIMENSIONALES EN MODELOS DE REYNOLDS

PARÁMETRO	RELACIÓN	DENOMINACIÓN
Longitud	$\lambda L = \frac{L_m}{L_n}$	Ec. 2.23
Áreas	$\lambda A = \lambda L^2$	Ec. 2.24
Velocidades	$\lambda V = \lambda L^{-1}$	Ec. 2.25

CUADRO 2.1 CONTINUACIÓN

Tiempo	$\lambda t = \frac{\lambda L}{\lambda V} = \frac{\lambda L}{\frac{1}{\lambda L}} = \lambda L^2$	Ec. 2.26
Caudal	$\lambda Q = \lambda V * \lambda A = \frac{1}{\lambda L} * \lambda L^2 = \lambda L$	Ec. 2.27
Presión	$\lambda P = \lambda \rho * \lambda V^2 = \lambda L^{-2}$	Ec. 2.28
Fuerzas	$\lambda F = \lambda P * \lambda L^2 = 1$	Ec. 2.29
Potencia	$\lambda W = \lambda F * \lambda V = \frac{1}{\lambda L}$	Ec. 2.30

Elaboración: Fernando Ortega

2.3.3 MODELOS DE FROUDE

En los flujos a superficie libre que se encuentran bajo la influencia de la gravedad, se requiere que los números de Euler y Froude sean iguales en modelo y prototipo.

De lo que resulta:

$$\lambda_{Fr}=1 \quad (\text{Ec.2.31})$$

Esta ley puede ser satisfecha, si la velocidad en el modelo se selecciona de tal manera que resulte:

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_g * \lambda_L} \quad (\text{Ec.2.32})$$

La ecuación 2.32, es consecuencia de la ecuación 2.33, cuando $\lambda_{Fr}=1$

$$\lambda_{Fr} = \frac{\lambda_V}{\sqrt{\lambda_g * \lambda_L}} = 1 \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Considerando que la influencia de la gravedad en modelo y prototipo es la misma, ($\lambda_g=1$), en este caso, los modelos de Froude se reducen al requerimiento que la escala de velocidades sea igual a la raíz cuadrada de la escala de longitudes:

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_L} \quad (\text{Ec.2.34})$$

Haciendo uso de la ley de los modelos de Froude, cuando $\lambda_g = 1$, se derivan las relaciones mostradas en el cuadro 2.2:

CUADRO 2.2

RELACIONES ADIMENSIONALES EN MODELOS DE FROUDE

PARÁMETRO	RELACIÓN	DENOMINACIÓN
Longitud	$\lambda L = \frac{L_m}{L_n}$	Ec. 2.35
Áreas	$\lambda A = \lambda L^2$	Ec. 2.36
Velocidades	$\lambda V = \lambda L^{1/2}$	Ec. 2.37
Tiempo	$\lambda t = \frac{\lambda L}{\lambda V} = \frac{\lambda L}{\lambda L^{1/2}} = \lambda L^{1/2}$	Ec. 2.38
Caudal	$\lambda Q = \lambda V * \lambda A = \lambda L^{1/2} * \lambda L^2 = \lambda L^{5/2}$	Ec. 2.39

Elaboración: Fernando Ortega

2.3.4 MODELOS DE FROUDE Y REYNOLDS

En Ingeniería Hidráulica usualmente son estudiados modelos a superficie libre, en los cuales la viscosidad y la rugosidad de los contornos son de importancia. En flujos de canales abiertos del análisis dimensional resulta la siguiente relación:

$$\frac{1}{Eu^2} = f = \phi \left(\frac{k}{R}, Re, Fr \right) \quad \text{Ec.2.40}$$

De la fórmula de Darcy-weisbach tenemos:

$$\Delta h = f^* \frac{L}{4R} * \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec.2.41})$$

$$f = \frac{4R}{L} * \frac{\Delta P}{\rho * V^2 / 2} \quad (\text{Ec.2.42})$$

$$f = \frac{\text{const}}{Eu^2} \quad (\text{Ec.2.43})$$

En donde:

f = coeficiente de pérdidas por fricción de Darcy Weisbach.

Δh = pérdidas de carga de presión

ΔP = pérdidas de presión

De la ecuación 2.43, se deduce que cumpliendo con la similitud geométrica, el parámetro geométrico de flujo caracterizado por el número de Euler, puede ser representado por el coeficiente de pérdidas por fricción de Darcy Weisbach.

De la Ecuación 2.40, se concluye que el factor de fricción de Darcy Weisbach, es función de la rugosidad relativa, del número de Reynolds y del número de Froude.

La dependencia del coeficiente por pérdidas de fricción sobre el número de Reynolds y sobre la rugosidad relativa, está dada por el diagrama de Nikuradse-Moody, el cual es válido para modelo y prototipo. Además en flujo de canales abiertos requieren cumplir con la similitud de acuerdo al criterio de Froude.

Cumplir concomitantemente con el criterio de similitud de Reynolds y Froude, conforme resulta de la ecuación 2.40, conlleva a las siguientes relaciones:

$$\lambda_L * \lambda_V = \lambda_v \quad (\text{Ec.2.22})$$

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_g * \lambda_L} \quad (\text{Ec.2.32})$$

Si el modelo se opera con el mismo fluido y en la tierra, se tiene:

$$\lambda_g = \lambda_v = 1 \quad (\text{Ec.2.44})$$

Reemplazando la Ec.2.44 en las Ec. 2.22 y Ec.2.32, tenemos:

$$\lambda_L * \lambda_V = 1 \quad (\text{Ec.2.45})$$

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_L} \quad (\text{Ec.2.46})$$

De donde surge una paradoja de imposibilidad bajo la forma:

$$\lambda_V = \lambda_L = 1 \quad (\text{Ec.2.47})$$

En flujos a superficie libre, se debe seguir el criterio de similitud de Froude, para lograr una reproducción geométrica a escala de la superficie del agua, esto resulta que en modelos con flujo de agua, el número de Reynolds es menor en modelo que en prototipo, debido a que:

$$\lambda_{Re} = \lambda_L^{3/2} \quad (\text{Ec.2.48})$$

La Ec.2.48, muestra claramente que en pequeños modelos a escala con el criterio de similitud de Froude, las fuerzas viscosas tienen mayor incidencia en el modelo que en la naturaleza. Esta observación perdería importancia, siempre que el flujo esté en régimen turbulento, tanto en la naturaleza como en el modelo, de esta manera cambios en el número de Reynolds no tienen influencia en el coeficiente de pérdidas por fricción, como se puede notar en el diagrama de Nikuradse-Moody. En hidráulica fluvial, el flujo generalmente se encuentra en régimen turbulento (en el orden de magnitud de 1×10^5), condición esencial para aplicar las ecuaciones de Manning o Chezy. Dicho de otra manera, el efecto de las fuerzas viscosas se pierde más allá de un cierto valor de Re_0 , de esta manera es posible reemplazar la ecuación 2.19 por $Re > Re_0$, resultando una nueva ecuación:

$$\lambda_{Re} > \frac{Re_0}{Re} \quad \text{Ec. 2.49}$$

Sin embargo, las condiciones de flujo en modelos a escala no siempre recaen dentro del régimen de flujo turbulento, lo que conlleva a alterar las condiciones de la capa límite y por lo tanto, la influencia de la viscosidad no es escalada correctamente, empero, este efecto puede ser compensado apropiadamente, seleccionando un material con rugosidad adecuada para el modelo, rugosidad que no necesariamente tiene que cumplir con la similitud geométrica, sino que más bien, esta rugosidad debe ser escogida de tal forma que se pueda obtener el mismo coeficiente de pérdidas por fricción (f) en un modelo a escala de acuerdo al

criterio de similitud de Reynolds, que aquel coeficiente que se obtendría bajo las condiciones del prototipo.

De la Ec.2.41, obtenemos la siguiente relación:

$$f = \frac{\Delta h}{L} * \frac{8 * g * R}{V^2} \quad (\text{Ec.2.50})$$

De donde:

$$f = \frac{\Delta h}{L} * \frac{8}{F_r^2} \quad (\text{Ec.2.51})$$

De la Ec.2.51, se puede deducir que en modelos que siguen el criterio de similitud de Froude ($\lambda_{Fr}=1$), el gradiente de energía ($\Delta h/L$), y por lo tanto la pendiente superficial del flujo, es la misma en modelo y prototipo, siempre que, el coeficiente de pérdidas por fricción sea igual en modelo y prototipo. Para cumplir con este objetivo, se requiere que el modelo sea hidráulicamente más liso que el prototipo, o lo que es lo mismo, se requiere valores más pequeños de (k/R) en modelo que en la naturaleza. Esta compensación de los efectos de la viscosidad y de la rugosidad, solamente pueden realizarse dentro de un rango límite de escalas del modelo.

Con una selección apropiada de la rugosidad en el modelo, es posible simular correctamente los efectos combinados de la viscosidad y de la rugosidad en un modelo con el criterio de similitud de Froude, aunque los efectos de la viscosidad y de la rugosidad no puedan ser modelados correctamente en forma individual. De esta manera es posible obtener condiciones de similitud apropiada, en la superficie del flujo y de los gradientes de energía en canales abiertos, esta idea es la esencia de la similitud en modelos con influencia de la viscosidad y gravedad.

Mediante un proceso llamado calibración, que consiste en tantear con distintas rugosidades, para diferentes caudales, es posible refinar la rugosidad adoptada y conocer las condiciones de los efectos de escala.

2.4 LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

Los modelos hidráulicos están sometidos a ciertos límites en sus dimensiones, el límite superior obedece a condiciones de espacio en el laboratorio, capacidad de las bombas, entre otras y el límite inferior a las condiciones de similitud.

2.4.1 LIMITACIÓN POR EFECTOS DE LA VISCOSIDAD

El límite inferior referente al tamaño del modelo está dado por el inadecuado efecto de la viscosidad en modelos demasiado pequeños. En general el requerimiento es que el número de Reynolds en el modelo se mantenga lo suficientemente grande, para asegurar condiciones de turbulencia cuando el flujo en la naturaleza también es turbulento.

Reemplazando la Ec.2.48 en la Ec.2.49, se obtiene una relación que limita el tamaño del modelo para asegurar condiciones de turbulencia en el modelo.

$$\lambda_L > \left[\frac{Re_o}{Re} \right]^{2/3} \quad (\text{Ec.2.52})$$

2.4.2 LIMITACIÓN POR EFECTOS DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL

Otra limitación es dada por la influencia de la tensión superficial. En problemas de Ingeniería Hidráulica, el número de Weber en la naturaleza es por lo general suficientemente grande, de tal modo que la influencia de la tensión superficial puede ser despreciable, lo cual no necesariamente sucede en los modelos. A partir de una comparación entre la velocidad de propagación de ondas de gravedad y ondas de capilaridad, se puede derivar el postulado que la profundidad de agua de varios centímetros debería mantenerse siempre. De la experiencia se conoce un límite inferior alrededor de tres centímetros, el cual es convencionalmente usado, sin embargo, por la presencia de sedimentos en el modelo, la tensión superficial puede ser drásticamente reducida y así el número de Weber puede aumentar.

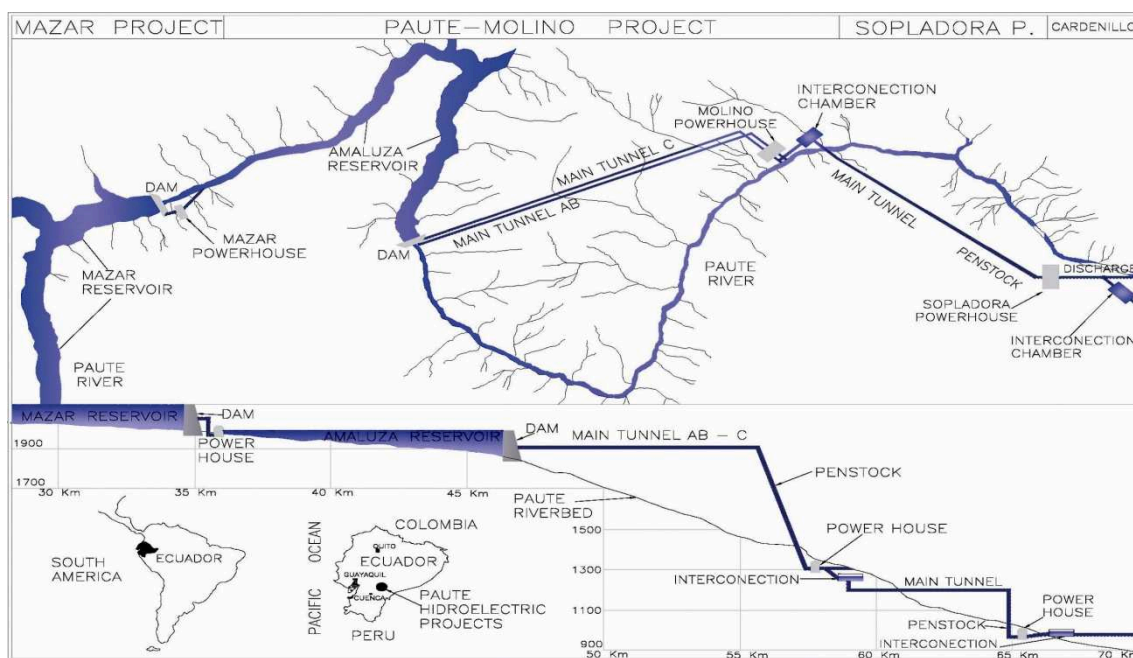
Para modelos de grandes escalas, las consideraciones de la tensión superficial, requieren la selección de escalas verticales menores a las escalas horizontales, en estos casos los modelos son distorsionados verticalmente, lo cual no es parte de esta investigación.

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN FÍSICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA

FIGURA 3.1

ESQUEMA DEL PROYECTO SOPLADORA



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

El desarrollo del proyecto hidroeléctrico Sopladora aprovechará un salto bruto de 385.52 m, en el río Paute, entre las elevaciones 1314,07 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 inicial 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.

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 recomendaron la instalación de tres unidades generadoras tipo Francis, de 50 m³/s, cada una, y una altura neta de 362.56 m. La potencia instalada de la central será 487 MW y aportará anualmente 2.745 GWh al Sistema Nacional Interconectado.

Las denominadas “Obras de Interconexión” conectan hidráulicamente las Centrales Hidroeléctricas Paute - Molino y Sopladora. La difícil topografía de la zona y las condiciones geológicas del cauce no han permitido el diseño de una pequeña presa, que hubiese independizado la operación de estas centrales en cascada. Una ventaja de la conexión directa en cambio es que se asegura que la calidad de las aguas se mantenga, 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, con cierta flexibilidad necesaria durante las maniobras de operación.

Posterior a las obras de interconexión empieza el “Túnel de Descarga Intermedia”, que entregará sus aguas al río Paute y que trabajando conjuntamente con los vertederos de los túneles de descarga de la Central Molino permitirá que éste aprovechamiento continúe funcionando normalmente, a pesar 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, que pudiera ocurrir en el sector de la casa de máquinas de la central Molino, se prevé la construcción del “Túnel de Desvío” del río Paute.

FIGURA 3.2

ESQUEMA DE UBICACIÓN DE TÚNELES DE DESVÍO Y DESCARGA INTERMEDIA



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

Para fines de la modelación física, al proyecto sopladora se lo ha dividido en dos partes, Proyecto Sopladora uno y dos, la primera parte corresponde a las obras de interconexión de las centrales Molino-Sopladora y la segunda parte corresponde al túnel de descarga intermedia y túnel de desvío, cada una de estas partes han sido modeladas en diferentes laboratorios constituyéndose en dos modelos diferentes. En el presente trabajo se analizará el modelo físico del proyecto Sopladora Dos y concretamente el Túnel de Desvío, debido a que el dissipador de energía se encuentra localizado al final de este túnel.

Según la información entregada por el Consorcio Gerencia Mazar (Diseñadores del proyecto Sopladora), el caudal de diseño Q_d utilizado para el dimensionamiento del túnel es igual a $1130 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al caudal de crecida con un período de retorno de 10 años, afectado por el resultado de 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.

No se ha considerado necesario adoptar un caudal con período de retorno mayor. 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 de desvío y las centrales Molino y Sopladora podrían continuar operando normalmente.

Para llevar a cabo la investigación en el modelo físico del Proyecto Hidroeléctrico Sopladora Dos, se ha realizado pruebas con la geometría de las estructuras con una serie de cinco caudales ($100 \text{ m}^3/\text{s}$, $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $500 \text{ m}^3/\text{s}$, $800 \text{ m}^3/\text{s}$, $1130 \text{ m}^3/\text{s}$), los mismos que están referidos al prototipo.

El objetivo principal de la modelación física en el túnel de desvío es optimizar la geometría y comprobar que el funcionamiento del mencionado túnel sea eficiente y adecuado.

Para cumplir con el objetivo propuesto, los diseñadores del proyecto hidroeléctrico Sopladora (Consortio Gerencia Mazar), basándose en un estudio hidrológico, la simulación de los embalses Amaluza y Mazar y la simulación numérica de los transitorios hidráulicos, han entregado una serie de cinco caudales a ser ensayados en el túnel de desvío. ($100 \text{ m}^3/\text{s}$, $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $500 \text{ m}^3/\text{s}$, $800 \text{ m}^3/\text{s}$, $1130 \text{ m}^3/\text{s}$).

Las principales metas de la investigación en el modelo han sido las siguientes (Ref.7):

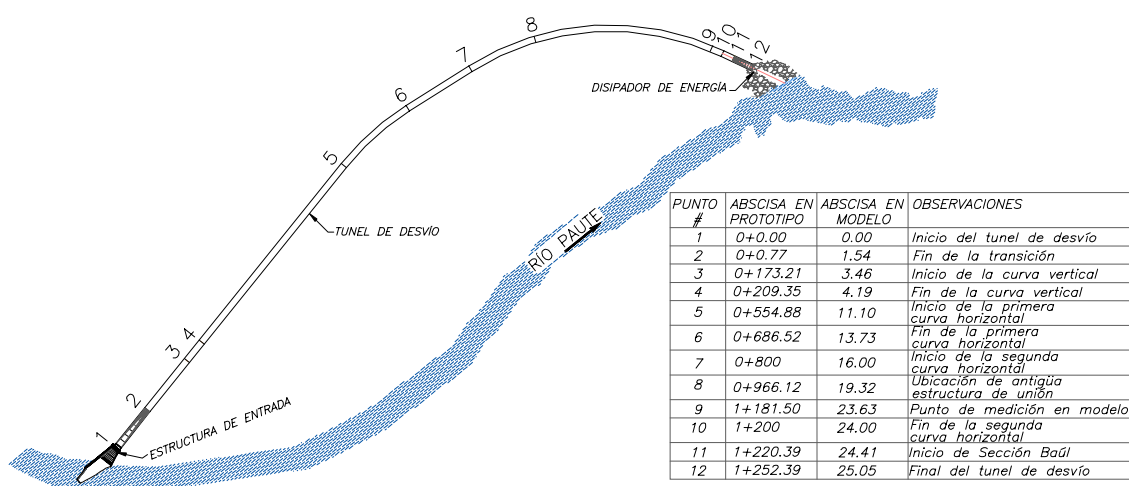
- a) Verificar la eficiencia hidráulica global de las estructuras diseñadas
- b) Verificar y optimizar la geometría y las condiciones de aproximación y de contorno de las estructuras por donde vierte y transita la serie de caudales del túnel de desvío entregada por el consorcio diseñador CGM
- c) Verificar y optimizar la operación del túnel bajo la serie de caudales de ingreso, así como determinar los niveles y condiciones dinámicas (profundidades de agua y velocidades) para la serie de caudales a la salida de la estructura
- d) Analizar el tránsito de los caudales bajo diferentes escenarios de operación de las centrales Paute - Molino y Sopladora

- e) Verificar si se presentan fenómenos de cavitación a lo largo del túnel, debido a la gran velocidad que posee el flujo
- f) Verificar el funcionamiento hidráulico, con flujo a superficie libre y en régimen supercrítico, en todo el tramo del túnel de desvío
- g) Verificar el funcionamiento hidráulico y optimizar la configuración geométrica del vertedero de la descarga intermedia, del cimacio recolector de transición y del túnel de la descarga intermedia que se conecta con el túnel de desvío
- h) Analizar las variaciones del nivel de la superficie libre del agua para garantizar la descarga efectiva y eficiente de agua a la salida
- i) Verificar la presencia de resalto hidráulico en los cambios de pendiente del túnel de desvío y de la descarga intermedia
- j) Estudiar el funcionamiento de las obras de dissipación propuestas y optimizar su diseño. ¹

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL TÚNEL DE DESVÍO:

GRAFICO 3.1

ESQUEMA TÚNEL DE DESVÍO CONFORME A DISEÑO PRELIMINAR A LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.



Elaboración: Fernando Ortega

¹Información sobre las obras de dissipación, previo al presente proyecto, podemos encontrar en la referencia 5

La investigación en el modelo físico del proyecto Sopladora dos, se ha llevado a cabo en tres fases, en cada una de estas fases, se ha realizado el estudio del comportamiento del flujo a lo largo del túnel de desvío, con los resultados de la investigación en cada fase se ha realizado diversas modificaciones en el modelo, hasta conseguir las mejores condiciones de flujo.

Las modificaciones en cada una de las fases podemos encontrar en la Ref.3. En el presente trabajo se menciona el estado original y definitivo de la geometría del túnel de desvío, como un antecedente a la presente investigación.

El túnel de desvío está conformado por los siguientes elementos:

- a) Estructura de derivación o entrada
- b) Conducción principal en el túnel
- c) Disipador de energía y estructura de entrega

a) Estructura de derivación o entrada:

El propósito de esta estructura es el de proporcionar un patrón de flujo adecuado, para que el agua ingrese y aumente paulatinamente su velocidad antes del portal del túnel. Está conformada por una transición que sirve para empatar el tramo inicial de la estructura y la sección transversal del túnel.

Con respecto del diseño original, en el diseño definitivo se ha modificado la geometría del estribo derecho, se ha incrementado una plataforma de aproximación y se ha cambiado la sección de ingreso de circular de 9.20m de diámetro a una cuadrada de 10mx10m.

En la figura 3.3, es posible observar el estado original y definitivo de la estructura de entrada.

FIGURA 3.3

ESTADO ORIGINAL Y DEFINITIVO DE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

Conducción principal en el túnel de desvío

Originalmente la conducción principal estaba conformada por un primer tramo de 172.0m, de sección circular con 9.2m de diámetro y una pendiente del 18%.

El segundo tramo de longitud 1068m, de sección circular de 9m de diámetro, comprendía una curva vertical de 230m de radio y dos curvas horizontales la primera de 400m de radio y la segunda de 300m. A 39.60m antes del inicio de la segunda curva horizontal constaba una estructura de unión (Ver fig.3.5) entre el túnel de descarga intermedia y el túnel de desvío.

La abscisa final del túnel de desvío en el diseño original es la 1+212.34.

En el diseño definitivo el túnel de desvío ha sufrido algunas modificaciones, resultando de la siguiente manera:

Un primer tramo, conformado por una transición que une la sección cuadrada de ingreso de 10mx10, con la sección circular del túnel de 9m de diámetro, en una longitud de 77m y pendiente del 18%, seguido de un tramo recto de sección circular de 9m de diámetro, pendiente del 18% y una longitud de 123.0m. La longitud total del primer tramo resulta de 200.0m, incremento con respecto al primer tramo del diseño original que obedece a una reducción de la cota de salida del túnel de desvío.

Un segundo tramo de longitud 1020.39m, de sección circular de 9m de diámetro y pendiente del 2%, comprende una curva vertical de 230m de radio y dos curvas horizontales de 400m de radio. Se elimina la estructura de unión.

