



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EN MODELO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN AL PIE DE
LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI, PROYECTO
HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL
OPCIÓN HIDRÁULICA**

AUTOR:

CASA TIPÁN EDWIN PATRICIO

TUTOR: DR.- ING. MARCO CASTRO

QUITO-ECUADOR

2012

DEDICATORIA.

El presente trabajo lo dedico a mis padres: Gladys y Segundo, por confiar en mí y haberme dado la oportunidad de seguir una carrera, siendo ellos el pilar fundamental para alcanzar esta meta, a mis hermanos: Byron, Estefanía por su apoyo y motivación para seguir adelante.

Edwin Patricio Casa Tipán

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme salud y paz, agradezco a mis padres que son lo más importante en mi vida.

Agradezco al Dr. Ing. Marco Castro por la colaboración que me brindó en el desarrollo del tema de tesis, y por su enseñanza en el campo de la modelación hidráulica, así como también un agradecimiento a la Ing. Ximena Hidalgo jefa del proyecto por su amable acogida y ayuda para la realización del trabajo en el laboratorio.

Agradezco a mis amigos: Dimitri Dávila, Pablo Paredes, Patricio Ortega y Pablo Vera, de los cuales tuve vivencias muy importantes que me servirán durante la vida profesional y que conjuntamente formamos un excelente equipo de trabajo.

A Donny Aldeán y Milton Güillín por su amistad durante toda la carrera.

El eterno agradecimiento a la Universidad Central del Ecuador, a la facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, también a la Escuela Politécnica Nacional en cuyas instalaciones pude realizar el trabajo de graduación.

Edwin Patricio Casa Tipán

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo, CASA TIPÁN EDWIN PATRICIO en calidad de autor del trabajo de investigación o tesis realizada sobre ESTUDIO EN MODELO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Quito, 18 de Diciembre del 2012.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Casa Tipán Edwin Patricio', is written over a horizontal line.

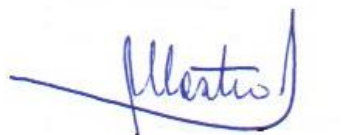
Casa Tipán Edwin Patricio

C.I. 0503333270

CERTIFICACIÓN

En calidad de Tutor del proyecto de Investigación: ESTUDIO EN MODELO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN, Presentado y desarrollado por el señor CASA TIPÁN EDWIN PATRICIO, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, considero que el proyecto reúne los requisitos necesarios.

En la ciudad de Quito, a los 18 días del mes de Diciembre del 2012.



Dr.- Ing. Marco Castro Delgado

TUTOR

INFORME SOBRE CULMINACIÓN DE TESIS

TRABAJO DE GRADUACIÓN:

ESTUDIO EN MODELO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN

TUTOR: Dr.-Ing. Marco Castro Delgado

FECHA: 27 de noviembre de 2012

1. ANTECEDENTES:

El Director de la Carrera de Ingeniería Civil solicita el informe sobre el Plan y Temario del Trabajo de Graduación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil presentado por el señor CASA TIPÁN EDWIN PATRICIO, que versa sobre "ESTUDIO EN MODELO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN".

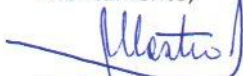
2. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN:

- ❖ El señor estudiante procede a la recolección del material bibliográfico necesario para el desarrollo de la investigación en modelo físico, escala 1:50, de la estructura de disipación de energía al pie de la Presa Toachi. Esta actividad consiste en la recolección y revisión crítica de los textos y de las publicaciones sobre el tema de la modelación física con fondo fijo, con fondo de material suelto y con diferente tamaño de material de protección en el cuenco. Adicionalmente, se revisó toda la información de la investigación previa con otra geometría de los saltos en esquí y del cuenco disipador.
- ❖ Se procede con la construcción y con la calibración del modelo construido en el Laboratorio del CIERHI – EPN.
- ❖ Se procede con la sistematización y ordenamiento de las fórmulas existentes y se llega a establecer la relación funcional a ser recomendada y analizada experimentalmente con ayuda del modelo.
- ❖ Se formula la metodología de cálculo y la correspondiente hoja para el análisis de los resultados experimentales del flujo en el interior y a la salida del cuenco.
- ❖ Se prepara los informes técnicos relacionados con las pruebas bajo una serie de caudales de vertido de la Presa y de los desagües de fondo.
- ❖ Se analiza y se ajustan los resultados experimentales a una función, la misma que es propuesta como representativa del fenómeno físico.