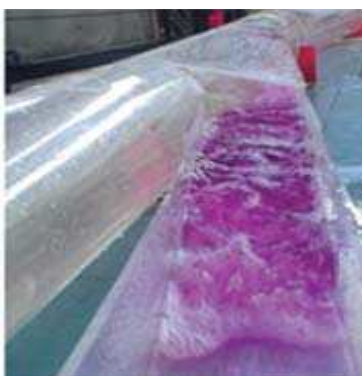
Un tercer tramo de 32m de longitud, que corresponde a una transición de sección circular de 9m de diámetro a sección tipo baúl de 9m de base, con pendiente del 2%.

La abscisa final del túnel de desvío en el diseño definitivo es la 1+252.39, incremento que se debe al descenso del nivel de salida y al aumento del radio de la segunda curva horizontal.

Además se incluye una ranura o ventana de aireación en el primer tramo, con la finalidad de garantizar ingreso de caudal de aire necesario para ventilar todo el túnel y garantizar un flujo a superficie libre.

FIGURA 3.4

FLUJO EN LA ESTRUCTURA DE UNIÓN DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DESCARGA INTERMEDIA



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

b) Disipador de energía y estructura de entrega

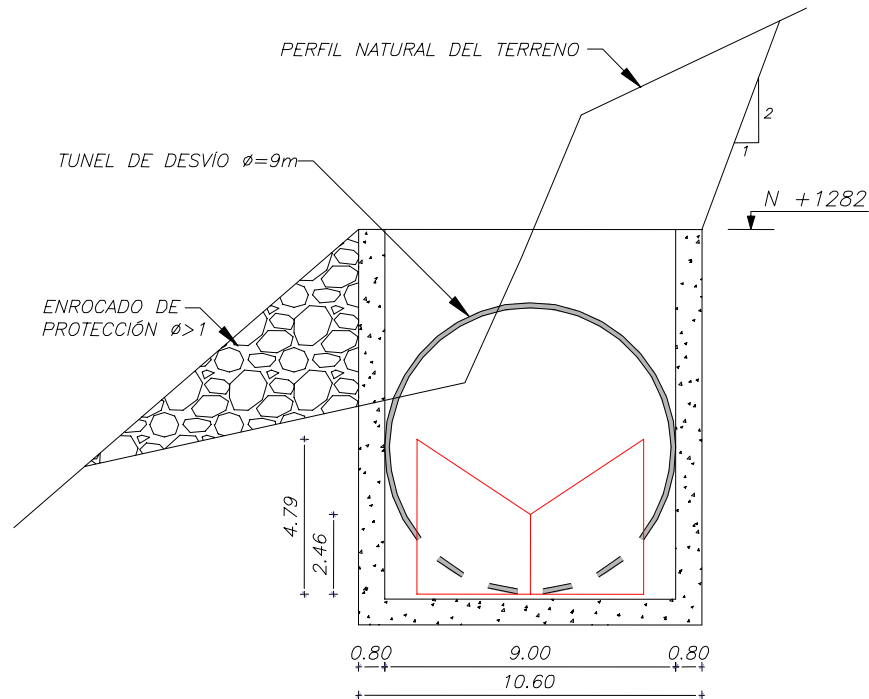
En la abscisa 1+200, se ha dispuesto la estructura de disipación de energía, previo la entrega del flujo al cauce natural. Los objetivos de este elemento son:

- a) Controlar el efecto de erosión o socavación, en la zona de restitución del agua al cauce natural.
- b) Lograr un régimen de circulación del flujo hacia aguas abajo estable.

El dissipador de energía es tipo Kumin, el mismo que será ensayado en el modelo físico, presenta una configuración geométrica algo compleja y compacta.

FIGURA 3.5

ESQUEMA DE DISIPADOR TIPO KUMIN (VISTA FRONTAL)



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

Elaboración: Fernando Ortega N.

FIGURA 3.6

MODELO DE DISIPADOR TIPO KUMIN



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

A pesar de las recomendaciones de la literatura técnica del uso de estructuras Kumin para flujos con rangos del número de Froude entre 2.5 y 10, que abarca a los números de Froude del flujo de aproximación al dissipador en el túnel de desvío del proyecto Sopladora, que varían de 2 a 3.5, el comportamiento del dissipador tipo Kumin ha resultado inapropiado, ha ocasionado un embalse en el túnel de desvío aguas arriba de la estructura tipo Kumin, el porcentaje de disipación ha resultado de orden del 50% para los caudales bajos y del 30% para los caudales altos, posteriormente se aumenta la altura del dissipador Kumin resultando un embalse aún mayor al inicial. Finalmente se considera eliminar el dissipador con lo que se evita el embalsamiento pero se mantiene una alta energía en el flujo que ocasiona socavación aguas abajo.

Por tales resultados se concluye, en la necesidad de ampliar la investigación referente a la disipación de energía, previo a la descarga del flujo del túnel de desvío en el Río Paute, de donde nace la necesidad de la presente investigación.

3.2 APLICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS TEÓRICOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA, EN EL TÚNEL DE DESVÍO

Conforme a lo estudiado en el capítulo dos, se conoce que el túnel de desvío corresponde a los modelos que deben cumplir con los criterios de similitud de Froude y Reynolds en forma simultánea, en este estudio se ha conocido que para cumplir con este objetivo es necesario escoger el material para el modelo de tal manera que la rugosidad sea adecuada para compensar los efectos de la viscosidad, así como también que la escala del modelo sea suficientemente grande para asegurar condiciones de turbulencia en modelo cuando también existe en prototipo.

Para conocer y comparar los resultados del flujo en análisis en base a la compensación de la rugosidad de materiales de modelo y prototipo, es necesario llevar a cabo el proceso de calibración.

3.2.1 PROCESO DE CALIBRACIÓN

El proceso de calibración en el modelo del proyecto hidroeléctrico Sopladora, se ha llevado a cabo partiendo de mediciones realizadas² en el túnel de desvío de dicho modelo para un caudal de $0.028\text{m}^3/\text{s}$ que equivale a $498.51\text{m}^3/\text{s}$ en prototipo. Promediando los resultados en diferentes secciones, se ha obtenido los siguientes resultados:

Área mojada promedio del modelo = 112 cm^2

Perímetro mojado promedio del modelo = 26.60 cm

Área mojado promedio del prototipo = 280341 cm^2

Perímetro mojado promedio del prototipo = 1329.60 cm

Velocidad promedio en el modelo = 254.13 cm/s

Velocidad promedio en el prototipo = 1797 cm/s

Obtenemos el radio hidráulico:

$$R_{hm} = \frac{A_{mm}}{P_{mm}} = \frac{112}{26.60} = 4.21\text{m}$$

$$R_{hp} = \frac{A_{mp}}{P_{mp}} = \frac{280341}{1329.60} = 210.8\text{ m}$$

Partiendo de la información anterior se procede a determinar, el número de Reynolds en modelo y prototipo, y la rugosidad relativa en modelo y prototipo, para luego con estos resultados ingresar al diagrama de Moody y así conocer el factor de fricción en ambos casos.

$$Re_m = \frac{V * 4R_h}{\nu} = \frac{254.13 * 4 * 4.21}{0.01} = 4.30E5$$

$$Re_p = \frac{V * 4R_h}{\nu} = \frac{1797 * 4 * 210.8}{0.01} = 1.51E8$$

Adoptando el uso de acrílico como material del túnel de desvío en el modelo y hormigón para el prototipo, se calcula la rugosidad efectiva:

$$\epsilon_{\text{hormigón}} = 0.6\text{mm}$$

$$\epsilon_{\text{acrílico}} = 0.0015\text{mm}$$

$$\text{Rugosidad}_{em} = \frac{\epsilon_{acr.}}{4R_h} = \frac{0.0015}{4 * 4.21} = 0.00009$$

²Los resultados de las mediciones han sido tomados del informe primera fase del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011), pag 80.

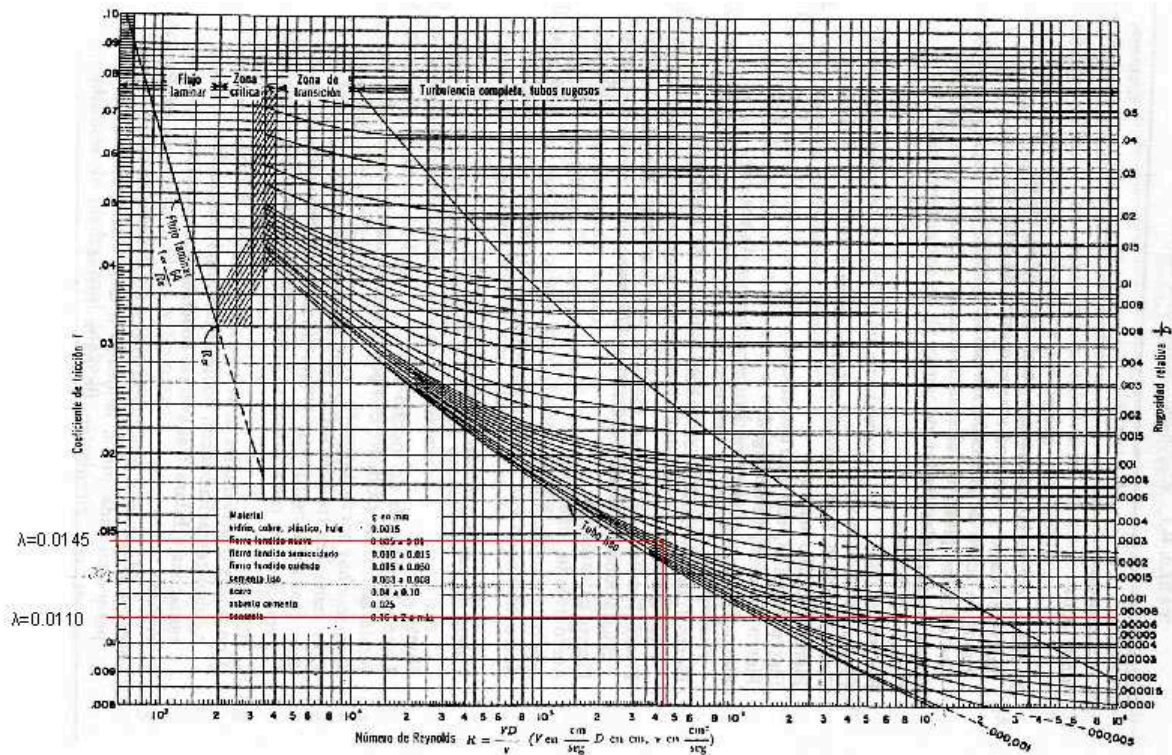
$$\text{Rugosidad}_{ep} = \frac{\varepsilon_h}{4R_h} = \frac{0.06}{4 \cdot 210.80} = 0.00007$$

En donde: Todos los símbolos que llevan el subíndice (m) se refieren al modelo y los del subíndice (p) al prototipo.

En la figura 3.7, se presenta el diagrama de Moody, con los resultados del factor de fricción obtenidos para modelo y prototipo, en base a la información presentada anteriormente.

FIGURA 3.7

DIAGRAMA DE MOODY



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

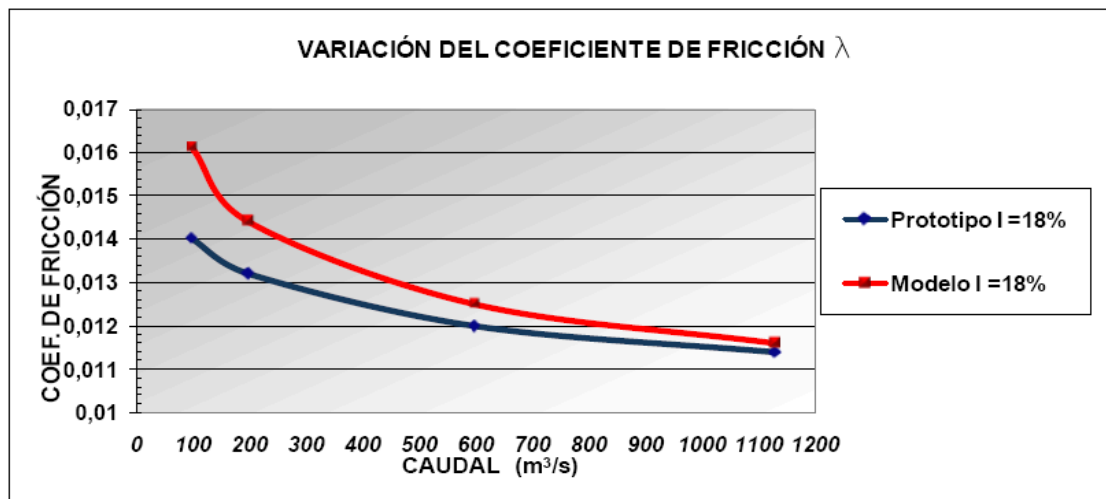
Como se puede observar en la figura 3.8, el factor de fricción obtenido para modelo y prototipo ha sido:

$$\lambda_p = 0.0145$$

$$\lambda_m = 0.011$$

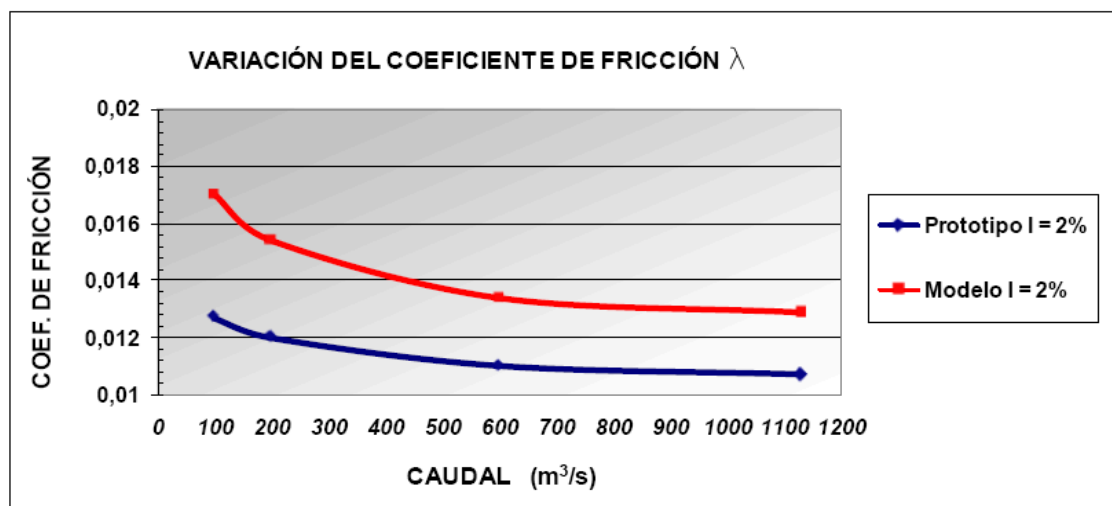
Para conceptualizar más claramente el efecto del factor de fricción, en las figuras 3.8 y 3.9, se presenta una curva de caudal Vs coeficiente de fricción para dos diferentes pendientes.

FIGURA 3.8



Fuente: Informe fase uno del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica sopladora, EPN, 2009.

FIGURA 3.9



Fuente: Informe fase uno del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica sopladora, EPN, 2009.

De las figuras 3.8 y 3.9, se puede concluir que el coeficiente de fricción varía de modelo a prototipo, en mayor cantidad para caudales bajos y en menor medida para caudales altos, además que esta variación es más acentuada en pendientes

bajas, situación que es necesario tomarla en consideración al momento de analizar los resultados.

3.2.2 ANÁLISIS DE LA ESCALA DEL MODELO

En base a las condiciones de la desigualdad (Ec.2.52), se ha realizado un análisis de la escala adoptada en el modelo físico del proyecto hidroeléctrico Sopladora.

En el presente análisis, para obtener el número de Reynolds en el prototipo, se ha partido de la información extraída de los aforos en modelo físico extrapolados al prototipo, conforme se presenta en la cuadro 3.1

CUADRO 3.1

RESUMEN DE AFOROS TOMADOS EN LA ABSCISA 23.43³ DEL MODELO, EXTRAPOLADOS AL PROTOTIPO

$Q_{\text{prototipo}}$ (m ³ /s)	Calado (y)	V (m/s)
100	2.1175	9.6
200	2.755	15
500	4.6	18.56
800	5.565	20.73
1130	7.585	20.49

Fuente: Informe fase uno del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica sopladora, EPN, 2009

Elaborado Por: Fernando Ortega N.

$$Re' = \frac{V \cdot 4R}{\nu}$$

³ La abscisa 23.43, está próxima a la ubicación del dissipador de energía, en el plano 4.1 es posible visualizar su ubicación en el modelo.

Para el caudal en prototipo de 1130 m³/s:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{57.23}{20.93} = 2.73$$

$$Re' = \frac{20.49 \cdot 4 \cdot 2.73}{1 \times 10^{-6}} = 22.4 \times 10^7$$

$$\lambda L \geq \left[\frac{Re_o}{Re'} \right]^{\frac{2}{3}}$$

Considerando un valor de Re_o de 1×10^5 .

$$\lambda L \geq \left[\frac{1 \times 10^5}{22.4 \times 10^7} \right]^{\frac{2}{3}}$$

$$\lambda L \geq 0.006$$

La escala adoptada ha sido $\lambda L = \frac{1}{50} = 0.02$

Como $0.02 > 0.006$, la escala adoptada es satisfactoria para el caudal de $1130 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para el caudal en prototipo de 100 m³/s:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{11.41}{9.1157} = 1.25$$

$$Re' = \frac{9.60 \cdot 4 \cdot 1.25}{1 \times 10^{-6}} = 4.8 \times 10^7$$

$$\lambda L \geq \left[\frac{Re_o}{Re'} \right]^{\frac{2}{3}}$$

$$\lambda L \geq \left[\frac{1 \times 10^5}{4.8 \times 10^7} \right]^{\frac{2}{3}}$$

$$\lambda L \geq 0.016$$

Como $0.02 > 0.016$, la escala adoptada también es satisfactoria para el caudal en prototipo de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ y por lo tanto para todos los demás caudales en análisis.

3.3 CONDICIONES DE FLUJO EN EL TÚNEL DE DESVÍO

Tanto en el diseño original como definitivo, el flujo en el tramo inmediato aguas abajo de la estructura de entrada, se desarrolla libre con la pendiente del 18%. La superficie del agua aparece estable y las ondas o perturbaciones que se generan por la geometría de la estructura de entrada rápidamente desaparecen, de tal manera que luego de la transición se observa un flujo rápido, uniformemente distribuido que llega a la primera curva vertical con un calado contraído, menor que la profundidad normal calculada para la pendiente del 2%.

En el tramo del túnel de desvío que va desde la curva vertical hasta un punto inmediatamente aguas arriba de la estructura de unión, e involucra a la primera curva en planta, existe una tendencia de perfiles crecientes que tratan de llegar hasta la respectiva profundidad normal. En este tramo es posible observar ondas cruzadas considerables, a pesar que el número de curva resulta inferior a 1.5 para todas estas curvas, de lo que teóricamente se considera a dichas curvas como débiles y el efecto de generación de ondas cruzadas debería ser de menor importancia.

En la estructura de unión (Ver Figura 3.5), por efecto de esta misma estructura se genera una gran onda que se proyecta hacia aguas abajo, además se produce una obstrucción para caudales altos que limita la capacidad hidráulica de túnel y ocasiona una gran perturbación en el flujo hacia aguas abajo.

El flujo de salida de la estructura de unión es bastante desordenado y presenta mayor cantidad de ondas con amplitudes mayores, las mismas que inmediatamente ingresan en la segunda curvatura en planta del túnel, donde se mantienen y tienden levemente a reducirse en el tramo recto final, antes de llegar a la estructura de disipación de energía en la salida del túnel. La longitud de este último tramo recto no es suficiente para uniformizar el flujo rápido. En el flujo observado con la geometría definitiva del túnel de desvío en la que se elimina la estructura de unión, se reduce la amplitud de las ondas observadas aguas abajo de la segunda curvatura, pero aún persiste la presencia de ondas cruzadas y la longitud del último tramo recto aún continúa siendo insuficiente para uniformizar el flujo, inclusive para caudales altos, la presencia de estas ondas provocan una insuficiencia en la sección del túnel en el tramo final.

Las velocidades de flujo son decrecientes en el sentido de flujo. Aguas abajo de la estructura de unión, se observa una disminución mayor de velocidades que en el tramo inicial. Probablemente la fuerte turbulencia generada en la estructura de unión genera una pérdida de energía que justifica la reducción de velocidad observada en el tercer tramo del túnel. Este comportamiento es más acentuado para el rango de caudales medios y altos; y menos importante para los caudales bajos. Con la geometría definitiva la tendencia a la disminución de velocidad se mantiene pero en menor grado, debido a la eliminación de la estructura de unión.

El flujo de aproximación hacia la estructura de disipación no presenta una distribución uniforme en la sección transversal debido a la presencia de fuertes ondulaciones. El control que realiza la estructura de disipación es menor mientras mayores son los caudales de operación. En todos los casos se observa una sobre-elevación asimétrica transversal y longitudinalmente. Posteriormente con la eliminación de la estructura de disipación tipo Kumin, se pierde el efecto de sobre-elevación, pero el flujo continúa irregular, la distribución de velocidades en el flujo de aproximación a la descarga es irregular transversalmente, debido a la presencia de ondas que reducen un tramo de la sección y magnifican otro.

El flujo en el Túnel de Desvío para caudales bajos tiende a ser inestable en toda su longitud, mientras que para caudales medios y altos esta inestabilidad se presenta donde el flujo presenta mayor velocidad.

La presencia de ondas cruzadas en el flujo de aproximación, complican los procesos de disipación y es la posible causa del fracaso de la estructura tipo Kumin, debido a la concentración de flujo hacia un lado al momento del choque del flujo con el Kumin, por este motivo es imprescindible utilizar un tipo de disipador que permita uniformizar el flujo.

CAPÍTULO 4

MODELACIÓN FÍSICA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA

En el numeral 3.1 literal c) del presente documento, se analiza el disipador de energía y estructura de entrega al cauce natural en una investigación preliminar al presente trabajo, en donde se ha estudiado la desembocadura del flujo proveniente del túnel de desvío hacia el cauce natural, previo el paso por una estructura disipadora tipo Kumin y en forma directa sin estructura disipadora. Por los resultados insatisfactorios de este estudio, como ya se mencionó en el mismo numeral 3.1, se concluye la necesidad de ampliar la investigación a nuevas alternativas de disipación. De donde por lo estudiado en el capítulo uno, se concluye la conveniencia de analizar dos tipos de disipadores como son:

- Disipador de energía tipo IV, según la clasificación del Bureau of Reclamation.
- Disipador de energía del tipo Salto en Esquí.

4.1 CRITERIOS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO, PARA LA MODELACIÓN FÍSICA DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA PROPUESTOS A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO EN EL PROYECTO SOPLADORA.

4.1.1 CRITERIOS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION.

De acuerdo con lo mencionado en la sección 1.3.1, el número mínimo de bloques para este tipo de disipador es de tres y el ancho aconsejable es el setenta y cinco por ciento del calado aguas arriba ($0.75D_1$). De las mediciones realizadas en el modelo se conoce, que el calado aguas arriba en la abscisa $(23.63)^4$ es de

⁴ La ubicación de la abscisa se la puede ver en la figura 3.3

4.26cm, 5.17cm, 8.56cm, 11.54cm, 15.17cm, para los caudales referidos al prototipo de $100\text{m}^3/\text{s}$, $200\text{m}^3/\text{s}$, $500\text{m}^3/\text{s}$, $800\text{m}^3/\text{s}$, $1130\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente.