3. CONCLUSIONES:

Se considera que el aporte del trabajo de graduación está en la demostración del uso correcto y adecuado de la técnica de modelación física en la solución de problemas particulares del diseño de aprovechamientos hidroeléctricos.

Atentamente,



Dr.-Ing. Marco Castro Delgado
Profesor Principal
TUTOR



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA
SECRETARÍA

RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

CARRERA DE Ingeniería Civil

Quito, diciembre 12 de 2012

Señor CASA TIPAIN Edwin Patino

Tema: ESTUDIO EN MODELO DEL CUENCO Y SU SITUACION

AL RIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA

PRESA TOACHA, PROYECTO HIDROELECTRICO TOACHA-PILATON

CALIFICACIÓN:

TRIBUNAL	PROFESOR (A)	NOTA SOBRE VEINTE		FIRMA
		NUMERO	LETRAS	
PROFESOR TITULAR	<u>Salomón JAYA</u>	<u>20</u>	<u>Veinte</u>	
PROFESOR TITULAR	<u>Jaiue GUTIERREZ PADILLA</u>	<u>20</u>	<u>VEINTE</u>	
PROMEDIO		<u>20</u>	<u>VEINTE</u>	

Dra. Katheryne Carrión Valdivieso
SECRETARIA ABOGADA (E)

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL	iv
CERTIFICACIÓN	v
HOJA DE APROBACIÓN DEL TUTOR	vi
RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABLAS	xviii
LISTA DE GRÁFICOS	xx
LISTA DE FOTOGRAFÍAS	xxi
LISTA DE PLANOS	xxiv
RESUMEN	xxv
ABSTRACT	xxvi
CAPITULO 1	- 1 -
INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN.....	- 1 -
1.1.1 APROVECHAMIENTO TOACHI-ALLURIQUÍN	- 3 -
1.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL E INFORMACIÓN DE BASE.....	- 6 -

1.3 PLAN DE OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS Y DEL CUENCO PREEXCAVADO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	- 8 -
1.4 HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE SOCAVACIÓN.....	- 9 -
1.5 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO....	- 10 -
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO.....	- 10 -
CAPITULO 2	- 11 -
DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO Y ANÁLISIS TEÓRICO SOBRE EL PROCESO DE SOCAVACIÓN DE UN CUENCO AL PIE DE UN CHORRO.....	- 11 -
2.1 ANÁLISIS TEÓRICO BÁSICO SOBRE EL CHORRO DE SALIDA DESDE EL SALTO EN EL ESQUÍ.....	- 11 -
2.1.1 PARAMETROS PARA EL DISEÑO DEL SALTO EN ESQUÍ.....	- 11 -
2.1.2 ALCANCE Y ALTURA MÁXIMA DEL CHORRO.....	- 13 -
2.2 ANÁLISIS DE LA DIFUSIÓN DEL CHORRO EN LA MASA DE AGUA TRANQUILA.....	- 16 -
2.3 GENERALIDADES SOBRE LAS ZONAS DE RECIRCULACIÓN EN EL CUENCO AMORTIGUADOR.....	- 21 -
2.4 DESARROLLO, PROFUNDIDAD Y UBICACIÓN DEL FOSO SOCAVADO AL PIE DE LA PRESA.....	- 21 -
2.4.1 DESARROLLO DEL FOSO SOCAVADO.....	- 21 -
2.4.2 PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL FOSO SOCAVADO.....	- 23 -
2.4.3 CLASIFICACIÓN GLOBAL DE LA ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN.....	- 29 -

2.4.4 UBIACIÓN DE LA FOSA DE SOCAVACIÓN.....	30 -
2.4.5 LONGITUD DEL FOSO (L)	34 -
2.4.6 ANCHO DEL FOSO (A)	34 -
2.5 CONCLUSIONES.....	35 -
CAPITULO 3	36 -
ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO DE SOCAVACIÓN POR IMPACTO DEL CHORRO DE AGUA EN UN CUENCO DE MATERIAL SUELTO.	36 -
3.1 BASES DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA.	36 -
3.2 BASES DE LA SIMILITUD CINEMÁTICA.....	36 -
3.3 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA.....	37 -
3.3.1 SIMILITUD DE FROUDE.	37 -
3.3.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL.	40 -
3.4 SIMILITUD DINÁMICA EXACTA.	46 -
3.4.1 EFECTOS DE ESCALA	46 -
3.5 JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA LONGITUDINAL DEL MODELO EXISTENTE.	46 -
3.6 CONCLUSIONES.....	48 -
CAPITULO 4	50 -
DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL MODELO FÍSICO EXISTENTE Y DE LAS VARIANTES	50 -
4.1 GENERALIDADES	50 -
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO EXISTENTE	50 -
4.2.1 COMPONENTES DE LA ZONA DE INGRESO	50 -