Haciendo un análisis de lo indicado en el párrafo anterior, partiendo de información tomada en el modelo, se puede determinar que colocando tres bloques con un ancho del 40% del calado aguas arriba derivado del caudal más bajo de $100\text{m}^3/\text{s}$ referido al prototipo ($W_1 = 0.40 \cdot 4.26\text{cm}$) y sumando el espaciamiento entre bloques ($2.5 \cdot W_1 \cdot 3$), se acerca al valor de 18cm, que es el ancho en el final del túnel de desvío, en el modelo:

Analíticamente, el análisis anterior resulta⁵:

$$b = 0.40 \cdot 4.26 \cdot 3 + 0.4 \cdot 4.26 \cdot 2.5 \cdot 3 = 17.89 \text{ cm}$$

Labels in the diagram:

- ancho de la cubeta disipadora tipo IV
- 40%
- calado aguas arriba para $Q=100\text{m}^3/\text{s}(D_1)$
- Número de bloques
- factor recomendado
- número de espacios completos

Del análisis anterior se concluye, que para caudales mayores a los $100\text{m}^3/\text{s}$ referidos al prototipo, el ancho de los bloques deberá ser aun inferior al 40% del calado, lo que daría como resultado bloques con un ancho mucho menor al valor aconsejable que es del 75% de D_1 .

De este modo se ha definido la necesidad de aumentar el ancho del túnel de desvío a 36cm consiguiendo así una reducción del calado aguas arriba y cumpliendo de este modo con las sugerencias de diseño.

Con la finalidad de evitar una elevación innecesaria del calado y otros factores adversos, es necesario construir una transición partiendo de una sección circular de 9.0m hasta una sección tipo baúl de 18.0m de ancho⁶ en prototipo. La ubicación de esta transición se la ha definido de tal modo que la abscisa final de esta transición sea favorable para la posterior implantación de la estructura

⁵ Para mejor entendimiento del análisis Ver figura 1.22

⁶ Mayor información sobre transiciones y sus efectos, así como detalles constructivos de la transición en el modelo podemos encontrar en Ref.5

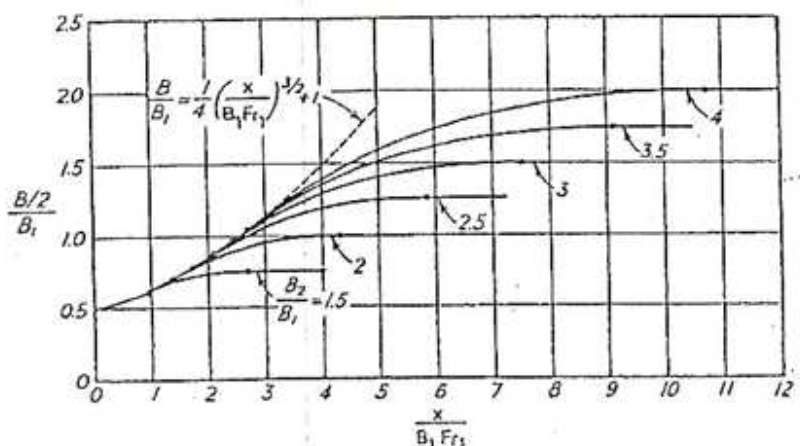
disipadora, alcanzando una distancia prudencial al río, el inicio de esta transición finalmente se ha establecido en la abscisa 1+171.50 en prototipo y su equivalente abscisa en modelo 23.43⁷, de este modo se elimina la transición de sección circular de 9m de diámetro a sección baúl de 9m de ancho, que había sido diseñada en forma preliminar a esta investigación⁸.

Para la determinación de la geometría en prototipo de la transición se ha hecho uso de la teoría de “Ensanchamiento en Canales y Estructuras de Entrega” para flujo supercrítico, cuya filosofía es conseguir eliminar separaciones de flujo y formación de ondas cruzadas en la menor longitud posible. Para el dimensionamiento en el modelo se mantiene la misma escala adoptada en la modelación preliminar la cual ha sido $\lambda L = \frac{1}{50}$.

Haciendo uso de la figura 4.1, es posible obtener los diferentes valores de ancho de sección a lo largo de la transición.

FIGURA 4.1

CURVA DE TRANSICIÓN PARA ENSANCHAMIENTOS ÓPTIMOS DE UN CANAL



Fuente: Hidráulica de canales, Naudascher, 2001

En la figura 4.1:

X = distancia medida con respecto al inicio de la transición.

⁷ La ubicación de esta abscisa se puede evidenciar en la figura 3.3 y 5.3

⁸ Ver ítem 3.1 literal c

B = ancho a la distancia x

B_1 = ancho al inicio de la transición = 9m (prototipo)

Fr_1 = número de Froude al inicio de la transición

Por medio de la figura 4.1, de las mediciones realizadas en modelo en la abscisa 23.63, para un caudal en prototipo de $1130\text{m}^3/\text{s}$, se ha obtenido un calado de 7.585m, una velocidad de 20.49m/s y un número de Froude de 2.38, valores referidos al prototipo, con los que se obtienen los resultados del cuadro 4.1

CUADRO 4.1

RESULTADOS EN PROTOTIPO OBTENIDOS DE LA FIGURA 4.1 PARA EL CASO DE ESTUDIO

x (m)	$x/(B_1 \cdot Fr_1)$ (m)	$(B/2)/B_1$ (m)	$B/2$ (m)	B (m)
0	0	0,5	4,5	9
5	0,23	0,54	4,86	9,72
10	0,47	0,57	5,13	10,26
15	0,7	0,6	5,4	10,8
20	0,93	0,64	5,76	11,52
25	1,17	0,69	6,21	12,42
30	1,4	0,73	6,57	13,14
35	1,63	0,79	7,11	14,22
40	1,87	0,85	7,65	15,3
45	2,1	0,88	7,92	15,84
50	2,33	0,92	8,28	16,56
55	2,57	0,95	8,55	17,1
60	2,8	0,97	8,73	17,46
65	3,03	1,00	9	18

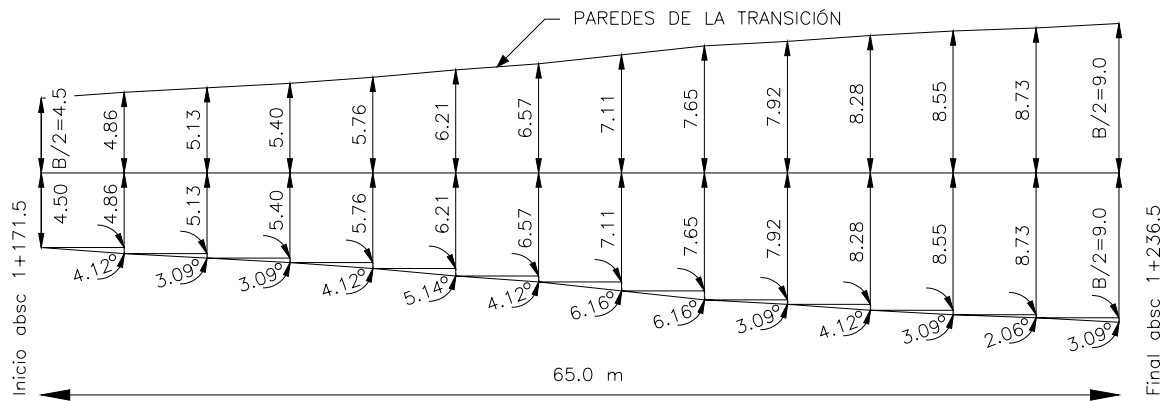
Elaboración: Fernando Ortega.

En el gráfico 4.1 se puede visualizar gráficamente los resultados de la transición observados en el cuadro 4.1.

El diseño del dissipador, se lo ha realizado para un $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$ conforme con lo mencionado al final de la sección en 1.3.3: "Si el cuenco IV, es diseñado para la máxima descarga, este rendirá satisfactoriamente para caudales menores"

GRAFICO 4.1

TRANSICIÓN EN TÚNEL DE DESVÍO REFERIDO AL PROTOTIPO



Elaboración: Fernando Ortega N.

El efecto de las ondas cruzadas por causa de la transición, es otro de los parámetros necesarios que hay controlar en el diseño. Para determinar la magnitud de onda al final de la transición se ha empleado la teoría de “Cambios Graduales de Dirección⁹”.

De esta teoría, resulta las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3. Por medio de la ecuación 4.1, es posible conocer el número de Froude bajo la influencia de las ondas generadas, conocido este valor a través de la Ec.4.2, se obtiene la altura del flujo en cada una de las secciones a lo largo de la transición y finalmente con la Ec.4.3 se determina la inclinación de la onda, este proceso se lo realiza en forma iterativa para diferentes secciones a lo largo de la transición, hasta obtener la altura de flujo y onda al final de esta transición.

$$\theta = \sqrt{3} \arctan \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{Fr^2 - 1}} - \arctan \frac{1}{\sqrt{Fr^2 - 1}} - \theta_1 \quad (\text{Ec.4.1})$$

$$\frac{H_o}{Y} = 1 + \frac{Fr^2}{2} \quad (4.2)$$

⁹Referencia 11

$$\text{Sen}\beta = \frac{1}{Fr} \text{ (Ec.4.3)}$$

En donde de estas ecuaciones tenemos:

θ_1 : constante de integración que representa la condición $\theta = 0$ para $y = y_1$.

Θ = ángulo entre la pared de la transición y una línea de corriente previo a la transición.

Fr = número de Froude

H_o = Carga de energía específica

β = ángulo formado entre una línea de corriente en un punto de la transición con respecto a una línea de corriente en otro punto previo a la transición.

La altura de flujo obtenido con el proceso anterior ha sido de 0.66m y el calado normal calculado para una sección rectangular del mismo ancho es de 3.24, este resultado nos indica que las ondas cruzadas se pierden por completo al final de la transición para las condiciones geométricas y de flujo existentes.

El procedimiento de cálculo completo para obtener la altura de flujo por la formación de ondas, se presenta en anexos numeral 1.0

4.1.1.1 Determinación De Las Características Del Flujo Al Pie Del Escalón

Para determinar la altura del escalón negativo, se ha hecho uso de la teoría presentada por Balkema, Rotterdam, Brookfield en 1995 en el subtema de "Bottom elements – Negative Step Basin" (Ref.12) que dice:

"Para números de Froude menores a 4 ($Fr < 4$) la máxima altura de escalón debe ser limitado para un valor de $S = 2$ "

En Donde $S = \frac{s}{Y_o}$, Siendo s la altura del escalón negativo y Y_o la altura de flujo inmediatamente aguas arriba del escalón.

En base a esta teoría e igualando energías entre un punto inmediatamente aguas arriba del escalón y el pie del resalto hidráulico, se obtiene la altura de flujo al pie del resalto (Y_1)¹⁰:

$$Y_1 = 2.81\text{m}$$

De donde se deriva:

$$V_1 = \frac{1130}{18 \cdot 2.81} = 22.34 \text{ m/s}$$

$$Fr_1 = \frac{22.34}{\sqrt{9.81 \cdot 2.81}} = 4.25$$

4.1.1.2 Determinación Del Cuenco Disipador a Emplearse y Sus Características

El valor del número de Froude (4.25), indica que se encuentra dentro del rango de aplicación del cuenco tipo IV según (Ref.2), el cual se diseña a continuación:

De acuerdo con la figura 1.27 tenemos:

Para el presente caso se diseñará con 3 bloques deflectores.

Ancho de los bloques deflectores = $w = 0.7 \cdot y_1 = 0.7 \cdot 2.81 = 1.967 \text{ m} \approx 1.95 \text{ m}$

Altura de los bloques deflectores = $2 \cdot y_1 = 2 \cdot 2.81 = 5.62 \text{ m} \approx 5.60 \text{ m}$

Largo de la parte superior de los bloques deflectores = $2 \cdot y_1 = 2 \cdot 2.81 = 5.62 \text{ m} \approx 5.60 \text{ m}$.

Espaciamiento entre bloques deflectores = $2.5 \cdot w = 2.5 \cdot 1.95 = 4.88 \approx 4.85 \text{ m}$

Distancia entre bloques deflectores y muros de ala = 1.22 m

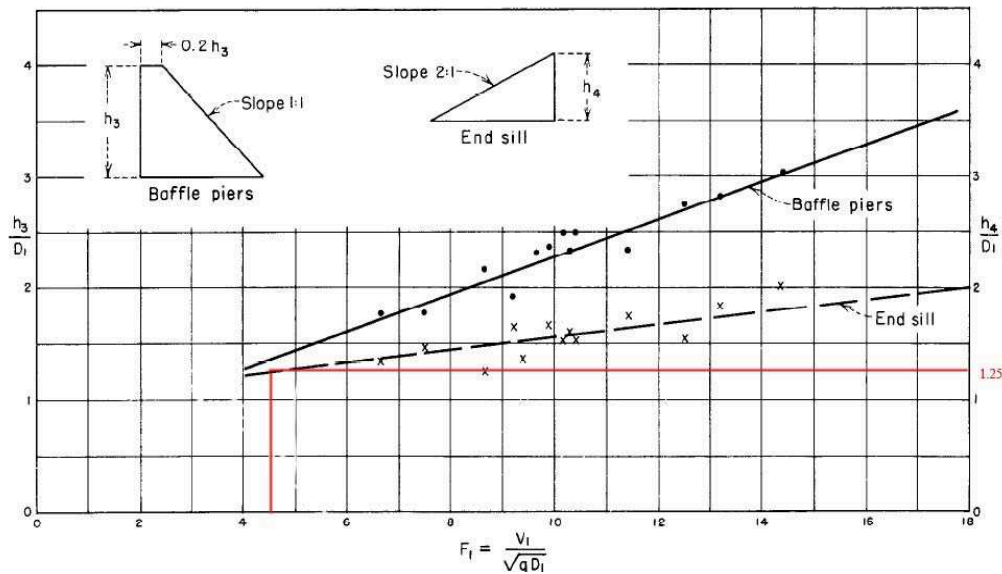
Longitud del cuenco amortiguador = 60 m

¹⁰ El procedimiento completo con el cual se obtiene la altura de flujo al pie del resalto, se presenta en anexos 2.0

4.1.1.2.1 Diseño Del Umbral Final.

FIGURA 4.2

ALTURA DEL UMBRAL EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE



Fuente: Engineering Monograph 25, Bureau of Reclamation.

Elaboración: Fernando Ortega N.

En este gráfico ingresando con el valor de Froude, para determinar la relación h_4/D_1 con la cual se determina la altura del umbral.

Con $Fr = 4.25$ resulta la relación $h_4 / D_1 = 1.25$

$h_4 = 3.50$ m.

4.1.1.3 Ubicación Del Resalto Hidráulico

Conocer la ubicación y longitud del resalto hidráulico, es muy importante en el diseño del dissipador tipo IV, ya que la geometría del cuenco dissipador depende de estas características. La ubicación y longitud del resalto hidráulico puede variar con la altura del escalón del cuenco, por lo que es posible amoldar estas características a nuestras necesidades.

Teóricamente, no es posible calcular con exactitud la ubicación del resalto hidráulico, primeramente debido a que el resalto dependiendo del caudal puede ubicarse tanto en el tramo del cuenco disipador como en el del tramo del río, o en ambos a la vez, condición que no conocemos de antemano y es determinante para definir la ubicación de dicho resalto hidráulico. Es decir la ubicación del resalto y las características del flujo están implícitas la una en la otra, por lo que únicamente es posible conocerlas a través de la modelación física.

Segundo, tanto si el resalto es rechazado o sumergido se presenta tramos de remanso antes o después del R.H., remanso que probablemente se presente dentro del cuenco disipador, el mismo que tiene una base horizontal o pendiente cero, condición para la cual teóricamente no existe remanso y para su cálculo es necesario asumir una pendiente muy pequeña, pero mientras más pequeña sea dicha pendiente menor será la longitud del remanso, por lo tanto el cálculo es incierto y nuevamente se concluye, que solamente es posible determinar con exactitud a través de la modelación física.

En anexos 3.0, se presenta un cálculo aproximado de la ubicación del resalto hidráulico, con el caudal de diseño de $1130 \text{ m}^3/\text{s}$ referido al prototipo.

De este cálculo se obtiene que primeramente se presenta un remanso de 30.2m, a partir del cual inicia el resalto hidráulico y alcanza una longitud de 81m. (Valores referidos al prototipo.)

De estos resultados y conociendo primeramente, que no es necesario que el resalto hidráulico se ubique totalmente dentro del cuenco disipador, sino que parte del resalto puede estar en el cauce del río y segundo, que el caudal de $1130 \text{ m}^3/\text{s}$ es el más crítico. El diseño de la primera alternativa para la modelación física se ha definido con una longitud de 60m en prototipo.

4.1.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR, SALTO EN ESQUÍ

El diseño del salto en esquí se basa en dos parámetros fundamentales y a partir de los cuales es posible determinar las características del chorro, el primer parámetro es el ángulo de salida del deflector que de acuerdo con 1.2.6.1 se lo ha

diseñado de 35° y el segundo parámetro es el radio de curvatura que de acuerdo a la literatura técnica debe ser de cinco veces el calado de diseño inmediatamente aguas arriba del esquí. De las mediciones realizadas previo a este diseño conocemos, que el calado en la abscisa 23.63¹¹ para un caudal de $1130\text{m}^3/\text{s}$ en prototipo es de 0.1517m en el modelo, que equivale a 7.585m en el prototipo, por lo tanto el radio de curvatura del deflector en el prototipo deberá ser de 37.93m. La longitud del deflector está implícita en estos dos parámetros ya que el deflector se deberá alargar de tal manera, que con el radio de diseño termine con un ángulo de 35° , tal como se observa en anexos láminas 6 y 7.

Valiéndonos de la ecuación 1.7 se calcula la longitud teórica del cuenco para el caudal de diseño de $1130\text{m}^3/\text{s}$.

$$L_o = \frac{V_o^2}{g} * \text{Sen}(2\phi)$$

De las mediciones realizada $V_o = 20.49\text{m/s}$

$$L_o = \frac{20.49^2}{9.81} * \text{Sen}(70)$$

$$L_o = 40.21\text{m}$$

Valiéndonos de la ecuación 1.11, calculamos la profundidad de socavación:

$$y_s = 1.90 * H^{0.225} * q^{0.54} * \text{Sen}\alpha$$

La carga de presión de acuerdo con las mediciones realizadas es igual a la hidrostática e igual a 7.585m en el prototipo.

El caudal unitario es igual a:

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{1130}{9} = 125.56 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / \text{m}$$

α de acuerdo con la figura 1.15, es igual 44° .

$$y_s = 1.90 * 7.585^{0.225} * 125.56^{0.54} * \text{Sen } 44$$

$$y_s = 28.30\text{m en prototipo.}$$

¹¹ Ver Ubicación de la abscisa 23.43 en figura 3.3

Diversas comparaciones entre la longitud de chorro y profundidad de socavación teóricas de acuerdo a diferentes autores, podemos observar en la sección 5.4.1.1

4.2 ALTERNATIVAS PLANTEADAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO

4.2.1 DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION

En base a los resultados de los cálculos presentados en 4.1.1.2, se han realizado los planos de diseño de la alternativa uno del disipador tipo IV, estos planos se encuentra en anexos láminas 1, 2, 3, 4, 5, tanto referidos al modelo como al prototipo. Detalles de la construcción en modelo podemos encontrar en la Ref.5.

4.2.2 DISIPADOR DEL TIPO SALTO EN ESQUÍ

En base a lo indicado en 4.1.2 y a las condiciones del proyecto, se han realizado los planos de diseño de la alternativa uno del disipador en esquí, estos planos se encuentra en anexos láminas 6 y 7. Detalles de la construcción en modelo podemos encontrar en la Ref.5.

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN FÍSICA Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En base a los criterios del capítulo uno y a las condiciones de flujo para el caso de estudio, como se mencionó en el capítulo cuatro, se ha definido la modelación de dos estructuras para la disipación de energía, las cuales son:

- Estructura disipadora tipo Salto en Esquí.
- Estructura disipadora tipo IV según la clasificación del Bureau of Reclamation.

En base al dimensionamiento de dichos disipadores, conforme lo indicado en el capítulo cuatro, se ha procedido a la construcción e implantación de estas estructuras, a partir de lo cual se inicia el proceso de análisis experimental.

5.1 PLAN DE PRUEBAS CON LOS DISEÑOS PROPUESTOS

En base al estudio realizado por el Consorcio Gerencia Mazar¹², se conoce que los caudales representativos para el análisis experimental son:

$$Q_1 = 1130 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_2 = 800 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_3 = 500 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_4 = 200 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_5 = 100 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.1.1 PLAN DE PRUEBAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON EL SALTO EN ESQUÍ

El diseño de la alternativa planteada como disipador de energía por medio del salto en Esquí, se lo puede observar en anexos, láminas 9y 10 que para fines del presente trabajo se la ha denominado **Alternativa SE1**. En las pruebas ejecutadas con esta alternativa se ha podido observar el comportamiento del flujo en los diferentes caudales considerados como representativos, determinándose que para los caudales menores a los 1000 m³/s, la disipación de energía ha sido inapropiada, debido a que se produce desbordamiento del flujo aguas arriba del

¹² El Consorcio Gerencia Mazar es la consultora que ha realizado los estudios y diseños del proyecto Hidroeléctrico Sopladora.

Esquí, como resultado del resalto hidráulico ocasionado por acción de la sección de control formada por el deflector al final del Esquí, cuya elevación es mayor al calado de agua para el caso de los caudales referidos al prototipo menores a los 1000 m³/s.

Conforme con lo mencionado en el anterior párrafo, como resultado del resalto hidráulico producido aguas arriba de la sección de control, el flujo a través del Esquí para caudales menores a los 1000 m³/s referidos al prototipo, no forma la mezcla agua-aire típica de este tipo de estructuras, razón por la cual no se ha tomado medidas de flujo para los caudales de diseño menores a 1000 m³/s, sino únicamente para los caudales de 1000 m³/s y 1130 m³/s, en base al siguiente plan de pruebas, para medición de:

- Calado al final del Esquí
- Velocidad al final del Esquí
- Longitud del chorro producto del Salto en Esquí
- Difusión máxima alcanzada en el chorro
- Longitud del cuenco de socavación
- Ancho del cuenco de socavación
- Profundidad del cuenco de socavación

Las mediciones indicadas, serán la base para el análisis de todas las alternativas propuestas en este tipo de disipador, conforme a las modificaciones que se analizarán en los ítems posteriores de este capítulo y se las realizará para cada uno de los caudales considerados como representativos.

5.1.2 PLAN DE PRUEBAS PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON EL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION

La primera opción planteada para la disipación de energía por medio del disipador Tipo IV, corresponde al diseño mostrado en anexos, láminas 1, 2, 3 y 4, que para fines del presente trabajo se la ha nombrado como **alternativa IV.1**

Para conocer el comportamiento de esta estructura de disipación, nos hemos planteado el siguiente plan de pruebas para medición de:

- Calado antes de la transición
- Calado al final de la transición
- Calado antes del resalto hidráulico
- Calado después del resalto hidráulico
- Longitud del Resalto hidráulico
- Velocidad antes de la transición
- Velocidad al final de la transición
- Velocidad antes del resalto hidráulico
- Velocidad después del resalto hidráulico
- Velocidad en una sección del río.

Este plan de pruebas será la base para el análisis de todas las alternativas propuestas de este tipo de dissipador, según las modificaciones que se analizarán en los ítems posteriores de este capítulo y se las realizará para cada uno de los caudales considerados como representativos.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DISEÑOS PROPUESTOS

5.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA SE1, PROPUESTA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL SALTO EN ESQUÍ

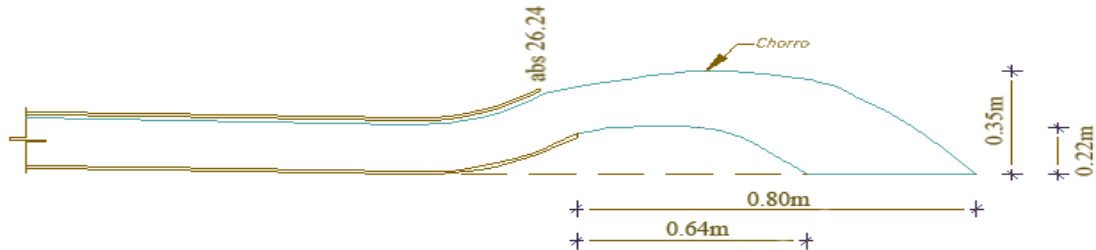
CUADRO 5.1

DATOS, ALTERNATIVA SE1 SALTO EN SKY EN MODELO:¹³

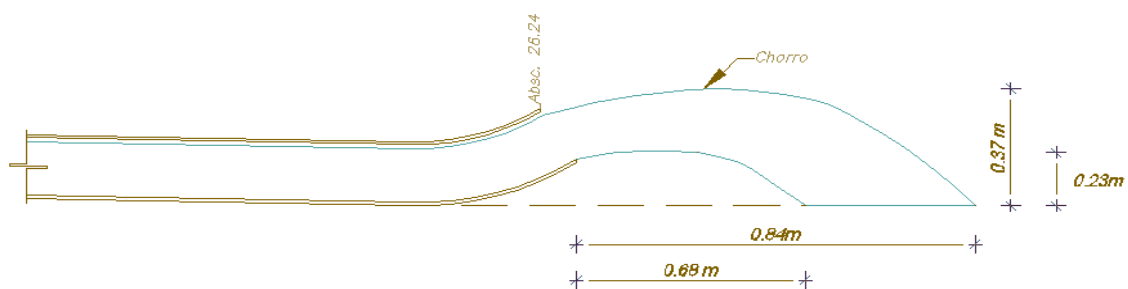
Caudal del prototipo m ³ /s	Longitud chorro (m)		Difusión máxima (m)	Altura de lámina de agua con respecto al fondo del túnel de desvío (m)		Absc.	Calado (m)	Velocidad (m/s)
	Izquierda	Derecha		Max. Superior	Max. Inferior			
1130	0.84	0.68	0.56	0.37	0.23	26.24	0.1675	2.47
1000	0.8	0.64	0.56	0.35	0.22	26.24	0.16	2.42

Elaboración: Fernando Ortega

¹³ Para transformar los datos del cuadro 5.1, a valores del prototipo, se debe multiplicar por 50, los valores de magnitud lineal y para transformar los valores de la velocidad y caudal, es necesario hacer uso de la Ec.2.37 y Ec.2.39 respectivamente. El valor de 50, corresponde a la escala lineal del modelo y por lo tanto $\lambda_L=0.02$.

GRÁFICO 5.1.**ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE1 $Q= 1000\text{m}^3/\text{s}$:**

Elaboración: Fernando Ortega.

GRÁFICO 5.2**ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE1 $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$:**

Elaboración: Fernando Ortega

SOCAVACIÓN:

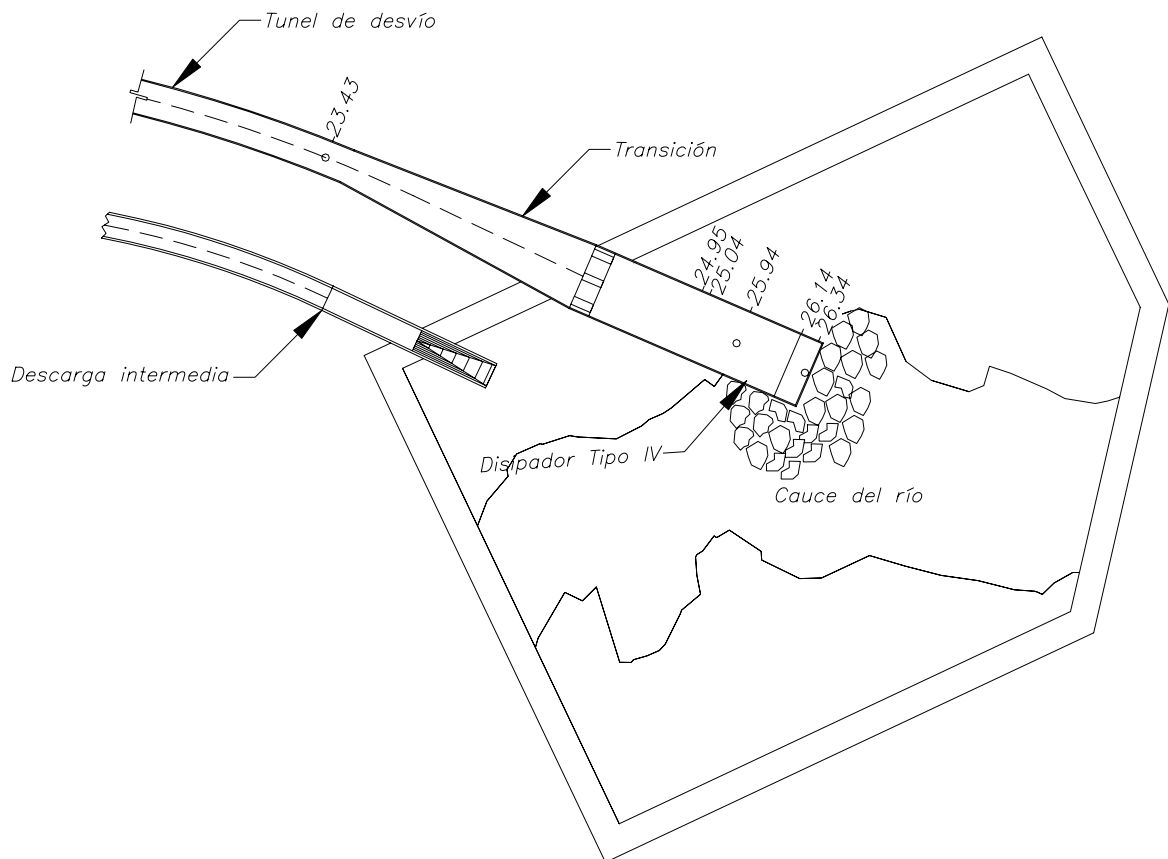
La socavación se puede cualificar a través de la comparación entre las secciones del río previo a la incidencia del chorro (secciones originales) y después de la incidencia del chorro (secciones socavadas) medidas en tramos conocidos y desde un nivel de referencia, nivel que para el caso del presente estudio corresponde a la altura máxima de las paredes que conforman la estructura del modelo al final del túnel de desvío (N+1.13). El tiempo mínimo de prueba para la conformación del cuenco de socavación ha sido de 30 minutos en el modelo, el mismo que corresponde a 3h32' en el prototipo de acuerdo a la escala de Froude.

Los cuencos de socavación producidos como resultado de las pruebas con la alternativa SE1, se pueden observar detalladamente en anexos láminas 17, 18, 19 y 20.

5.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA IV.1, PROPUESTA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION

GRÁFICO 5.3

IMPLANTACIÓN DE LA ALTERNATIVA IV.1 EN MODELO Y UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN



Elaboración: Fernando Ortega N.

CUADRO 5.2

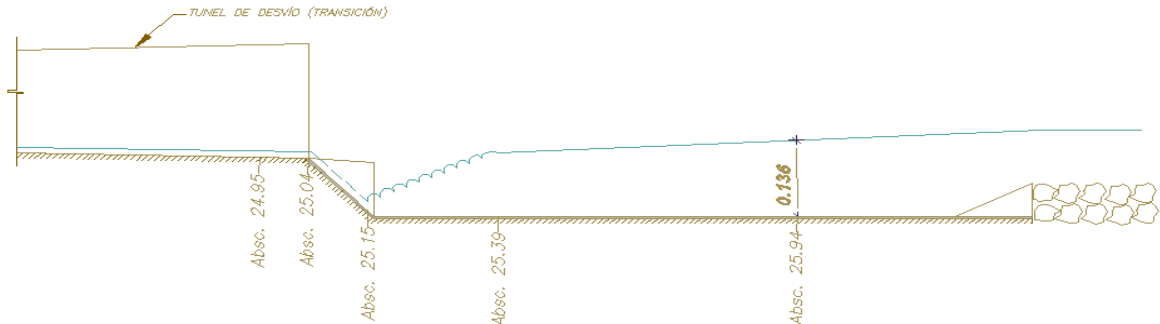
DATOS EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1¹⁴

CAUDAL REFERIDO AL PROTOTIPO m ³ /s	Abscisa	CALADO (m)	Velocidad m/s	Longitud R.H (m)
100	23.43	0.0428	1.77	
	24.95	0.0134	1.75	
	(Inicio R.H) 25.15	0.007	2.24	0.24
	25.94	0.125	0.112	
	Sección A-A:			
	punto 1		0.105	
	punto 2		0.109	
	punto 3		0.016	
	punto 4		0	
200	23.43	0.0531	2.08	
	24.95	0.0144	1.94	
	(Inicio R.H) 25.15	0.013	2.44	0.35
	25.94	0.1576	0.172	
	Sección A-A:			
	punto 1		0.042	
	punto 2		0.1625	
	punto 3		0.094	
	punto 4		0.0185	
500	23.43	0.0936	2.6	
	24.95	0.037	2.85	
	(Inicio R.H) 25.27	0.024	3.24	0.9
	26.34	0.1127	0.65	
	Sección A-A:			
	punto 1		0.408	
	punto 2		0.308	
	punto 3		0.21	
	punto 4		0.074	
800	23.43	0.1123	2.79	
	24.95	0.0558	2.95	
	25.94	0.0391	2.74	
	(Inicio R.H) 26.14	0.0391	2.74	1
	Sección A-A:			
	punto 1		1.329	
	punto 2		0.445	
	punto 3		0.241	
	punto 4		0.077	
1130	23.43	0.1554	2.87	
	24.95	0.0704	3.14	
	25.94	0.0587	2.922	
	(Inicio R.H) 26.14			1.2
	Sección A-A:			
	punto 1		1.341	
	punto 2		0.263	
	punto 3		0.126	
	punto 4		0.129	

Elaboración: Fernando Ortega

¹⁴ Ver pie de página 12 pag. 89

GRÁFICO 5.4

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, $Q= 100\text{m}^3/\text{s}$ 

Elaboración: Fernando Ortega N.

-Comprobación de las condiciones del resalto hidráulico en alternativa IV.1, $Q=100\text{m}^3/\text{s}$:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

$$Fr_1 = \frac{2.24}{\sqrt{9.81 * 0.007}} = 8.55$$

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g * Y_2}}$$

$$Fr_2 = \frac{0.13}{\sqrt{9.81 * 0.136}} = 0.11$$

De la Ecuación 1.1 tenemos:

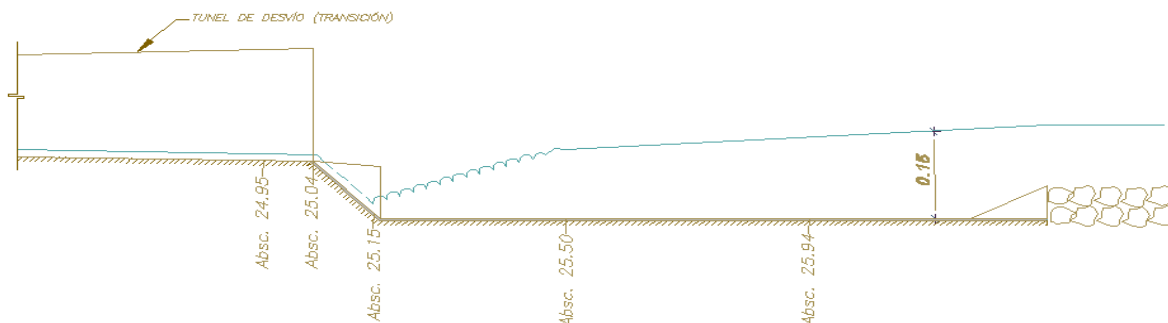
$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * y_1 \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * 0.007 \left(\sqrt{1 + 8 * 8.55^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = 0.08$$

GRÁFICO 5.5

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, $Q= 200\text{m}^3/\text{s}$.

Elaboración: Fernando Ortega N.

- *Comprobación de las condiciones del resalto hidráulico en alternativa IV.1,*

$Q=200\text{m}^3/\text{s}$:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

$$Fr_1 = \frac{2.44}{\sqrt{9.81 * 0.013}} = 6.83$$

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g * Y_2}}$$

$$Fr_2 = \frac{0.224}{\sqrt{9.81 * 0.151}} = 0.18$$

De la Ecuación 1.1 tenemos:

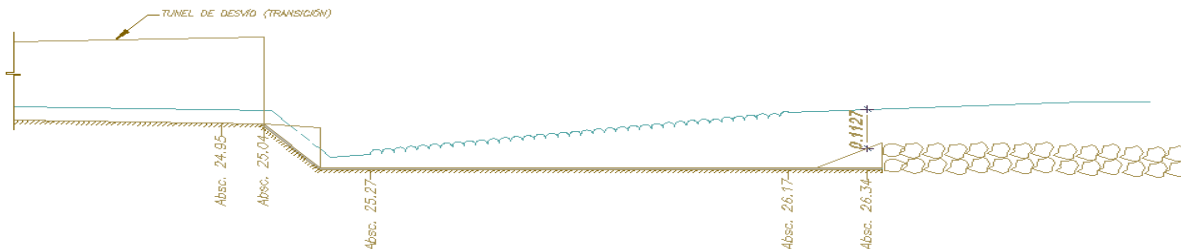
$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * y_1 \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * 0.013 \left(\sqrt{1 + 8 * 6.83^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = 0.12$$

GRÁFICO 5.6

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, $Q= 500\text{m}^3/\text{s}$.

Elaboración: Fernando Ortega

- *Comprobación de las condiciones del resalto hidráulico en alternativa IV.1, $Q=500\text{m}^3/\text{s}$:*

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

$$Fr_1 = \frac{3.24}{\sqrt{9.81 * 0.024}} = 6.68$$

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g * Y_2}}$$

$$Fr_2 = \frac{0.65}{\sqrt{9.81 * 0.113}} = 0.62$$

De la Ecuación 1.1 tenemos:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

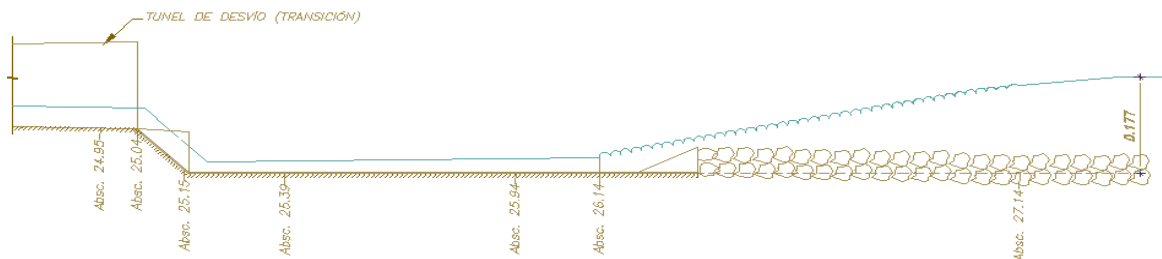
$$y_2 = \frac{1}{2} * y_1 \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * 0.024 \left(\sqrt{1 + 8 * 6.68^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = 0.22$$

GRÁFICO 5.7

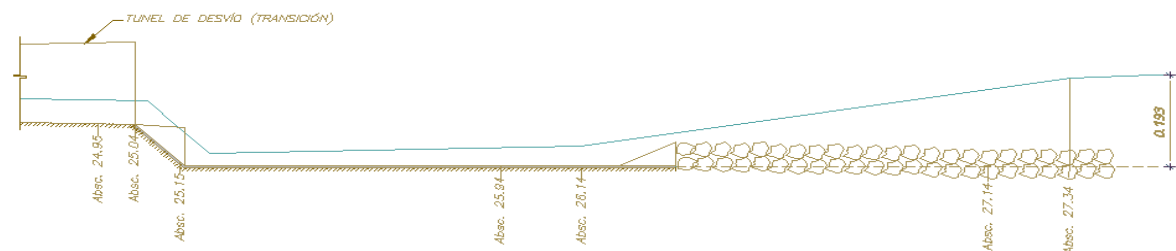
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, $Q= 800\text{m}^3/\text{s}$.



Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.8

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.1, $Q= 1130\text{m}^3/\text{s}$.



Elaboración: Fernando Ortega N.

Referente a las condiciones del resalto hidráulico, de los resultados obtenidos para la alternativa IV.1 con los diferentes caudales, se concluye:

- Las condiciones del resalto hidráulico, ha sido posible comprobarlas únicamente para los caudales de $100\text{ m}^3/\text{s}$, $200\text{ m}^3/\text{s}$ y $500\text{ m}^3/\text{s}$ referidos al prototipo, debido a que para los caudales de $800\text{m}^3/\text{s}$ y $1000\text{m}^3/\text{s}$ referidos al prototipo, el final del resalto hidráulico se presenta en una sección del río cuyas características difieren a la sección al inicio del resalto hidráulico, situación que ocasiona una distorsión de los resultados
- Para los tres caudales analizados, el valor de los números de Froude aguas arriba del resalto hidráulico, se incrementa significativamente por el escalón en el dissipador

- Los porcentajes de disipación de energía resultantes, se ajustan a los porcentajes de disipación indicados en el cuadro 1.1 para resalto estable
- Los valores de los calados conjugados aguas abajo obtenidos por medio de la Ec.1.1, difieren de los medidos en el modelo, debido a que estos últimos se encuentran ubicados aguas abajo del remanso producido

CUADRO 5.3

DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA IV.1, REFERIDA AL MODELO¹⁵

Caudal del prototipo m ³ /s	Determinación de la pérdida de energía por el disipador tipo IV.						
	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	% Disipación
100	0.1594	1.77	0.0428	0	0.112	0.125	65.28
100	0.132	1.77	0.0428	0	0.0575	0.047	85.9
200	0.1594	2.08	0.0531	0	0.172	0.1576	63.26
200	0.132	2.08	0.0531	0	0.07919	0.065	83.9
500	0.1594	2.6	0.0936	0	0.65	0.2136	61.92
500	0.132	2.6	0.0936	0	0.25	0.09	83.66
800	0.132	2.79	0.1123	0	0.523	0.107	78.6
1130	0.132	2.87	0.1554	0	0.46475	0.123	71.47

Elaboración: Fernando Ortega N

Del cuadro 5.3, tenemos

Z_1 = Carga de posición del punto 1 con respecto al punto 2

V_1 = Velocidad en el punto 1

Y_1 = Calado o carga de presión en el punto 1

Z_2 = Carga de posición del punto 2 con respecto al punto 2

V_2 = Velocidad en el punto 2

Y_2 = Calado o carga de presión en el punto 2 (Conforme con la curva de descarga a la salida del túnel de desvío)

¹⁵Ver pie de página 12 pag. 89

Para la determinación del porcentaje de disipación de energía en el cuadro 5.3, se pone como ejemplo el cálculo con el primer valor para el caudal de 100m³/s en prototipo, de donde se tiene:

$$\% \text{Disipación} = \frac{\left(0.1594 + \frac{1.77^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0428\right) - \left(0 + \frac{0.112^2}{2 \cdot 9.81} + 0.125\right)}{0.1447 + \frac{1.77^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0428} * 100$$

$$\% \text{ Disipación} = 65.28\%$$

La ubicación del punto uno es la abscisa 23.43 para todos los caudales.

La ubicación del punto dos varía con los caudales y son las siguientes:

$Q_p = 100\text{m}^3/\text{s} \rightarrow$ absc.25.94 (modelo) y Sección A-A

$Q_p = 200\text{m}^3/\text{s} \rightarrow$ absc.25.94 (modelo) y Sección A-A

$Q_p = 500\text{m}^3/\text{s} \rightarrow$ absc.26.34 (modelo) y Sección A-A

$Q_p = 800\text{m}^3/\text{s} \rightarrow$ Sección A-A

$Q_p = 1130\text{m}^3/\text{s} \rightarrow$ Sección A-A

En el cuadro 5.3, para medición de la disipación de energía presentada con los caudales de 100 m³/s, 200 m³/s y 500 m³/s, se compara la energía existente aguas arriba de la estructura disipadora (punto 1) con dos diferentes puntos aguas abajo del resalto hidráulico, el primer punto dentro del colchón disipador y el segundo en una sección del río, mientras que para los caudales de 800 m³/s y 1130 m³/s únicamente se compara la energía entre un punto aguas arriba y un punto aguas abajo del resalto, debido a que con los caudales más grandes el resalto hidráulico sobrepasa la longitud de la cubeta disipadora.

Para el análisis de la disipación de energía en el presente estudio, es necesario tener en cuenta que la energía calculada corresponde a la media entre varios puntos registrados en una misma sección, por lo que al comparar la energía entre dos puntos de diferente sección, el porcentaje de disipación calculado se afecta por esta condición. Además el flujo tiene un recorrido entre el final del resalto hidráulico y la sección de medición, el cual varía para los diferentes caudales y para las diferentes alternativas, recorrido en el cual se disipa una cierta cantidad de energía. Por estas razones se concluye que el porcentaje de disipación de

energía calculado en el presente trabajo, nos permite conocer la tendencia de la disipación presentada, más no la eficiencia del disipador.

El cálculo del porcentaje de disipación de energía se lo ha realizado de la siguiente manera:

$$\% \text{Disipación} = \left(\frac{E1 - E2}{E1} \right) * 100$$

En donde:

$$E1 = \text{Energía en el punto 1} = Z1 + \frac{V1^2}{2g} + Y1$$

$$E2 = \text{Energía en el punto 2} = Z2 + \frac{V2^2}{2g} + Y2$$

5.3 MODIFICACIONES PLANTEADAS

De los resultados obtenidos en el análisis experimental con las dos primeras alternativas de disipación propuestas, se ha determinado la necesidad de mejorar dichas estructuras en razón que en el disipador tipo Salto en Esquí con los caudales más bajos se produce un resalto hidráulico aguas arriba de la estructura disipadora y en la alternativa del disipador Tipo IV del Bureau of Reclamation, con los caudales altos el resalto hidráulico se presenta totalmente fuera de la cubeta disipadora.

5.3.1 MODIFICACIONES PLANTEADAS EN EL DISIPADOR DE SALTO EN ESQUÍ

En vista de la ineficiencia presentada en la disipación de energía con la primera alternativa propuesta, se ha realizado modificaciones a dicha alternativa con la finalidad de mejorar el comportamiento de este tipo de disipador.

La primera modificación consiste en mantener el radio de curvatura del deflector propuesto en la alternativa 1, pero cortar el deflector de tal manera que la altura máxima sea similar a la altura alcanzada, si el diseño se lo realiza para un

caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, recordando que el diseño de la alternativa uno se lo realizó para el caudal máximo de $1130 \text{ m}^3/\text{s}$. A esta modificación la hemos llamado **alternativa SE2** y su diseño en modelo y prototipo consta en anexos láminas 11 y 12.

La segunda modificación consiste en rediseñar el dissipador en esquí para un caudal de diseño de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, variando de esta manera el radio de curvatura con respecto al de la alternativa SE1, además en esta ocasión se elimina la curvatura en planta. A esta segunda modificación se la ha denominado como **alternativa SE3** y su diseño consta en anexos láminas 13 y 14.

Para todas las alternativas anteriores, se ha considerado el criterio que el chorro alcance el cauce del río, para ello ha sido necesario diseñar un tramo de canal rectangular de una cierta longitud, con la finalidad de cumplir este requerimiento.