4.2.2 MODELO FÍSICO DE LA PRESA TOACHI	- 52 -
4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE DEFLECTORES CONSTRUIDOS SOBRE EL ESQUÍ DEL VERTEDERO.....	- 59 -
4.3.1 DELECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL: DEFLECTOR RANURADO....	- 60 -
4.3.2 ALTERNATIVA “A”: ESQUÍ CON PAREDES CONVERGENTES....	- 61 -
4.3.3 ALTERNATIVA “A – 1”: PARED CONVERGENTE EN LA MARGEN DERECHA DEL ESQUÍ.	- 62 -
4.3.4 ALTERNATIVA “B”: DEFLECTORES DE ALTURA VARIABLE.	- 63 -
4.3.5 ALTERNATIVA “C”: DEFLECTOR PERALTADO.....	- 65 -
4.3.6 ALTERNATIVA “D”: DEFLECTOR DISCONTINUO Y CONTRACCIÓN EN LA MARGEN DERECHA DEL ESQUÍ.	- 66 -
4.4 INSTRUMENTACIÓN PARA LAS PRUEBAS.....	- 68 -
4.4.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE 90°, PARED DELGADA.	- 68 -
4.4.2 LIMNÍMETROS, CINTA MÉTRICA.	- 68 -
4.4.3 NIVEL Y ESTACIÓN TOTAL.	- 69 -
4.5 PLAN DE PRUEBAS. ESCENARIO N°1.....	- 70 -
4.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL ESCENARIO N°1.....	- 71 -
4.7 CONCLUSIONES.....	- 74 -
CAPITULO 5	- 76 -
ANÁLISIS DE LA SOCAVACIÓN EN EL CUENCO AMORTIGUADOR AL PIE DE LA PRESA TOACHI	- 76 -
5.1 SOCAVACIÓN EN EL CUENCO DE FONDO MOVIL DISPUESTO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR EFECTO DE LA	

DESCARGA DEL VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO DE LA PRESA TOACHI. ESCENARIO N° 1.....	- 77 -
5.1.1 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR DEL DISEÑO ORIGINAL.....	- 77 -
5.1.2 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON LAS PAREDES CONVERGENTES EN EL ESQUÍ. (ALTERNATIVA “A”).....	- 82 -
5.1.3 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON LA PARED EN LA MARGEN DERECHA DEL SALTO EN ESQUÍ. (ALTERNATIVA “A-1”).....	- 86 -
5.1.4 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR DE ALTURA VARIABLE. (ALTERNATIVA “B”).....	- 88 -
5.1.5 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR PERALTADO (ALTERNATIVA “C”).....	- 92 -
5.1.6 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR DISCONTINUO Y CONTRACCIÓN A LA DERECHA DEL SALTO EN ESQUÍ (ALTERNATIVA “D”)	- 96 -
5.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS DIFERENCIAS EN LA GEOMETRÍA DEL FOSO SOCAVADO SEGÚN LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS.	- 100 -
5.3 DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. ESCENARIO N° 1	- 102 -
5.4 CONCLUSIONES.....	- 105 -
5.5 RECOMENDACIONES	- 106 -
CAPITULO 6	- 107 -