La tercera modificación consiste en eliminar el canal rectangular mencionado anteriormente y con el mismo diseño de la alternativa tres, de tal manera que el deflector del esquí se localice inmediatamente al final del túnel de desvío, esto debido a que en el sitio de la obra el suelo rocoso solamente existe 30 metros más allá del final del túnel de desvío, por lo que en las tres primeras alternativas se dificulta la cimentación. A esta última modificación la hemos llamado **alternativa SE4**, y su diseño consta en anexos láminas 15 y 16.

Debido a que en la alternativa cuatro el suelo natural a la salida del esquí se encuentra a una cota superior de la cota del deflector del esquí, se ha considerado realizar un corte del suelo natural, conforme lo mostrado en las denominadas secciones originales que consta en anexos láminas 39 a 50 y además construir un cuenco pre excavado igual al conformado por el chorro con un caudal de diseño de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.3.2 MODIFICACIONES PLANTEADAS EN EL DISIPADOR TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION

De acuerdo con lo mencionado en la sección 4.2.2, el dissipador tipo IV ha dado un buen resultado en cuanto a la disipación de la energía, pero ya que el resalto

hidráulico se rechaza aguas abajo en los caudales más altos, con la finalidad de reducir la longitud del cuenco de disipación se ha realizado una modificación a la alternativa uno, modificación que consiste primeramente en colocar una viga dentro del mencionado cuenco con el propósito de sumergir el resalto hidráulico. Para conseguir las dimensiones y ubicación apropiada de esta viga se ha realizado una serie de pruebas, las cuales no se presentan en este trabajo, sino que solamente se analiza la que produce el mejor resultado.

Además conforme lo mencionado en la sección 5.3.1, el suelo rocoso solamente existe 30 m más allá del final del túnel de desvío, entonces como segunda modificación a la alternativa IV.1, ha sido que el final del cuenco disipador no sobrepase la zona rocosa y así cumplir los requerimientos de cimentación. Al disipador de energía con las mencionadas modificaciones se la ha llamado como **alternativa IV.2** del disipador tipo IV y los planos correspondientes se encuentran en anexos, láminas 5, 6, 7 y 8, tanto en modelo como en prototipo.

La nueva implantación de la alternativa IV.2 y sus puntos de medición se presentan en la figura 5.27

5.4 PLAN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS MODIFICACIONES PROPUESTAS

5.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LAS ALTERNATIVAS SE2, SE3 y SE4 PROPUESTA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL SALTO EN ESQUÍ

5.4.1.1 Alternativa SE2

CUADRO 5.4**RESULTADO DE MEDICIONES EN ALTERNATIVA SE2 (SALTO EN ESQUÍ)¹⁶**

Q. Prototipo (m ³ /s)	Ubicación de Resalto H.		Longitud del chorro (m)	Difusión máxima (m)	Abscisa (m)	Calado (m)	Velocidad media (m/s)
	Absc. inicio R.H	Absc. final R.H					
100	22.93	23.73	0.11	0.31	22.93	0.0403	1.79
					23.45	0.0744	0.63
					24.283	0.1134	0.28
					24.965	0.1342	0.37
					25.49	0.154	0.34
					26.155	0.065	0.58
200	24.283	25.2	0.19	0.34	23.45	0.0585	2.14
					24.283	0.0634	2.09
					24.965	0.1301	0.66
					25.49	0.165	0.52
					26.155	0.105	0.82
330	24.965	25.715	0.3	0.37	25.49	0.0478	2.29

CUADRO 5.4CONTINUACIÓN¹⁷

Caudal del prototipo m ³ /s	Longitud chorro (m)		Difusión máxima (m)	Altura de lámina de agua con respecto al fondo del túnel de desvío (m)		Abscisa (m)	Calado (m)	Velocidad media m/s
	Izquierda	Derecha		Max. Superior	Max. Inferior			
500	0.74	0.33	0.42	0.233	0.128	26.155	0.09	2.19
800	0.82	0.64	0.46	0.258	0.183	26.155	0.116	2.42
1130	0.88	0.64	0.49	0.273	0.19	26.155	0.152	2.66

En esta alternativa se ha incluido el caudal de 330m³/s, ya que es el caudal límite en el que se produce resalto hidráulico aguas arriba, para caudales mayores a este no se produce resalto hidráulico.

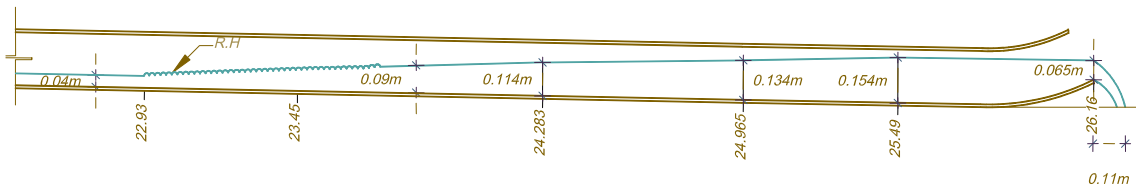
A continuación se presentan los esquemas de trayectoria del flujo para los diferentes caudales.

¹⁶ Ver pie de página 12 pag. 89

¹⁷ Ver pie de página 12 pag. 89

GRÁFICO 5.9

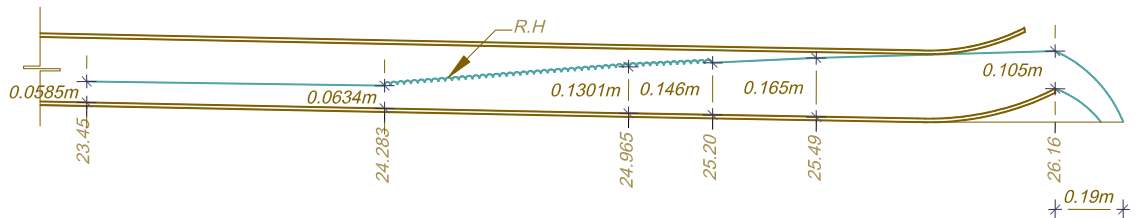
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2, Q= 100 m³/s



Elaboración: Fernando Ortega

GRÁFICO 5.10

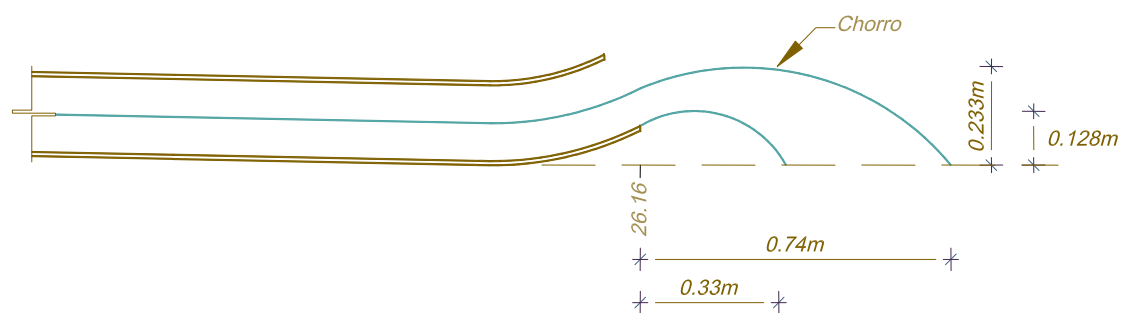
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2, Q=200 m³/s



Elaboración: Fernando Ortega N.

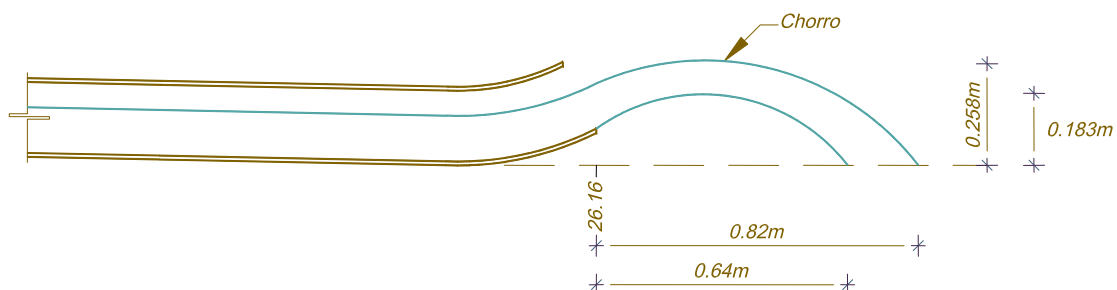
GRÁFICO 5.11

ESQUEMA DE FLUJO DE MODELO, ALTERNATIVA SE2 Q=500 m³/s



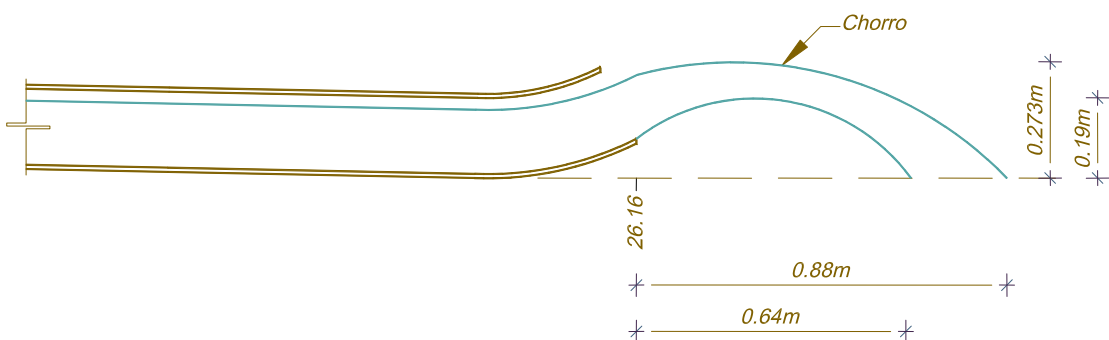
Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.12

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2, $Q= 800 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.13

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE2, $Q= 1130 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Elaboración: Fernando Ortega N.

SOCAVACIÓN:

Igual a lo mencionado en la sección 5.2.1 referente a la alternativa SE1.

Los cuencos de socavación de la alternativa SE2, se pueden observar detalladamente en anexos láminas 21 a 29.

5.4.1.2 Alternativa SE3

CUADRO 5.5**RESULTADOS DE MEDICIONES EN ALTERNATIVA SE3 (SALTO EN ESQUÍ)¹⁸:**

Q Prototipo (m ³ /s)	Ubicación de Resalto H.		Lngitud del chorro (m)	Difusión máxima (m)	Abscisa (m)	Calado (m)	Velocidad media(m/s)	Sección C-C	
	Absc. inicio R.H	Absc. final R.H						Ub. Pt	Velocidad (m/s)
100	22.93	23.88	0.12	29	22.93	0.0567	1.72	1	0.2
					23.45	0.0843	1.08	2	0.37
					24.283	0.1085	0.51	3	0.2
					24.965	0.1308	0.31	4	0.14
					25.49	0.14	0.26	5	0.14
					26.155	0.07	0.4		
200	24.283	25.233	0.2	37	24.283	0.0599	2.03	Sección B-B	
					24.965	0.1305	0.8	Ub. Pt	Velocidad (m/s)
					25.49	0.162	0.44	1	0.205
					26.25	0.145	0.7	2	0.367
								3	0.432
								4	0.236
								5	0.036
								6	0.01

CUADRO 5.5 CONTINUACIÓN

Caudal del prototipo m ³ /s	Longitud chorro (m)		Difusión maxima (m)	Altura de lámina de agua con respecto al fondo del túnel de desvío (m)		Abscisa (m)	Calado (m)	Velocidad media (m/s)	Sección A-A	
	Izquierda	Derecha		Max. Superior	Max. Inferior				Ub. Pt	Velocidad (m/s)
500	0.71	0.41	0.42	0.27	0.14	25.49	0.072	2.36	1	0.54
						26.155		2.05	2	0.329
						26.25	0.1		3	0.029
									4	0.0245
800	0.76	0.63	0.47	0.302	0.162	25.49	0.1024	2.6	1	0.591
						26.155		2.52	2	0.55
						26.25	0.1225		3	0.526
									4	0.129
1130	0.82	0.72	0.54	0.3	0.18	25.49	0.133	2.72	1	0.81
						26.155		2.47	2	0.72

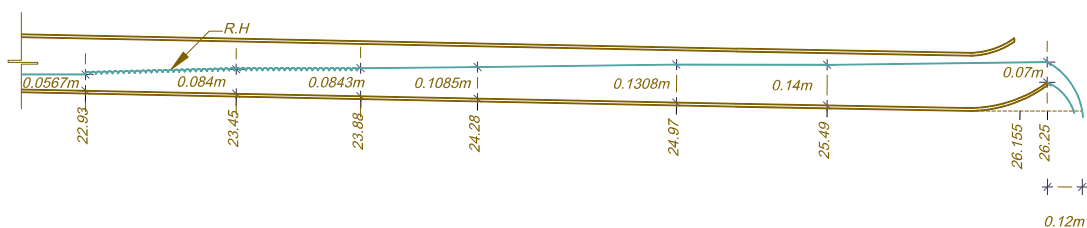
¹⁸ Ver pie de página 12 pag.89. La ubicación de las secciones A-A, B-B, C-C, se las puede observar en anexos lámina 30, pag 185.

						26.25	0.16		3	0.61

Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.14

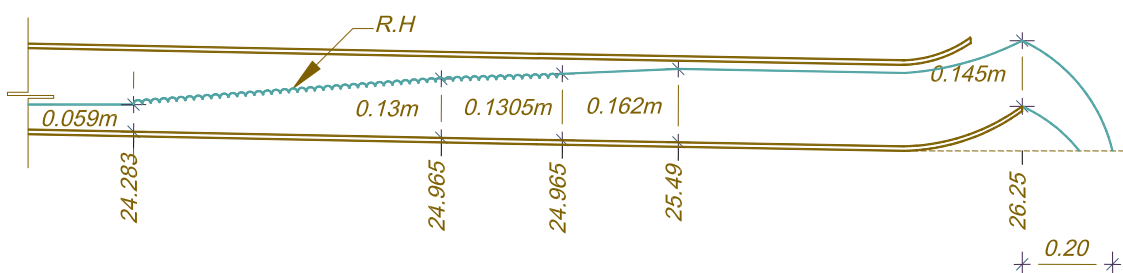
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 100m³/s



Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.15

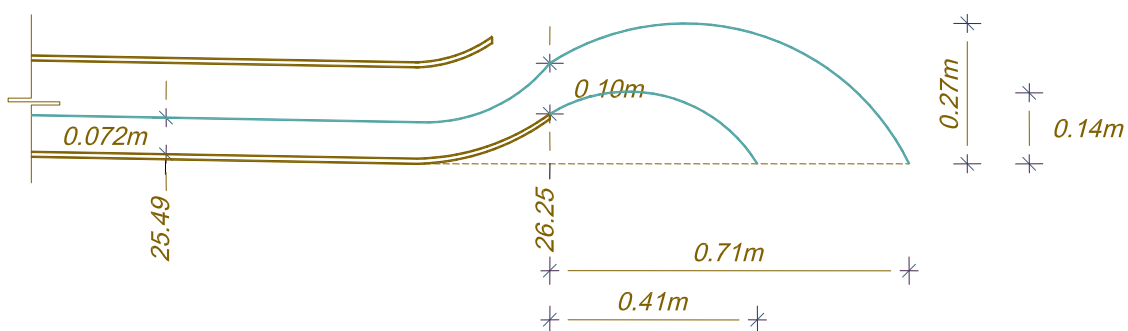
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 200m³/s



Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.16

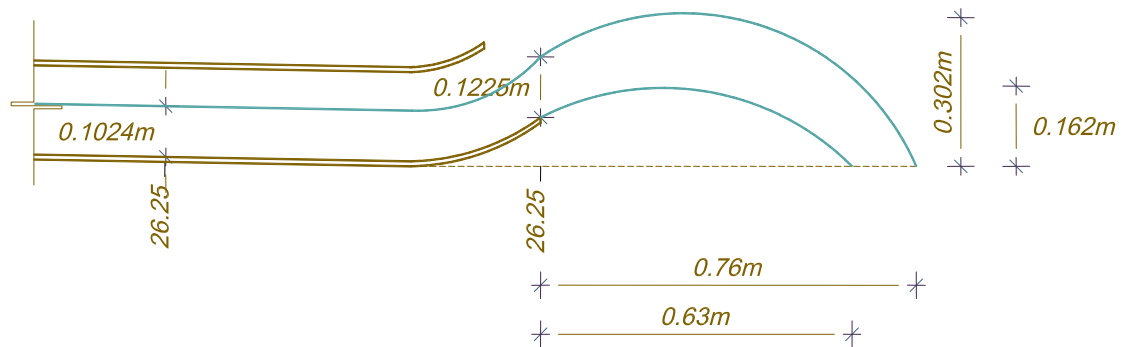
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, Q= 500m³/s



Elaboración: Fernando Ortega

GRÁFICO 5.17

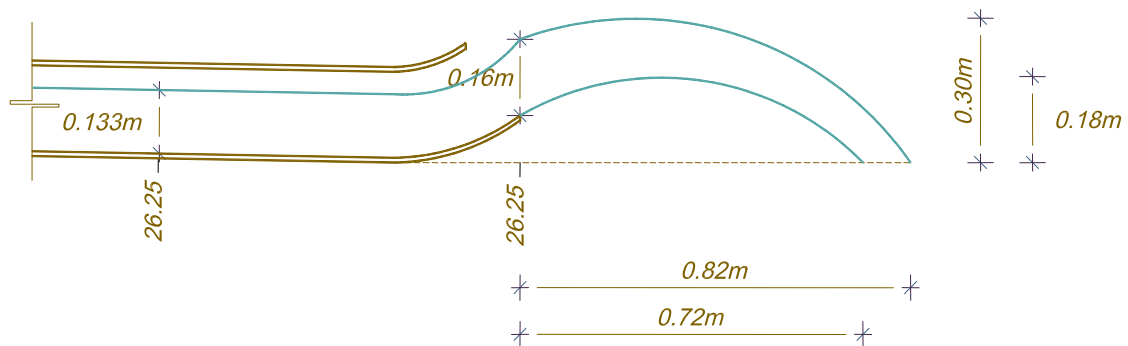
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, $Q= 800 \text{ m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.18

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE3, $Q= 1130 \text{ m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega N.

En el cuadro 5.6, se presenta el porcentaje de disipación de energía para los diferentes caudales considerados como representativos.

CUADRO 5.6

DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA SE3, REFERIDA AL MODELO¹⁹:

Q Prototipo (m ³ /s)	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	% Disipación
100	Determinación de la pérdida de energía por el resalto hidráulico						
	0.019	1.72	0.0567	0	0.26	0.14	36.66
	Determinación de la pérdida de energía por el salto en sky						
	0.0139	0.26	0.14	0	0.21	0.046	69.34
Energía Total Disipada =							79.93
200	Determinación de la pérdida de energía por el resalto hidráulico						
	0.01684	2.03	0.0599	0	0.44	0.162	40.07
	Determinación de la pérdida de energía por el salto en sky						
	0.022	0.44	0.162	0	0.2143333	0.065	65.26
Energía Total Disipada =							78.19
500	Determinación de la pérdida de energía por el salto en sky						
	0.101	2.36	0.072	0	0.230625	0.09	79.707538
	Energía Total Disipada =						
800	Determinación de la pérdida de energía por el salto en sky						
	0.101	2.6	0.1024	0	0.449	0.107	78.597307
	Energía Total Disipada =						
1130	Determinación de la pérdida de energía por el salto en sky						
	0.101	2.72	0.133	0	0.7133333	0.123	75.627763
	Energía Total Disipada =						

Elaboración: Fernando Ortega N.

¹⁹Ver pie de página 12 pag. 89.El significado de las variable del cuadro 5.6, se puede observar a continuación del cuadro 5.3, ítem 5.2.2

Para la determinación del porcentaje de disipación de energía en el cuadro 5.6, se pone como ejemplo el cálculo con el primer valor para el caudal de 100m³/s en prototipo, de donde se tiene:

$$\% \text{Disipación} = \frac{\left(0.019 + \frac{1.72^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0567\right) - \left(0 + \frac{0.26^2}{2 \cdot 9.81} + 0.14\right)}{0.019 + \frac{1.72^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0567} * 100$$

$$\% \text{ Disipación} = 36.66\%$$

El punto uno de acuerdo con el caudal corresponde a las siguientes abscisas:

Q= 100m³/s →absc. 22.93 y 25.49

Q= 200m³/s →absc. 24.28 y 25.49

Q= 500m³/s → absc. 25.49

Q= 800m³/s → absc.25.49

Q= 1130m³/s → absc.25.49

El punto dos de acuerdo con el caudal corresponde a las siguientes secciones:

Q= 100m³/s →absc. 25.49 y Sección C-C

Q= 200m³/s →absc. 25.49 y Sección B-B

Q= 500m³/s → Sección A-A

Q= 800m³/s → Sección A-A

Q= 1130m³/s → Sección A-A

Para el cálculo del porcentaje de disipación de energía se ha procedido de la misma manera indicada para el cuadro 5.3, ítem 5.2.2.

SOCAVACIÓN:

Igual a lo mencionado en la sección 4.2.1 referente a la alternativa uno.

Los cuencos de socavación de la alternativa SE3, se pueden observar detalladamente en anexos láminas 30 a 38.

5.4.1.3 ALTERNATIVA SE4

CUADRO 5.7**RESULTADOS DE MEDICIONES EN ALTERNATIVA SE4 (SALTO EN ESQUÍ)²⁰**

Q Prototipo (m ³ /s)	Ubicación de Resalto H.		Longitud del chorro (m)	Difusión máxima (m)	Abscisa (m)	Calado (m)	Velocidad media(m/s)	Sección A-A	
	Absc. inicio R.H	Absc. final R.H						Ub. Pt	Velocidad (m/s)
100	23.09	24.02	0.1	0.28	22.26	0.0446	1.7	1	0.017
					25.04	0.1495	0.58	2	0.083
					25.32	0.073		3	0.154
								4	0.0355
200	24.16	25.06	0.28	0.36	23.88	0.0574	2.01	1	0.1145
					25.04	0.156	0.75	2	0.052
					25.32	0.104		3	0.1455
								4	0.0255

CUADRO 5.7 (CONTINUACIÓN)

Q Prototipo m ³ /s	Longitud chorro (m)		Difusión máxima (m)	Altura de lámina de agua con respecto al fondo del túnel de desvío (m)		Abscisa (m)	Calado (m)	Velocidad media (m/s)	Sección A-A	
	Izquierda	Derecha		Max. Superior	Max. Inferior				Ub. Pt	Velocidad (m/s)
500	0.75	0.43	0.35	0.262	0.152	25.04	0.0741	2.45	1	0.2275
						25.32	0.09		2	0.162
									3	0.1155
									4	0.0475
800	0.8	0.65	0.46	0.307	0.182	25.04	0.1021	2.71	1	0.441
						25.32	0.12		2	0.396
									3	0.1845
									4	0.041
1130	0.85	0.75	0.55	0.287	0.192	25.04	0.1509	2.76	1	0.3345
						25.32	0.16		2	0.546
									3	0.189
									4	0.3315

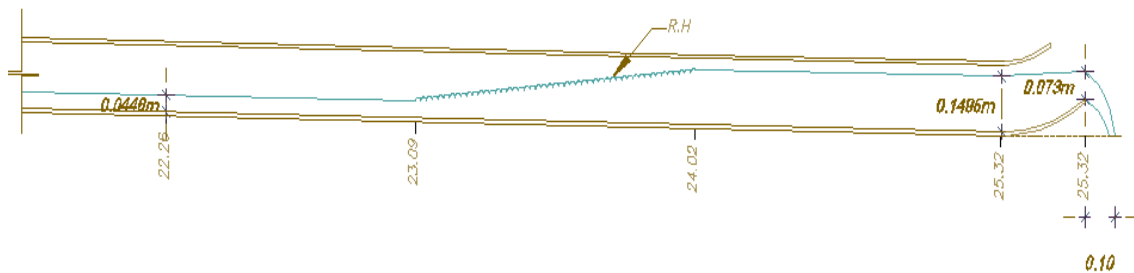
Elaboración: Fernando Ortega N.

²⁰ Ver pie de página 12 pag. 89. La ubicación de las secciones A-A, se la puede observar en anexos lámina 30, pag 185.

En los gráficos 5.19 a 5.23, se presenta gráficamente la trayectoria del flujo, a su paso por la estructura disipadora de la alternativa SE4.

GRÁFICO 5.19

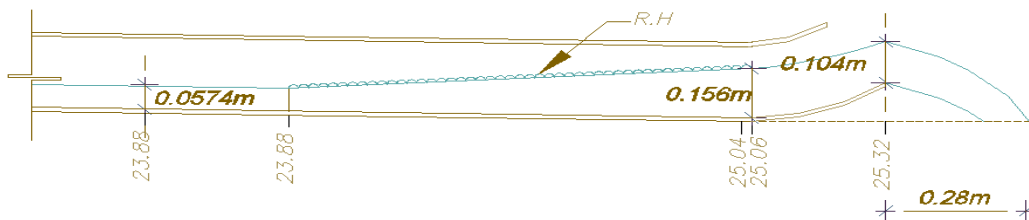
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, $Q=100\text{m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega.

GRÁFICO 5.20

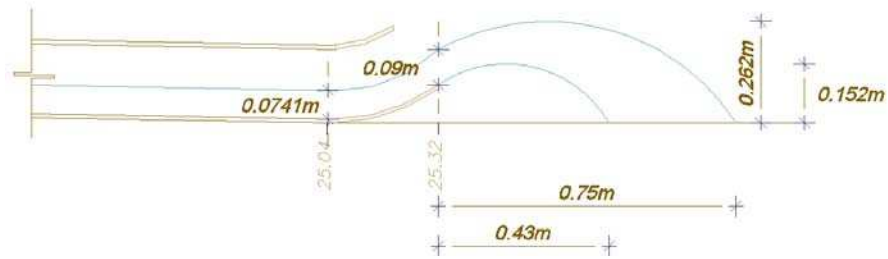
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, $Q=200\text{m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega.N.

GRÁFICO 5.21

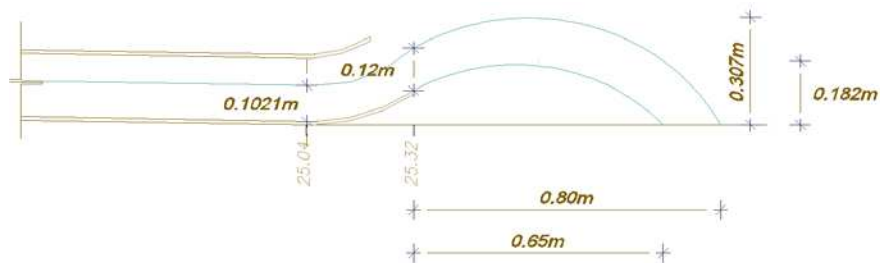
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, $Q=500\text{m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.22

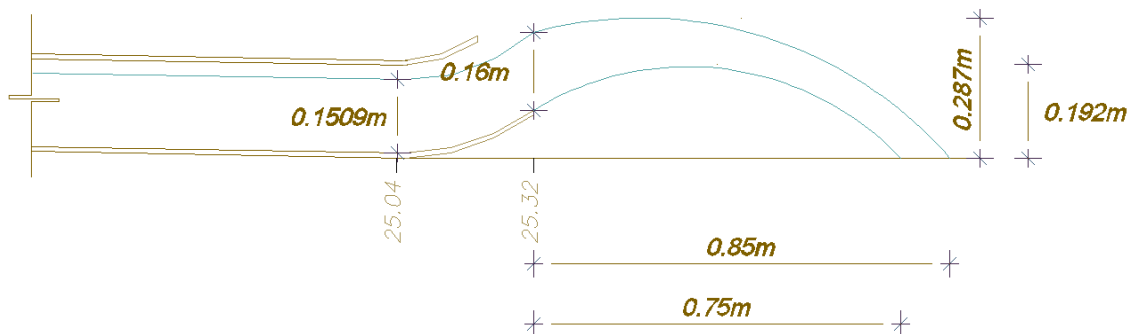
ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, $Q=800\text{m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.23

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA SE4, $Q=1130\text{m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega N.

A continuación se determina el porcentaje de energía disipada.

CUADRO 5.8**DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA SE4, REFERIDA AL MODELO²¹:**

Q Prototipo m ³ /s	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	% Disipación
100	0.11	1.7	0.0446	0	0.072375	0.046	84.675
200	0.11	2.01	0.0574	0	0.084375	0.065	82.491
500	0.11	2.45	0.0741	0	0.138125	0.09	81.436
800	0.11	2.71	0.1021	0	0.265625	0.107	81.140
1130	0.11	2.76	0.1509	0	0.35025	0.123	80.089

Para la determinación del porcentaje de disipación de energía en el cuadro 5.8, se pone como ejemplo el cálculo con el primer valor para el caudal de 100m³/s en prototipo, de donde se tiene:

$$\% \text{Disipación} = \frac{\left(0.11 + \frac{1.7^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0446\right) - \left(0 + \frac{0.072^2}{2 \cdot 9.81} + 0.046\right)}{0.11 + \frac{1.7^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0446} * 100$$

$$\% \text{ Disipación} = 84.675\%$$

En el cuadro 5.8 se presenta la disipación de energía con respecto a dos puntos, el uno aguas arriba en el túnel de desvío y el otro en la sección A-A del río, para los caudales de 100m³/s y 200m³/s este primer punto es anterior a la formación del resalto hidráulico.

El punto uno corresponde a las siguientes abscisas de acuerdo con el caudal:

$$Q = 100\text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{abs. } 22.26$$

$$Q = 200\text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{abs. } 23.88$$

$$Q = 500\text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{abs. } 25.04$$

$$Q = 800\text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{abs. } 25.04$$

$$Q = 1130\text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{abs. } 25.04$$

²¹Ver pie de página 12 pag. 89. El significado de las variable del cuadro 5.8, se puede observar a continuación del cuadro 5.3, ítem 5.2.2

Para el cálculo del porcentaje de disipación de energía se ha procedido de idéntica manera a lo indicado para el cuadro 5.3, ítem 5.2.2

SOCAVACIÓN:

Igual a lo mencionado en la sección 4.2.1 referente a la alternativa SE1.

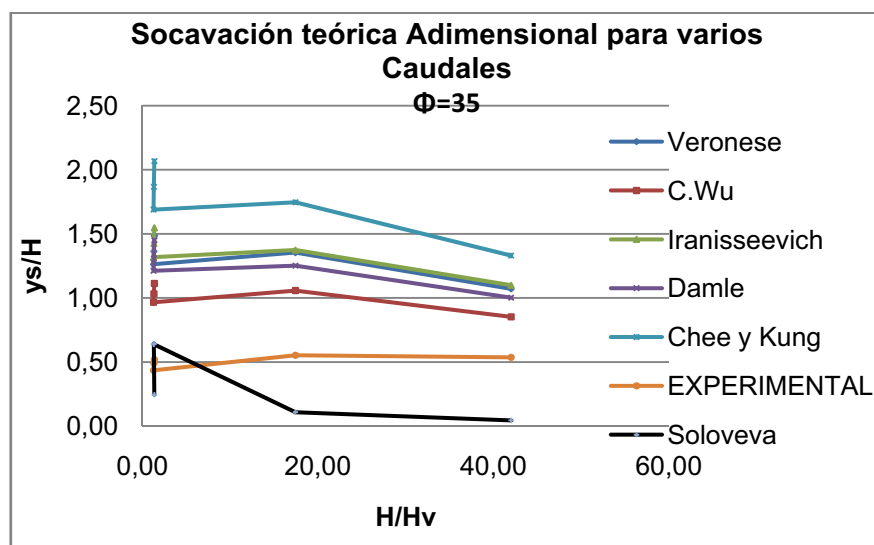
Los cuencos de socavación de la alternativa SE4, se pueden observar detalladamente en anexos láminas 39 a 50.

5.4.1.4 Análisis De Los Resultados Experimentaly Teórico De Los Cuencos De Socavación

Con la finalidad de comparar los resultados de esta investigación con las ecuaciones formuladas en investigaciones anteriores referidas en la literatura técnica, respecto de las dimensiones de los cuencos de socavación formados por efecto del dissipador tipo salto en Esquí, se presenta en anexos en el cuadro A4.1, la profundidad de socavación para los diferentes caudales y con ecuaciones de diferentes autores, en el cuadro A4.2 se muestran los resultados del cuadro A4.1 en forma relativa y en el cuadro A4.3, se presenta la profundidad relativa de socavación para diferentes caudales, obtenidas en la presente investigación.

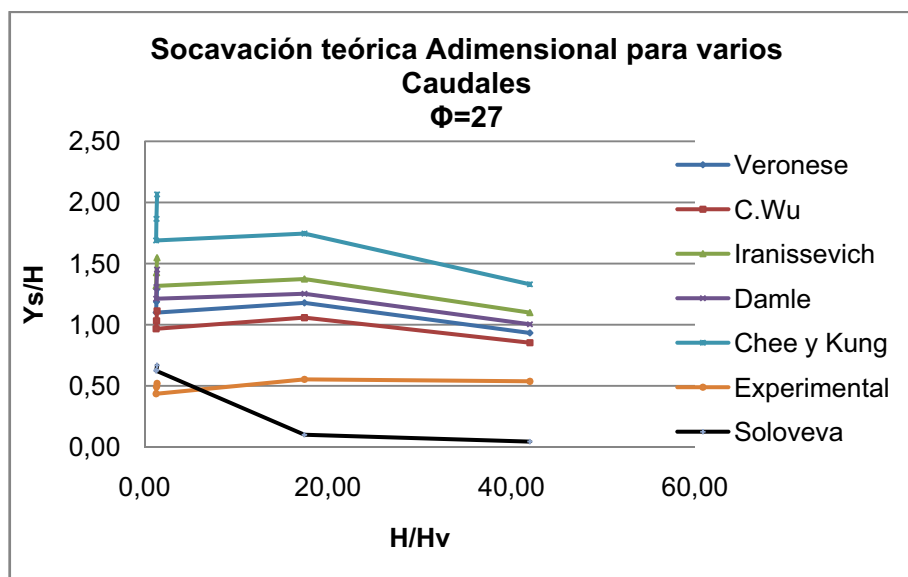
En los gráficos 5.24 y 5.25, se muestra en forma gráfica los resultados de los cuadros mencionados.

GRÁFICO 5.24



Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.25



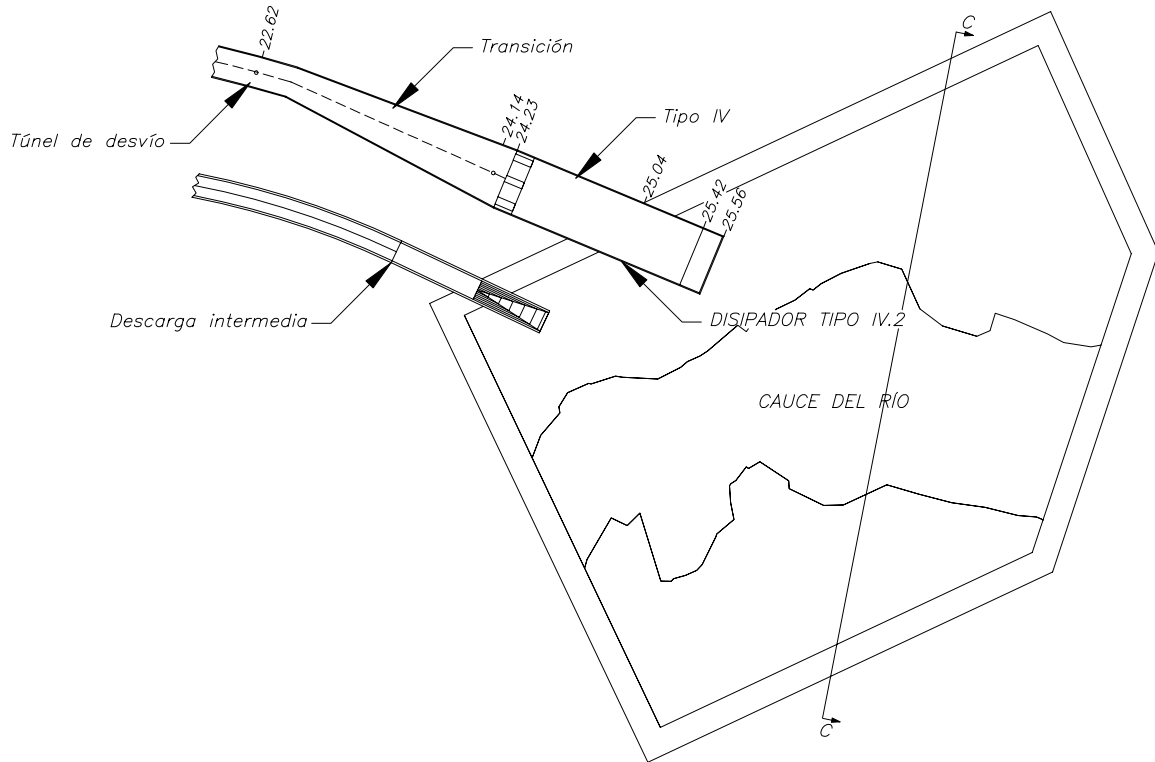
Elaboración: Fernando Ortega N

De lo observado en los gráficos 5.24 y 5.25, se concluye que la profundidad de socavación obtenida en la presente investigación guarda la tendencia de los resultados obtenidos aplicando las ecuaciones propuestas por distintos autores y su magnitud es inferior con respecto a la mayoría de los resultados obtenidos al aplicar estas ecuaciones.

5.4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA IV.2, PROPUESTA PARA LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL DISIPADOR TIPO IV

GRÁFICO 5.26

IMPLANTACIÓN DE LA ALTERNATIVA IV.2 EN MODELO Y UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN



Elaboración: Fernando Ortega

En el cuadro 5.9, se presenta la información recopilada en las mediciones del modelo con la alternativa IV.2 del disipador de energía.

CUADRO 5.9

RESULTADO DE MEDICIONES EN MODELO ALTERNATIVA IV.2:

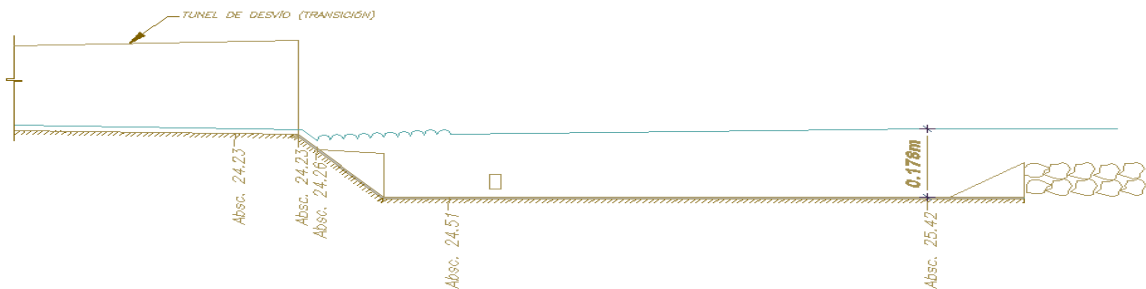
CAUDAL PROTOTIPO m ³ /s	Abscisa	CALADO (m)	Velocidad m/s	Longitud R.H (m)
100	22.62	0.0426	1.73	
	24.14	0.0134	1.72	
	(Inicio R.H) 24.265			0.24
	25.42	0.178	0.12	
	Sección C-C:			
	punto 1		0.026	
	punto 2		0.141	
	punto 3		0.267	
200	22.62	0.052	2.04	
	24.14	0.021	2.05	
	(Inicio R.H) 24.265			0.5
	25.42	0.199	0.2	
	Sección C-C:			
	punto 1		0.220	
	punto 2		0.110	
	punto 3		0.182	
500	22.62	0.086	2.56	
	24.14	0.042	2.85	
	(Inicio R.H) 24.44	0.024	3.26	0.8
	25.42	0.222	0.26	
	Sección C-C:			
	punto 1		0.338	
	punto 2		0.275	
	punto 3		0.270	
800	22.62	0.115	2.84	
	24.14	0.053	3.04	
	(Inicio R.H) 24.54	0.037	3.42	1.2
	25.42	0.243	0.94	
	Sección C-C:			
	punto 1		0.815	
	punto 2		0.399	
	punto 3		0.389	
1130	22.62	0.146	2.95	
	24.14	0.06	3.21	
	(Inicio R.H) 25.14			1.2
	25.42	0.197		
	Sección C-C:			
	punto 1		1.204	
	punto 2		1.020	
	punto 3		0.850	
	punto 4		0.430	
	punto 5		0.190	

Elaboración: Fernando Ortega

En los gráficos 5.27 a 5.28, se presenta la trayectoria del flujo a su paso por el dissipador de energía, alternativa IV.2.

GRÁFICO 5.27

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, $Q=100\text{m}^3/\text{s}$



Elaboración: Fernando Ortega N.

Comprobación de las condiciones del resalto hidráulico en alternativa IV.2, $Q=100\text{m}^3/\text{s}$:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

$$Fr_1 = \frac{1.72}{\sqrt{9.81 * 0.0134}} = 4.74$$

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g * Y_2}}$$

$$Fr_2 = \frac{0.09}{\sqrt{9.81 * 0.178}} = 0.07$$

De la Ecuación 1.1 tenemos:

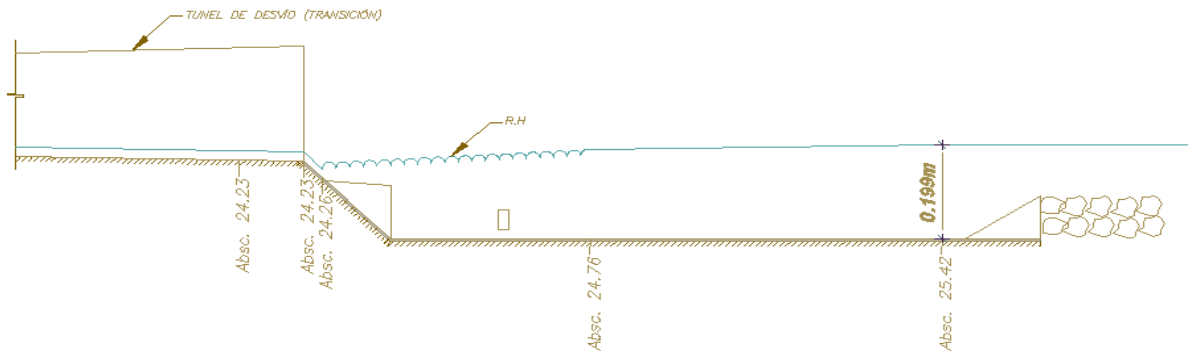
$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * y_1 \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * 0.0134 \left(\sqrt{1 + 8 * 4.74^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = 0.08$$

GRÁFICO 5.28

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ 

Elaboración: Fernando Ortega N.

Comprobación de las condiciones del resalto hidráulico en alternativa IV.2, $Q=200\text{m}^3/\text{s}$:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

$$Fr_1 = \frac{2.05}{\sqrt{9.81 * 0.021}} = 4.51$$

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g * Y_2}}$$

$$Fr_2 = \frac{0.20}{\sqrt{9.81 * 0.199}} = 0.14$$

De la Ecuación 1.1 tenemos:

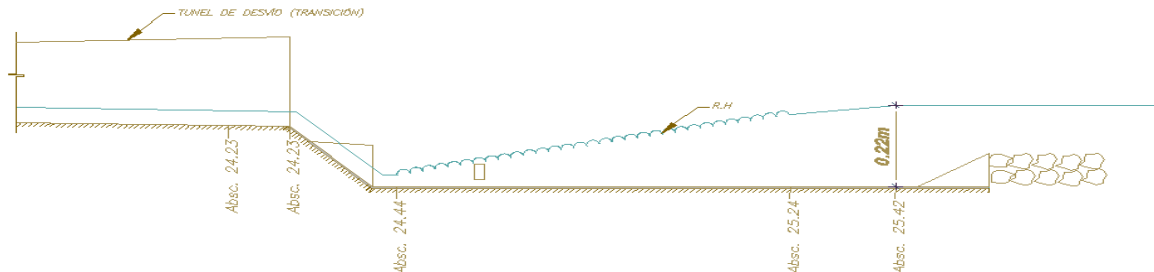
$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * y_1 \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * 0.021 \left(\sqrt{1 + 8 * 4.51^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = 0.12$$

GRÁFICO 5.29

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, $Q= 500\text{m}^3/\text{s}$ 

Elaboración: Fernando Ortega.

Comprobación de las condiciones del resalto hidráulico en alternativa IV.2, $Q=500\text{m}^3/\text{s}$:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

$$Fr_1 = \frac{3.26}{\sqrt{9.81 * 0.024}} = 6.72$$

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g * Y_2}}$$

$$Fr_2 = \frac{0.26}{\sqrt{9.81 * 0.222}} = 0.18$$

De la Ecuación 1.1 tenemos:

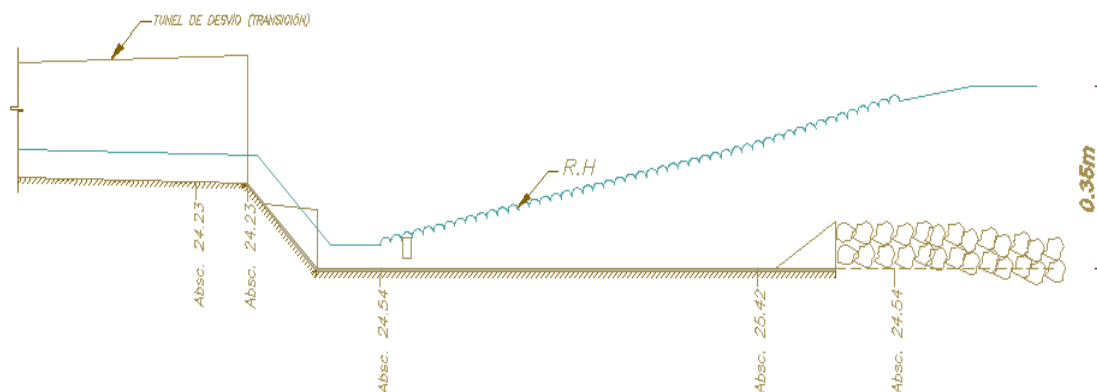
$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * y_1 \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_2 = \frac{1}{2} * 0.024 \left(\sqrt{1 + 8 * 6.71^2} - 1 \right)$$

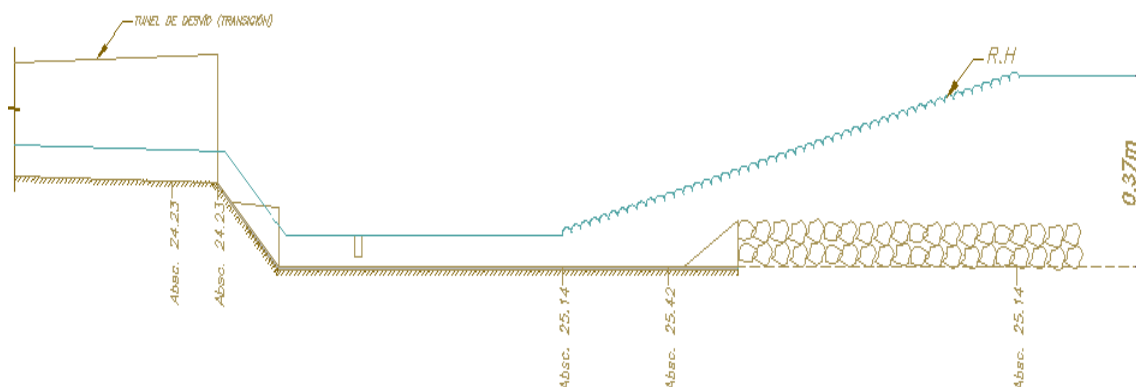
$$y_2 = 0.22$$

GRÁFICO 5.30

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, $Q= 800\text{m}^3/\text{s}$ 

Elaboración: Fernando Ortega N.