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI. DISEÑO DEFINITIVO EN EL SALTO EN ESQUÍ Y SUS DEFLECTORES.....	- 107 -
6.1 ANTECEDENTES.....	- 107 -
6.2 PLAN DE PRUEBAS DEL ESCENARIO N° 2.....	- 107 -
6.2.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL ESCENARIO N°2.....	- 109 -
6.3 SOCAVACIÓN EN EL CUENCO DE FONDO MOVIL DISPUESTO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR EFECTO DE LA DESCARGA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI. ESCENARIO N° 2.....	- 112 -
6.4 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS RESULTADOS.....	- 116 -
6.5 DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. ESCENARIO N° 2.....	- 117 -
6.6 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES ADIMENSIONALES.....	- 119 -
6.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEFINITIVO DEL CUENCO.....	- 125 -
6.7.1 CONCLUSIONES.....	- 125 -
6.7.2 RECOMENDACIONES.....	- 126 -
CAPITULO 7	- 127 -
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	- 127 -
7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS ALTERNATIVAS.....	- 127 -
7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	- 128 -
7.3 RECOMENDACIONES.....	- 129 -
GLOSARIO DE TÉRMINOS	- 130 -

BIBLIOGRAFÍA	- 133 -
ANEXOS	- 135 -
ANEXOS N° 1.- CONSTRUCCIÓN DE LOS DEFLECTORES DEL SALTO EN ESQUÍ.	- 136 -
ANEXOS N° 2.- REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS PRUEBAS DEL ESCENARIO 1 Y ESCENARIO 2.....	- 143 -
ANEXOS N° 3.- REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES.	- 156 -
ANEXOS N° 4.- PLANOS.	- 173 -

LISTA DE FIGURAS

Figura No 1.1: Implantación general del Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón	- 2 -
Figura No 1.2: Esquema de las obras complementarias de la presa Toachi.....	- 3 -
Figura No 1.3: Esquema del cuenco amortiguador recomendado por EPN para la fase II.	- 7 -
Figura No 2.1: Parámetros para el diseño de salto en esquí.	- 12 -
Figura No 2.2: Definición de los elementos del chorro en un salto en esquí .	- 14 -
Figura No 2.3: Efecto de la resistencia del aire, Ábaco de Kawakami	- 16 -
Figura No 2.4: Esquema de los chorros formados en la zona de impacto de la caída de agua.....	- 17 -
Figura No 2.5: Resalto anegado producido en la zona de impacto de la caída de agua.	- 18 -
Figura No 2.6: Esquema del chorro ascendente hacia aguas abajo.....	- 18 -
Figura No 2.7: Esquema del chorro ascendente hacia aguas arriba	- 19 -
Figura No 2.8: Geometría de la duna, perfil de velocidad y zonas donde se producen los derrumbes de los taludes.	- 20 -
Figura No 2.9: Profundidad de disturbio del chorro.....	- 22 -
Figura No 2.10: Parámetros que interviene en la predicción de la profundidad de socavación.....	- 25 -
Figura No 2.11: Esquema de la ubicación del foso	- 31 -
Figura No 2.12: Esquema del foso, recta de conos.	- 32 -
Figura No 2.13: Relación entre m_s y m_c	- 33 -
Figura No 3.1 Parámetros para determinar la profundidad de socavación	- 40 -
Figura No 4.1: Vista superior del deflector ranurado.	- 60 -

Figura No 4.2: Vista superior de las paredes convergentes.....	- 61 -
Figura No 4.3: Vista superior de la pared derecha.	- 62 -
Figura No 4.4: Vista lateral de los deflectores de altura variable.....	- 63 -
Figura No 4.5: Vista frontal del deflector peraltado.....	- 65 -
Figura No 4.6: Vista frontal del deflector discontinuo y contracción lateral ..	- 67 -
Figura No 4.7: Esquema de la trayectoria del chorro de descarga.	- 72 -
Figura No 5.1: Socavación al pie de la presa, alternativa “O.” $Q = 398.04 \text{ m}^3/\text{s}$	- 78 -
Figura No 5.2: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.1 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 79 -
Figura No 5.3: Socavación al pie de la presa, alternativa “O.” $Q = 594.78 \text{ m}^3/\text{s}$	- 80 -
Figura No 5.4: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.3 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 81 -
Figura No 5.5: Socavación al pie de la presa, alternativa “A.” $Q=397.00 \text{ m}^3/\text{s}$ -	82 -
Figura No 5.6: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.5 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 83 -
Figura No 5.7: Socavación al pie de la presa, alternativa “A.” $Q = 605.45 \text{ m}^3/\text{s}$...	- 84 -
Figura No 5.8: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.7 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 85 -
Figura No 5.9: Socavación al pie de la presa, alternativa “A-1.” $Q = 606.10 \text{ m}^3/\text{s}$	- 86 -
Figura No 5.10: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.9 (a) Perfil transversal (b) Perfil longitudinal.	- 87 -