GRÁFICO 5.31

ESQUEMA DE FLUJO EN MODELO, ALTERNATIVA IV.2, $Q= 1130\text{m}^3/\text{s}$ 

Elaboración: Fernando Ortega N.

Referente a las condiciones del resalto hidráulico, de los resultados obtenidos para la alternativa IV.2 con los diferentes caudales, se concluye:

- Al igual que en la alternativa IV.1, las condiciones del resalto hidráulico, han sido posible comprobarlas únicamente para los caudales de $100\text{ m}^3/\text{s}$, $200\text{ m}^3/\text{s}$ y $500\text{ m}^3/\text{s}$ referidos al prototipo, por las mismas razones expuestas anteriormente.

- Para los caudales de $100\text{m}^3/\text{s}$ y $200\text{m}^3/\text{s}$ referidos al prototipo, debido al sitio de ubicación del resalto hidráulico no ha sido posible medir calado y velocidades en el punto del conjugado aguas arriba, por lo que los resultados obtenidos de las características del resalto no se ajustan en forma precisa a las condiciones teóricas.
- Para el caudal de $500\text{m}^3/\text{s}$ se presenta las mismas condiciones indicadas en la alternativa IV.1, a más que el punto de medición final se acerca más al valor del conjugado, por lo que no existe remanso.

A continuación se presenta en forma tabular el cálculo del porcentaje de energía disipada al pasar por la estructura de la alternativa IV.2

CUADRO 5.10**DETERMINACIÓN DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ALTERNATIVA IV.2, REFERIDA AL MODELO²²:**

Caudal del prototipo m ³ /s	Determinación de la pérdida de energía por el dissipador tipo IV						
	z1 (m)	v1(m/s)	y1 (m)	z2 (m)	v2(m/s)	y2 (m)	% Disipación
100	0.1822	1.73	0.0426	0	0.13	0.12	67.97
100	0.1896	1.73	0.0426	0	0.146	0.047	87.5
200	0.1822	2.04	0.052	0	0.2	0.1586	64.01
200	0.1896	2.04	0.052	0	0.153	0.065	85.41
500	0.1822	2.6	0.086	0	0.2	0.1586	63.43
500	0.1896	2.56	0.086	0	0.264	0.09	84.65
800	0.1896	2.84	0.115	0	0.5011	0.107	83.26
1130	0.1896	2.95	0.146	0	0.739	0.123	80.64

Elaboración: Fernando Ortega N.

Para la determinación del porcentaje de disipación de energía en el cuadro 5.10, se pone como ejemplo el cálculo con el primer valor para el caudal de 100m³/s en prototipo, de donde se tiene:

$$\% \text{Disipación} = \frac{\left(0.1822 + \frac{1.73^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0426\right) - \left(0 + \frac{0.13^2}{2 \cdot 9.81} + 0.120\right)}{0.11 + \frac{1.73^2}{2 \cdot 9.81} + 0.0446} * 100$$

$$\% \text{Disipación} = 67.97\%$$

La ubicación del punto uno es la abscisa 22.62 en todos los casos

La ubicación del punto dos varía con el caudal y es la siguiente:

$$Q_p = 100\text{m}^3/\text{s} \rightarrow 25.42, \text{ SecciónC-C}$$

$$Q_p = 200\text{m}^3/\text{s} \rightarrow 25.42, \text{ SecciónC-C}$$

$$Q_p = 500\text{m}^3/\text{s} \rightarrow 25.42, \text{ SecciónC-C}$$

$$Q_p = 800\text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{SecciónC-C}$$

$$Q_p = 1130\text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{SecciónC-C}$$

²² Ver pie de página 12 pag. 89, el significado de las variable del cuadro 5.11, se puede observar a continuación del cuadro 5.3, ítem 5.2.2

Para cálculo del porcentaje de disipación de energía se ha procedido de la misma manera indicada para el cuadro 5.3, en el ítem 5.2.2.

Con las últimas alternativas propuestas finalmente se ha obtenido condiciones de disipación apropiadas, un análisis de los resultados se presenta en el capítulo seis.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- De las mediciones realizadas en la abscisa (23.43)²³ del modelo, para los diferentes caudales considerados como representativos, se han obtenido los siguientes resultados del número de Reynolds²⁴, los mismos que se presentan en el cuadro 6.1.

CUADRO 6.1

VALORES MEDIDOS EN EL MODELO Y EXTRAPOLADOS AL PROTOTIPO

Q _{diseño} (m ³ /s)	Calado (y)	V (m/s)	Fr	RH	Re
100	2.14	12.52	2.73	1.26	63100800
200	2.66	14.71	2.88	1.52	89436800
500	4.68	18.38	2.71	2.31	169831200
800	5.62	19.73	2.66	2.55	201246000
1130	7.77	20.29	2.32	2.72	220755200

Elaboración: Fernando Ortega N

Del cuadro 6.1, considerando las unidades del sistema internacional, para obtener el número de Reynolds, se procede de la siguiente manera:

$$Re = \frac{V * 4R_h}{\nu} = \frac{12.52 * 4 * 1.26}{0.000001} = 63100800$$

El valor del número de Reynolds obtenido para los diferentes caudales, es muchísimo mayor al valor de $Re_o = 1 \times 10^5$, considerado como el mínimo para que la influencia del número de Reynolds se minimice y de esta manera satisfacer a la vez los requerimientos de un modelo de Froude y Reynolds, y de la ecuación 2.40, como es el caso del estudio objeto de la presente investigación.

²³ Ver Figura 3.3 para ubicación de abscisa

²⁴ La ecuación para determinar el número de Reynolds corresponde a la Ec.2.13

- Al resultar los valores del número Reynolds mayores al valor de 1×10^5 , las características del flujo en modelo y prototipo cumplen con la similitud de Froude y por lo tanto los porcentajes de disipación de energía son similares.
- De acuerdo con el análisis realizado en 2.4.1, la escala del modelo y disipadores (1:50) es apropiada para todos los caudales considerados como representativos en el proyecto y por lo tanto, los resultados obtenidos satisfacen la similitud del flujo.
- Como se puede observar en la tabla 6.1, el calado más bajo corresponde al caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ y es de 2.14m en prototipo y su equivalente en el modelo es de 4.28cm, valor que resulta mayor al mínimo de 3cm que sugiere la literatura técnica para despreciar los efectos de la tensión superficial. Por lo expuesto en el modelo físico de los disipadores de energía analizados, no se tendrá deformación en los resultados por efecto de la tensión superficial y por lo tanto, no ha sido necesario construir un modelo distorsionado geoméricamente.
- De acuerdo con la figura 2.4, el coeficiente de fricción es ligeramente mayor en el modelo con respecto al prototipo, situación que se debe tomar en cuenta al momento de analizar el porcentaje de disipación de energía, ya que los resultados en el prototipo consecuencia de la extrapolación del modelo serán pequeñamente favorables con relación a los de la naturaleza.
- La disipación de energía por medio del disipador del Salto en Esquí, se produce mayormente por la mezcla agua-aire y en esta mezcla está garantizada su similitud con el prototipo al usar un modelo de Froude. El tamaño de las burbujas de aire en la emulsión presentada será mayor en modelo que en prototipo, pero esta situación no altera los efectos de disipación.
- Con las dos alternativas de disipación propuestas, se obtiene satisfactorios porcentajes de disipación y resultados favorables, de tal modo que es posible asumir cualquiera de las dos alternativas para construir en el proyecto hidroeléctrico Sopladora, considerando las siguientes ventajas y desventajas que ambos tipos poseen:

Ventajas del Salto en Sky:

- La estructura del Salto en Sky es más pequeña comparada con la del tipo IV, por lo tanto los costos de construcción son menores.
- No es necesario pre-excavar el cuenco, ya que se formaría automáticamente con el funcionamiento de éste.
- Se aprovecha el estrechamiento natural existente en el cauce del río

Desventajas del Salto en Sky:

- La dificultad de conocer con exactitud la granulometría del cauce del río, puede provocar una variación del comportamiento en el prototipo con respecto a los obtenidos en el modelo.

Ventajas del dissipador tipo IV:

- La mayor disipación de energía se consigue dentro de la estructura de disipación, al contrario que en el Esquí, en el cual la energía se disipa en el cauce del río, de este modo en el dissipador tipo IV se protege el cauce natural.
- Colocando simples accesorios se logra mejorar o adecuar las condiciones de la disipación.

Desventajas del dissipador tipo IV:

- La estructura es grande y costosa

6.1.1 SALTO EN ESQUÍ

Previo a emitir las conclusiones es importante recordar algunas características en cuanto al dissipador de Salto en Esquí.

- La alternativa SE1, representa el Esquí con un radio de curvatura de 75.9cm en el modelo y un ángulo a la salida del Esquí de 35°, cuyo diseño corresponde al caudal del prototipo de 1130 m³/s.

- La alternativa SE2, representa el Esquí con un radio de curvatura de 75.9cm en el modelo y un ángulo a la salida del Esquí de 27°, cuyo diseño corresponde al caudal del prototipo de 1130 m³/s.
- La alternativa SE3, representa el Esquí con un radio de curvatura de 23cm en el modelo y un ángulo a la salida del Esquí de 35°, cuyo diseño corresponde al caudal del prototipo de 500 m³/s.
- La alternativa SE4 es igual a la alternativa SE3, con la diferencia que el Esquí empieza a la salida del túnel de desvío en la abscisa 25.04.

6.1.1.1 Disipación De Energía Con El Disipador Tipo Salto En Esquí

- **En la alternativa SE1**, la cota del labio del esquí ha sido determinante, de modo que se ha convertido en una estructura de control para el flujo aguas arriba del esquí.
- El problema del control que se ha presentado en la alternativa SE1, ha sido por causa que el disipador fue diseñado para el caudal máximo referido al prototipo ($Q = 1130 \text{ m}^3/\text{s}$), debido a esta característica del disipador se ha podido observar, que el caudal mínimo de funcionamiento del esquí ha sido $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y para los caudales menores simplemente el esquí ha dejado de funcionar.
- **En la alternativa SE2**, se ha cortado la estructura del modelo en Esquí de la alternativa SE1, de modo que se ha obtenido una cota del labio del Esquí menor en 5cm, con lo cual ha mejorado considerablemente la eficiencia del disipador, presentándose un resalto hidráulico dentro del túnel para los caudales en prototipo entre $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $Q= 330 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir conforme se aumenta el caudal de prueba, el resalto hidráulico se rechaza progresivamente.
- **En la alternativa 3**, el funcionamiento ha sido similar al de la alternativa SE2, es decir se ha presentado resalto hidráulico para los caudales bajos.
- La longitud del chorro o el alcance máximo del chorro, de acuerdo a la literatura técnica depende entre otros, de la velocidad aguas arriba del salto en Esquí y del ángulo del deflector. La teoría del alcance máximo ha sido posible ratificar que depende de la velocidad, conforme a los resultados obtenidos, mientras que la influencia del ángulo del deflector no

ha sido posible comprobarla, ya que al variar el ángulo varía también la velocidad aguas arriba.

- En el capítulo 5, se puede observar cuadros en los que se resume la disipación de energía. La energía medida depende de la sección en donde se toman las medidas, del recorrido del flujo, de la rugosidad del fondo que es igual para todos los casos en el presente disipador, entre otros. El final de la turbulencia, es variable con el caudal por ello en la alternativa SE3 se ha medido la energía en diferentes puntos lo más cerca al final de la turbulencia y en la alternativa SE4, se ha considerado una sección constante, ambos criterios son válidos, en el primero la energía medida no incluye mayores pérdidas por fricción en el tramo natural del río, pero la energía se distorsiona por la variación de secciones y viceversa en el segundo caso. En ambos la energía disipada medida no es toda por influencia de la estructura disipadora, pero da una pauta de la eficiencia del disipador.
- Tanto en la alternativa SE3 como en la SE4, la energía disipada es mayor para los caudales inferiores al caudal de diseño ($500\text{m}^3/\text{s}$) y menor para los caudales mayores al de diseño.
- En los caudales de $100\text{m}^3/\text{s}$ y $200\text{m}^3/\text{s}$ tanto en la alternativa SE3 como en la SE4, existe doble disipación, la una es debido al resalto hidráulico y la otra por la influencia del salto en Esquí (mezcla agua-aire y turbulencia en el cuenco de socavación).
- En ambas alternativas la energía disipada es muy cercana al 80%
- La alternativa SE4 es la más conveniente para el proyecto hidroeléctrico sopladora por la eficiencia del disipador y por las condiciones del terreno.

6.1.1.2 Cuenco De Socavación En El Disipador Tipo Salto En Esquí

- El Esquí con la alternativa SE1, produce un menor cuenco de socavación tanto en las dimensiones en planta como en profundidad. Este resultado en cuanto a las dimensiones en planta se puede atribuir a que a mayor ángulo del deflector menor es la componente horizontal de la velocidad y por lo

tanto se produce una menor longitud del cuenco de socavación, pero este concepto no tiene fundamento físico al momento de analizar la profundidad de socavación, ya que en esta alternativa (SE1) debería producirse la mayor profundidad, esta contradicción la asumimos a la reducción de la velocidad inmediatamente aguas arriba del salto, por efecto de la mayor elevación del labio del Esquí con respecto a las demás alternativas. Resultados que se pueden observar en los cuadros de datos del capítulo 5.

- Conforme con la conclusión anterior, no es posible comparar la relación existente entre la geometría del cuenco de socavación y el ángulo del deflector, ya que cuando se ha variado el ángulo, también se ha variado la elevación del labio del Esquí, influyendo de este modo en la velocidad del flujo.

- La influencia de la velocidad en la geometría del cuenco de socavación tanto en planta como en elevación, es posible evidenciar en los resultados obtenidos, ya que a menor velocidad se observa menores dimensiones del cuenco. La elevación del labio del Esquí, es otra característica que podemos relacionar con la geometría del cuenco de socavación, ya que de acuerdo a los resultados a mayor elevación menores dimensiones del cuenco resultan, esta última característica está relacionada con la velocidad, ya que a mayor elevación menor velocidad.

- En caudales bajos, las dimensiones en profundidad de socavación difieren en valores muy pequeños, los cuales no se los puede apreciar con el método de medición adoptado.²⁵

- En la alternativa SE4, se ha colocado una masilla de cemento en el cuenco formado con el caudal de $500\text{m}^3/\text{s}$, de lo que se observa que fijando el cuenco de socavación con un material cementante, la socavación producida con los caudales mayores a los $500\text{m}^3/\text{s}$ es mínima comparando con el cuenco producido sin el material cementante.

- Los resultados experimentales del cuenco de socavación resultan inferiores a los teóricos, conforme se puede observar en la sección 5.4.1.4

²⁵ Revisar instrumentos de medición de Ref.5

6.1.2 DISIPADOR TIPO IV DE BUREAU OF RECLAMATION

- Al igual que lo mencionado para el disipador en Esquí, la energía obtenida depende de la sección en donde se toman las medidas, del recorrido del flujo, de la rugosidad del fondo, entre otros. El final del resalto hidráulico se ubica dentro del colchón disipador para los caudales de $100\text{m}^3/\text{s}$, $200\text{m}^3/\text{s}$ y $500\text{m}^3/\text{s}$ y fuera de este para los caudales de $800\text{m}^3/\text{s}$ y $1130\text{m}^3/\text{s}$, por este motivo en los cuadros de disipación 5.3 y 5.12, se observa dos porcentajes de disipación para los tres primeros caudales y uno para los dos últimos. El primer porcentaje corresponde a la disipación medida entre un punto inmediatamente aguas arriba de la estructura de disipación y un punto dentro del colchón después del resalto hidráulico, el segundo porcentaje corresponde a la disipación medida entre el mismo punto uno, mencionado anteriormente y una sección del río constante. Es necesario aclarar, que solamente es posible comparar la energía disipada cuando ha sido medida en la misma ubicación. Al igual que en el primer disipador la energía disipada medida no es toda por influencia de la estructura disipadora, pero nos da una idea de la eficiencia del disipador.
- Al aumentar la profundidad del colchón disipador y colocar una viga dentro de este colchón se ha logrado sumergir el resalto hidráulico y de este modo disminuir la longitud del resalto hidráulico y consecutivamente los costos de construcción, a pesar que con el resalto sumergido la disipación de energía es menor.
- Una de las pruebas realizadas previo a definir la ubicación de la viga intermedia, ha sido colocar la viga asentada en el fondo, resultando un resalto hidráulico un poco más rechazado que el resultante con la ubicación definida en la alternativa IV2, esto es atribuible al choque de las corrientes superior e inferior que se logra con la alternativa IV2.
- Analizando la energía medida al final del resalto hidráulico dentro del colchón disipador para los caudales de $100\text{m}^3/\text{s}$, $200\text{m}^3/\text{s}$ y $500\text{m}^3/\text{s}$, en la alternativa IV.1, podemos darnos cuenta que la energía disipada es inversa al caudal, a menor caudal existen mayor disipación y a mayor caudal menor disipación.

- Analizando la energía medida en una sección del río constante para todos los caudales en la alternativa IV.1, podemos notar que la energía disipada es inversa, a menor caudal existe mayor disipación y a mayor caudal menor disipación, resultando la disipación más baja para el caudal del diseño ($1130\text{m}^3/\text{s}$).
- Analizando la energía medida al final del resalto hidráulico dentro del colchón disipador para los caudales de $100\text{m}^3/\text{s}$, $200\text{m}^3/\text{s}$ y $500\text{m}^3/\text{s}$, en la alternativa IV.2, podemos darnos cuenta que la energía disipada es inversa al caudal, a menor caudal existe mayor disipación y a menor caudal mayor disipación.
- Analizando la energía medida en una sección del río constante para todos los caudales en la alternativa IV.2, se puede notar que la energía disipada es inversa, a menor caudal existe mayor disipación y a mayor caudal menor disipación, resultando la disipación más baja para el caudal del diseño ($1130\text{m}^3/\text{s}$).
- Comparando la energía disipada, medida al final del resalto hidráulico dentro del colchón disipador para los caudales de $100\text{m}^3/\text{s}$, $200\text{m}^3/\text{s}$ y $500\text{m}^3/\text{s}$, entre la alternativa IV.1 y IV.2, podemos determinar que en la alternativa IV.2 la energía disipada es ligeramente mayor con respecto a la alternativa IV.1, lo cual no tiene fundamento físico, ya que en la alternativa IV.2, por la presencia de una viga y la profundización del fondo, el resalto hidráulico es mayormente sumergido que el resalto hidráulico de la alternativa IV.1. La razón de esta aparente incongruencia, se debe al sitio de medición de la energía, ya que no es posible medir con exactitud a una distancia igual desde el final del resalto.
- El mismo efecto del párrafo anterior se produce para la energía disipada medida en una sección del río, para todos los caudales.
- La energía disipada en las dos alternativas es satisfactoria y suficiente para cumplir con los requerimientos del flujo en la restitución a su cauce natural.
- La alternativa IV.2 del disipador tipo IV del Bureau of Reclamation, es la más conveniente para el proyecto hidroeléctrico sopladora entre las dos alternativas de este tipo de disipador, tanto por la eficiencia del disipador como por las condiciones del terreno.

6.2 RECOMENDACIONES

- En vista que las dos estructuras disipadoras propuestas generan un buen porcentaje de disipación, se recomienda el uso de la estructura tipo Salto en Esquí, bajo el sustento económico.
- Para el disipador en Esquí, se recomienda pre-excavar el cuenco y colocar hormigón de alta resistencia para simular la masilla colocada en el modelo y reducir la geometría de este cuenco.
- Para el disipador tipo IV, se recomienda conformar el terreno de tal modo que el suelo no sobrepase la altura del umbral diseñado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- ARGUELLO NUÑEZ, W. (1991). 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. Escuela politécnica Nacional.
- 2.- BUREAU OF RECLAMATION. Engineering Monograph 25.
- 3.- CARRERA, J. LARA, V. (2010). Estudio en Modelo Hidráulico del túnel de Desvío y el Túnel de Descarga Intermedia de la central Hidroeléctrica Sopladora. Escuela politécnica Nacional.
- 4.- CASTILLO ELSITDIÉ, L. (1987) Dispadores de Energía.
- 5.- CASTILLO, S. (2011). Estudio experimental de dos alternativas de disipadores de energía a la salida del túnel de desvío del proyecto Sopladora II. Escuela Politécnica Nacional.
- 6.- CHOW, Ven Te. (1994). Hidráulica de Canales Abiertos. Mc.Graw-Hill.
- 7.- DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL. (2009). Informe fase uno del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la central hidroeléctrica Sopladora. Escuela Politécnica Nacional.
- 8.- ELEVATORSKY, E.A. (1959), Hydraulic Energy Dissipators. Mc.Graw-Hill. New York.U.S.A.
- 9.- FUENTES AGUILAR, Ramón, (2002), “Modelos Hidráulicos: Teoría y Diseño”.
- 10.- HEMUTL, Kobus, (1980), “HydraulicModelling”
- 11.- NAUDASCHER, (2001), Hidráulica de Canales, Segunda Reimpresión, Limusa.
- 12.- VISCHER Y HAGER, D.L Y W.H, (1995), “Energy Dissipators”, Netherlands.

ANEXOS

ANEXO A.1

**PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA ALTURA DE FLUJO
CON PRESENCIA DE ONDAS POR EFECTO DE
CAMBIOSGRADUALES DE DIRECCIÓN**

CUADRO A1.1**ITERACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE FLUJO A LO LARGO DE LA TRANSICIÓN, HACIENDO USO DE LAS ECUACIONES 4.1, 4.2 Y 4.3**

θ_1	Fr	Θ	$\theta+\theta_1$	y/Ho	β
42.23	2.38	-4.118	38.112	0.261	24.84
38.112	2.71084	-3.091	35.021	0.214	21.64
35.021	3.0033584	-3.091	31.93	0.181	19.45
31.93	3.34608414	-4.118	27.812	0.152	17.39
27.812	3.91071058	-5.143	22.669	0.116	14.81
22.669	4.88654907	-4.118	18.551	0.077	11.81
18.551	6.0396795	-6.164	12.387	0.052	9.53
12.387	9.1616214	-6.164	6.223	0.023	6.27

Elaboración: Fernando Ortega N.

El cálculo de los valores de la tabla A1.1, requiere previamente del número de Froude en un punto anterior a la transición, para obtener este Froude se ha medido en modelo, la velocidad y calado en la abscisa 23.43, para un caudal en prototipo de 1130m³/s, de lo que ha resultado una velocidad y un calado referidos al prototipo de 20.49 m/s y 7.585m respectivamente.

Con estos valores obtenidos se calcula el número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \text{ (Ec. 7.1)}$$

$$Fr = \frac{20.49}{\sqrt{9.81 \cdot 7.585}} = 2.38$$

Luego por medio de la Ec. 4.1, con $\theta=0$, $Fr=2.38$, obtenemos el primer valor de θ_1 .

El segundo valor de θ , se obtiene del gráfico 4.1, pero debido a que las líneas de perturbación para este caso son divergentes, el incremento del ángulo θ es negativo.

El valor de y/H_0 , se obtiene con la Ec. 4.2, y el de β con la Ec. 4.3.

El valor de θ_1 de la segunda y demás iteraciones corresponde al valor de $\theta+\theta_1$, de la anterior iteración.

Para obtener el valor del calado donde existe una onda cruzada al final de la transición, se divide el último valor de y/H_0 de la tabla 4.1 para el primer valor de y/H_0 de la misma tabla, con lo cual se obtiene:

$$\frac{y_2}{H_0} = \frac{0.023}{0.261}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.088$$

$$y_2 = 0.088 * y_1$$

$$y_2 = 0.088 * 7.585$$

$$y_2 = 0.66 \text{ m}$$

Este resultado es necesario compararlo con el calado normal en la sección tipo baúl de 18m de ancho, para lo cual se tiene:

$$\frac{Q * n}{l_0^{1/2}} = \frac{(b * y_0)^{5/3}}{(b + 2y_0)^{2/3}} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

En donde:

Q= caudal en m/s

l_0 = pendiente del canal

b = ancho del canal (m)

y_0 = calado normal (m)

n = coeficiente de rugosidad de Manning, para hormigón en este caso.

$$\frac{1130 * 0.013}{0.02^{1/2}} = \frac{(18 * y_0)^{5/3}}{(18 + 2y_0)^{2/3}}$$

$$103.87 = \frac{(18 * y_0)^{5/3}}{(18 + 2y_0)^{2/3}}$$

Por tanteo se calcula y_0 , y se tiene: $y_0 = 3.2368 \text{ m}$.

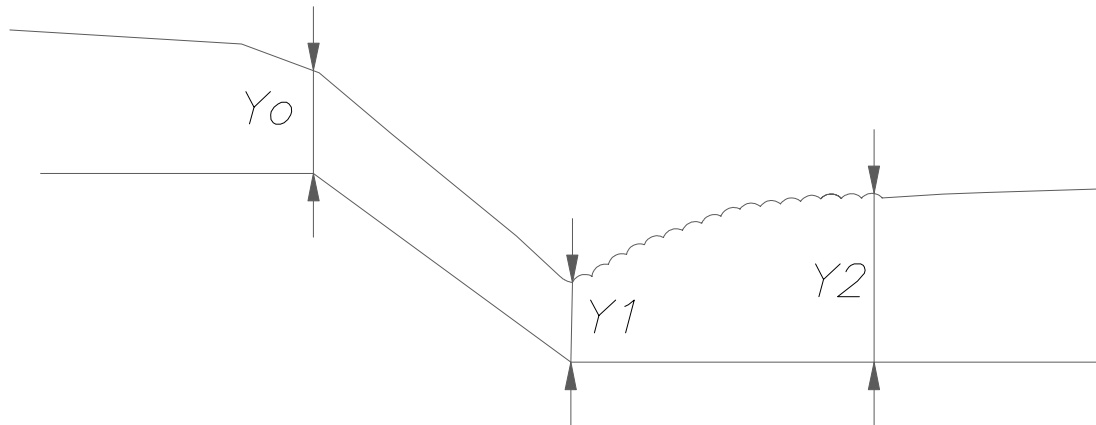
De este resultado se concluye que no existe efecto de ondas cruzadas al final de la transición.

ANEXO A.2

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL ESCALÓN Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO, AL PIÉ DEL RESALTO EN EL CUENCO TIPO IV DEL BUREAU OF RECLAMATION

GRÁFICO A.1.1

ESQUEMA DE INCÓGNITAS PARA CÁLCULO DE ESCALÓN



Elaboración: Fernando Ortega N.

$$S = \frac{s}{Y_0} = 2$$

Siendo s la altura del escalón negativo y Y_0 la altura de flujo inmediatamente aguas arriba del escalón (gráficoA1.1)

De esta ecuación se deduce que la altura del escalón es igual a dos veces el valor de Y_0 .

$$s = 2 \cdot Y_0$$

Una vez definida la altura del escalón, se desarrolla la ecuación de energía entre los puntos (0) y (1) del gráficoA1.1, despreciando las pérdidas como sugiere la teoría.

$$E_0 = E_1$$

$$Z_0 + Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \text{ Ec. (7.2)}$$

En donde:

Z_0 : Carga de posición de la sección aguas arriba

y_0 : carga de presión aguas arriba. (Figura 4.3)

$\frac{V_0^2}{2g}$: Carga de velocidad en la sección aguas arriba

Z1: carga de posición de la sección aguas abajo

y_1 : carga de presión aguas abajo. (Figura 4.3)

$\frac{v_1^2}{2g}$: carga de velocidad en la sección aguas abajo

Una vez definidos los términos y calculando los mismos para las condiciones de flujo uniforme, se desarrolla la ecuación 7.2, de lo cual resulta:

$$2 * y_1 + 3.23 + \frac{19.4^2}{19.62} = 0 + y_1 + \frac{q^2}{2g * y_1^2} \quad q: \text{caudal unitario} = Q/B$$

$$2 * y_1 + 3.23 + 19.18 = y_1 + \frac{200.87}{y_1^2}$$

$$y_1^3 + 22.41 * y_1^2 - 200.87 = 0$$

$$y_1 = 2.81m$$

Conocido el calado en este punto, se determina el número de Froude al pie del resalto hidráulico, para lo cual primeramente se obtiene la velocidad media teórica en el punto uno de la figura A1.0

$$V_1 = \frac{1130}{18 * 2.81} = 22.34m/s$$

$$Fr_1 = \frac{22.34}{\sqrt{9.81 * 2.81}} = 4.25$$

ANEXO A.3

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA UBICACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO

UBICACIÓN TENTATIVA DEL RESALTO HIDRÁULICO EN EL

DISIPADOR TIPO IV

Para cumplir con este objetivo primeramente se compara las fuerzas específicas aguas arriba y aguas abajo del resalto hidráulico y de esta manera determinar si el resalto es sumergido o rechazado.

FUERZA ESPECÍFICA AGUAS ARRIBA:

$$M_1 = P_1 + \rho * Q * V_1 \text{ (Ec. 7.3)}$$

$$M_1 = \frac{\gamma * y_1^2 * B}{2} + \rho * Q * V_1$$

M_1 = Fuerza específica al pie del escalón

P_1 = Fuerza de empuje al pie del escalón

ρ = Densidad del agua

Q = Caudal

V_1 = Velocidad media del flujo al pie del escalón²⁶

Y_1 = Calado al pie del escalón²⁷

B = Ancho del cuenco disipador

$$M_1 = \frac{9810 * 2.81^2 * 18}{2} + 1000 * 1130 * 22.34$$

$$M_1 = 25'941'346.67 \text{ N}$$

FUERZA ESPECÍFICA AGUAS ABAJO:

Para el cálculo de la fuerza específica aguas abajo, es necesario conocer el calado en el tramo del río inmediatamente después de la descarga, para ello por

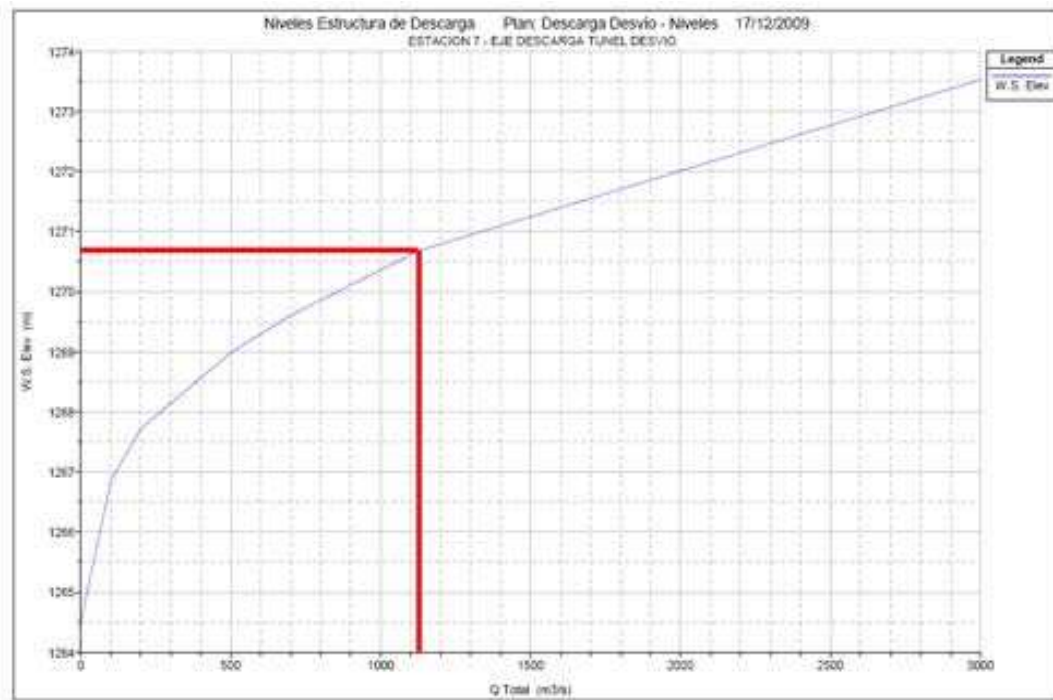
²⁶El valor de V_1 , se obtiene de los cálculos realizados en A.2

²⁷El valor de Y_1 , se obtiene de los cálculos realizados en A.2

medio de la curva de descarga obtenida por el Consorcio Gerencia Mazar (Ref.7), la misma que se presenta en la figura A2.0

FIGURA A.2.1

CURVA DE DESCARGA EN EL TRAMO DEL RÍO PAUTE, AL FINAL DEL TÚNEL DE DESVÍO



Fuente: Informe del estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío de la Central Hidroeléctrica Sopladora, E.P.N., (2011).

Elaboración: Fernando Ortega N.

En la figura A2.1, se puede observar que la cota del nivel de agua para el Caudal de $1130 \text{ m}^3/\text{s}$, es de 1270.65 m . El calado aguas abajo se lo obtiene de la figura A2.1, y resulta de la diferencia entre el nivel de agua y el nivel del terreno, de donde: $y_2 = 1270.65 - 1264 = 6.65 \text{ m}$

Como referencia, la cota base del cuenco disipador es 1254.61 m

$$M_2 = P_2 + \rho * Q * V_2$$

$$M_2 = \frac{\gamma * y_2^2 * B}{2} + \rho * Q * \frac{Q}{A_2} \quad (\text{Ec.4.6})$$

M_2 = Fuerza específica al final del R.H.

P_2 = Fuerza de empuje al final del R.H.

ρ = Densidad del agua.

Q = Caudal.

V_2 = Velocidad media del flujo al final del R.H.

Y_2 = Calado al final del R.H. (de la curva de descarga) = 6.65m

B = Ancho medio de la sección de río = 30.28m

A_2 = Área de la sección mojada en el río

$$M_2 = \frac{9810 * 6.65^2 * 30.28}{2} + 1000 * 1130 * \frac{1130}{189.23}$$

$$M_2 = 13'315949.02$$

Como $M_1 > M_2$, esto quiere decir que el resalto hidráulico es rechazado.

Valiéndonos de ecuación 1.1 calculamos el calado conjugado aguas abajo.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_1^2} - 1 \right) \text{ (Ec.1.1)}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * 4.25^2} - 1 \right)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 5.53$$

$$Y_2 = 5.53 * 2.81$$

$$Y_2 = 15.54\text{m}$$

El valor de 15.54m, resulta bajo el supuesto que el resalto hidráulico se desarrolla totalmente dentro del cuenco disipador, con un mismo nivel de fondo, pero para el presente caso, se ha supuesto lo contrario, que el resalto hidráulico se inicia en el cuenco disipador y termina en el río Paute, por lo tanto para conocer el calado aguas abajo es necesario determinar la cota de la superficie de agua calculada, para ello sumamos los 15.54m obtenidos, la cota de la base del cuenco que es 1254.61m, de esta suma resulta 1270.15m, que sería la cota de la superficie de agua calculada, y a este valor le restamos la cota de la superficie de terreno en el río cuyo valor según la figura A2.0 es 1264m, por lo tanto $(1270.15 - 1264 = 6.15\text{m})$, el valor de 6.15m sería el valor del calado conjugado calculado aguas abajo.

Habiendo resultado el calado conjugado aguas abajo ($y_2=6.15\text{m}$) menor al valor real de 6.65m , se concluye que debe existir primero un remanso y luego se produce el resalto hidráulico, para determinar el valor real del calado conjugado aguas arriba (y_1) se lo hace valiéndose de la misma ecuación 1.1, pero en función del número de Froude al final del resalto hidráulico F_2 .

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F_2^2} - 1 \right)$$

$$F_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g y_2}}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{1130}{189.23} = 5.97 \text{ m/s}$$

$$F_2 = \frac{5.97}{\sqrt{9.81 \cdot 6.25}}$$

$$F_2 = 0.76$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \cdot 0.76^2} - 1 \right)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = 0.685$$

$$y_1 = 0.685 \cdot 6.25$$

$$y_1 = 4.28 \text{ m}$$

En donde toda la simbología ha sido indicada anteriormente.

Interpretando este resultado se puede conocer, que partiendo del calado de 2.81m se presenta un remanso del tipo H_3 hasta llegar al calado de 4.28m y a partir de ahí se produce el resalto hidráulico, por lo tanto previo a establecer la ubicación del R.H., primeramente debemos conocer la longitud del remanso y finalmente la longitud del resalto hidráulico. El cálculo de la longitud del remanso se ha realizado por medio de método de Bakhmeteff y con una pendiente mínima de 0.0000001 .

Resultando una longitud del remanso de 30.2m en el prototipo que equivale a 0.60m en el modelo.

LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO:

La referencia tres, con respecto a la longitud del resalto hidráulico con un escalón negativo dice:

“La longitud relativa del remolino del resalto $\lambda_r = L_r / h_1$ es diferente para cada tipo de resalto pero puede aproximarse con la expresión siguiente:”

$$\lambda_r = -5 + 5 * S + \frac{8(Fr_1 - 1)}{1 + (0.15 * S)^2} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$\lambda_r = -5 + 5 * 2 + \frac{8(4.25 - 1)}{1 + (0.15 * 2)^2} = 28.8532$$

$$L_r = 28.8532 * 2.81$$

$$L_r = 81m$$

Conocidas la longitud del remanso y la del resalto hidráulico, se establece que desde el pie del escalón el resalto terminará a una distancia de 111.20m en el prototipo y de 2.22m en el modelo.

ANEXO A.4

CUADROS DE RESULTADOS DE ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y TEÓRICO DE LOS CUENCOS DE SOCAVACIÓN

CUADRO A4.1

DISEÑO TEÓRICO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN EN PROTOTIPO

Autor de la ecuación	Q prototipo (m ³ /s)	q. Aproximación (m ³ /s/m)	Carga de energía de aproximación (m)	Ángulo de salida (Φ°)	Ángulo de llegada (α°)	d ₉₀ (m)	d _n (m)	Calado en el Sky (h _o) (m)	Vel. Aproximación (m/s)	# Froude	ys (m)	Calado aguas abajo (h _c) (m)	Altura neta de socavación (T=ys-hr) (m)
Veronese	1130	125.55	25.5	35	45	-	-	-	-	-	37.9	6.25	31.6
	1130	125.55	25.5	27	38	-	-	-	-	-	33	6.25	26.71
	800	88.89	22.35	35	45	-	-	-	-	-	30.5	5	25.49
	800	88.89	22.35	27	38	-	-	-	-	-	26.6	5	21.55
	500	55.56	17.8	35	45	-	-	-	-	-	22.5	4.5	17.98
	500	55.56	17.8	27	38	-	-	-	-	-	19.6	4.5	15.07
	200	22.22	8.59	35	45	-	-	-	-	-	11.6	3.25	8.38
	200	22.22	8.59	27	38	-	-	-	-	-	10.1	3.25	6.88
	100	11.11	7.17	35	45	-	-	-	-	-	7.68	2.35	5.33
100	11.11	7.17	27	38	-	-	-	-	-	6.69	2.35	4.34	
C. Wu	1130	125.55	25.5	-	-	-	-	-	-	-	28.4	6.25	22.12
	1130	125.55	25.5	-	-	-	-	-	-	-	28.4	6.25	22.12
	800	88.89	22.35	-	-	-	-	-	-	-	23.1	5	18.06
	800	88.89	22.35	-	-	-	-	-	-	-	23.1	5	18.06
	500	55.56	17.8	-	-	-	-	-	-	-	17.2	4.5	12.7
	500	55.56	17.8	-	-	-	-	-	-	-	17.2	4.5	12.7
	200	22.22	8.59	-	-	-	-	-	-	-	9.08	3.25	5.83
	200	22.22	8.59	-	-	-	-	-	-	-	9.08	3.25	5.83
	100	11.11	7.17	-	-	-	-	-	-	-	6.11	2.35	3.76
100	11.11	7.17	-	-	-	-	-	-	-	6.11	2.35	3.76	
Iranisseevich Macahdo	1130	125.55	25.5	35	-	2.5	-	-	-	-	39.5	6.25	33.23
	1130	125.55	25.5	27	-	2.5	-	-	-	-	39.5	6.25	33.23
	800	88.89	22.35	35	-	2.5	-	-	-	-	31.9	5	26.87
	800	88.89	22.35	27	-	2.5	-	-	-	-	31.9	5	26.87
	500	55.56	17.8	35	-	2.5	-	-	-	-	23.5	4.5	18.96
	500	55.56	17.8	27	-	2.5	-	-	-	-	23.5	4.5	18.96
	200	22.22	8.59	35	-	2.5	-	-	-	-	11.8	3.25	8.55
	200	22.22	8.59	27	-	2.5	-	-	-	-	11.8	3.25	8.55
	100	11.11	7.17	35	-	2.5	-	-	-	-	7.88	2.35	5.53
100	11.11	7.17	27	-	2.5	-	-	-	-	7.88	2.35	5.53	
Soloveva	1130	125.55	25.5	35	-	-	1.25	8	19.23	2.17	17.2	6.25	10.96
	1130	125.55	25.5	27	-	-	1.25	7.6	19.23	2.23	17	6.25	10.78
	800	88.89	22.35	35	-	-	1.25	6.25	18.38	2.35	14.3	5	9.33
	800	88.89	22.35	27	-	-	1.25	5.8	18.38	2.44	14.1	5	9.07
	500	55.56	17.8	35	-	-	1.25	5	16.68	2.38	11.4	4.5	6.88
	500	55.56	17.8	27	-	-	1.25	4.5	16.68	2.51	11.1	4.5	6.59
	200	22.22	8.59	35	-	-	1.25	7.25	3.11	0.37	0.93	3.25	-2.32
	200	22.22	8.59	27	-	-	1.25	5.25	3.11	0.43	0.85	3.25	-2.4
	100	11.11	7.17	35	-	-	1.25	3.5	1.83	0.31	0.32	2.35	-2.03
100	11.11	7.17	27	-	-	1.25	3.25	1.83	0.32	0.31	2.35	-2.04	
Chee y Kung	1130	125.55	25.5	-	-	2.5	-	-	-	-	52.70	6.25	46.45
	1130	125.55	25.5	-	-	2.5	-	-	-	-	52.70	6.25	46.45
	800	88.89	22.35	-	-	2.5	-	-	-	-	41.72	5	36.72
	800	88.89	22.35	-	-	2.5	-	-	-	-	41.72	5	36.72
	500	55.56	17.8	-	-	2.5	-	-	-	-	30.07	4.5	25.57
	500	55.56	17.8	-	-	2.5	-	-	-	-	30.07	4.5	25.57
	200	22.22	8.59	-	-	2.5	-	-	-	-	15.00	3.25	11.75
	200	22.22	8.59	-	-	2.5	-	-	-	-	15.00	3.25	11.75
	100	11.11	7.17	-	-	2.5	-	-	-	-	9.54	2.35	7.19
100	11.11	7.17	-	-	2.5	-	-	-	-	9.54	2.35	7.19	

CUADRO A4.1 CONTINUACIÓN

Autor de la ecuación	Q prototipo (m ³ /s)	q. Aproximación (m ³ /s/m)	Carga de energía de aproximación (m)	Ángulo de salida (Φ°)	Ángulo de llegada (α°)	d ₉₀ (m)	d _n (m)	Calado en el Sky (h _o) (m)	Vel. Aproximación (m/s)	# Froude	ys (m)	Calado aguas abajo (h _r) (m)	Altura neta de socavación (T=ys-hr) (m)
Damle	1130	125.55	25.5	-	-	-	-	-	-	-	36.99	6.25	46.45
	1130	125.55	25.5	-	-	-	-	-	-	-	36.99	6.25	46.45
	800	88.89	22.35	-	-	-	-	-	-	-	29.22	5	36.72
	800	88.89	22.35	-	-	-	-	-	-	-	29.22	5	36.72
	500	55.56	17.8	-	-	-	-	-	-	-	21.58	4.5	25.57
	500	55.56	17.8	-	-	-	-	-	-	-	21.58	4.5	25.57
	200	22.22	8.59	-	-	-	-	-	-	-	10.76	3.25	11.75
	200	22.22	8.59	-	-	-	-	-	-	-	10.76	3.25	11.75
	100	11.11	7.17	-	-	-	-	-	-	-	7.19	2.35	7.19
	100	11.11	7.17	-	-	-	-	-	-	-	7.19	2.35	7.19

CUADRO A4.2

SOCAVACIÓN TEÓRICA RELATIVA, EN BASE DISTINTAS ECUACIONES

	Q	1130	800	500	200	100
Veronese (Φ=35):	H/Hv	1.35	1.298	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.48	1.364	1.26	1.35	1.1
C. Wu (Φ=35):	H/Hv	1.35	1.298	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.11	1.032	0.97	1.06	0.9
Iranisseevich (Φ=35):	H/Hv	1.35	1.298	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.55	1.426	1.32	1.37	1.1
Damle (Φ=35):	H/Hv	1.35	1.298	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.45	1.307	1.21	1.25	1.0
Chee y K. (Φ=35):	H/Hv	1.35	1.298	1.26	17.42	42.0
	ys/H	2.07	1.867	1.69	1.75	1.3
Soloveva. (Φ=35):	H/Hv	1.35	1.298	1.26	17.42	42.0
	ys/H	0.25	0.641	0.64	0.11	0.0

	Q	1130	800	500	200	100
Veronese (Φ=27):	H/Hv	1.35	1.30	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.29	1.19	1.10	1.18	0.9
C. Wu (Φ=27):	H/Hv	1.35	1.30	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.11	1.03	0.97	1.06	0.9
Iranisseevich (Φ=27):	H/Hv	1.35	1.30	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.55	1.43	1.32	1.37	1.1
Damle (Φ=27):	H/Hv	1.35	1.30	1.26	17.42	42.0
	ys/H	1.45	1.31	1.21	1.25	1.0
Chee y K. (Φ=27):	H/Hv	1.35	1.30	1.26	17.42	42.0
	ys/H	2.07	1.87	1.69	1.75	1.3
Chee y K. (Φ=27):	H/Hv	1.35	1.30	1.26	17.42	42.0
	ys/H	0.67	0.63	0.62	0.10	0.0

SOCAVACIÓN EXPERIMENTAL:**CUADRO A4.3****SOCAVACIÓN EXPERIMENTAL RELATIVA**

	Q	1130	800	500	200	100
EXPERIMENTAL	H/Hv	1.35295	1.298	1.2552	17.425	42
	ys/H	0.51961	0.4922	0.4354	0.553	0.54

ANEXO A.5

PLANOS DE DISEÑO

**A.5.1 PLANOS DE LAS ALTERNATIVAS DEL DISIPADOR TIPO IV
DEL BUREAU OF RECLAMATION**

ANEXO A.5.2

**PLANOS DE ALTERNATIVAS EN DISIPADOR DEL TIPO SALTO
EN ESQUÍ**

ANEXO A.5.2.1

**CUENCOS DE SOCAVACIÓN PRODUCIDOS EN DISIPADOR DEL
TIPO SALTO EN ESQUÍ**