Figura No 5.11: Socavación al pie de la presa, alternativa “B.” $Q = 403.30 \text{ m}^3/\text{s}$.	- 88 -
Figura No 5.12: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.11 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 89 -
Figura No 5.13: Socavación al pie de la presa, alternativa “B.” $Q = 606.12 \text{ m}^3/\text{s}$.	- 90 -
Figura No 5.14: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.13 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 91 -
Figura No 5.15: Socavación al pie de la presa, alternativa “C.” $Q = 402.77 \text{ m}^3/\text{s}$.	- 92 -
Figura No 5.16: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.15 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 93 -
Figura No 5.17: Socavación al pie de la presa, alternativa “C.” $Q = 600.77 \text{ m}^3/\text{s}$.	- 94 -
Figura No 5.18: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.17 (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal	- 95 -
Figura No 5.19: Socavación al pie de la presa, alternativa “D.” $Q = 398.10 \text{ m}^3/\text{s}$.	- 96 -
Figura No 5.20: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.19 (a) Perfil transversal (b) Perfil longitudinal	- 97 -
Figura No 5.21: Socavación al pie de la presa, alternativa “D.” $Q = 598.77 \text{ m}^3/\text{s}$.	- 98 -
Figura No 5.22: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.21 (a) Perfil transversal (b) Perfil longitudinal	- 99 -
Figura No 5.23: Parámetros que son utilizados para determinar la profundidad de socavación.	- 102 -

LISTA DE TABLAS

Tabla No 2.1: Valores de la constante, los exponentes y diámetro a utilizar en la expresión No 2.21 para los diferentes autores.....	- 29 -
Tabla No 2.2: Valores de talud de reposo m_s , para diferentes tipos de suelo....	- 32 -
Tabla No 3.1 Similitud restringida o particular	- 37 -
Tabla No 3.2 Equivalencias según la ley de similitud de Froude.	- 39 -
Tabla No 3.3 Matriz Característica	- 41 -
Tabla No 3.4 Selección de la escala del modelo.....	- 47 -
Tabla No 4.1: Datos mas relevantes del embalse y ataguía.....	- 53 -
Tabla No 4.2: Dimensiones en modelo y prototipo de la obra de toma.	- 53 -
Tabla No 4.3: Dimensiones en prototipo y modelo del vertedero Sarapullo....	- 54 -
Tabla No 4.4: Dimensiones en prototipo y modelo de los vertederos.....	- 55 -
Tabla No 4.5: Dimensiones en prototipo y modelo de los desagües de fondo.....
.....	- 56 -
Tabla No 4.6: Dimensiones en prototipo y modelo del cuenco amortiguador.-	- 57 -
Tabla No. 4.7: Dimensiones en prototipo y modelo de la transición.....	- 58 -
Tabla No 4.8 Dimensiones de los deflectores de altura variable.	- 64 -
Tabla No 4.9: Dimensiones del deflector peraltado.	- 65 -
Tabla No 4.10: Dimensiones en modelo y prototipo del deflector discontinuo y contracción lateral.	- 66 -
Tabla No 4.11: Plan de pruebas del Escenario N° 1	- 71 -
Tabla No 4.12: Tabla de comparación de caudal ensayado vs caudal propuesto....
.....	- 71 -
Tabla No 4.13: Tabla con datos experimentales del chorro $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$	- 72 -

Tabla No 4.14: Tabla con datos experimentales del chorro $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$	- 73 -
Tabla No 4.15: Resultados experimentales de la geometría y ubicación del foso socavado, $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$	- 73 -
Tabla No 4.16: Resultados experimentales de la geometría y ubicación del foso socavado, $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$	- 74 -
Tabla No 5.1: Parámetros usados para determinar la profundidad del foso $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$	- 103 -
Tabla No 5.2: Parámetros usados para determinar la profundidad del foso $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$	- 103 -
Tabla No 5.3: Comparación de los resultados experimentales con los teóricos $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$	- 104 -
Tabla No 5.4: Comparación de los resultados experimentales con los teóricos $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$	- 105 -
Tabla No 6.1: Caudales de crecida en el sitio de la presa Toachi.....	- 108 -
Tabla No 6.2: Plan de pruebas del escenario N° 2.....	- 109 -
Tabla No 6.3: Tabla de comparación de caudal ensayado vs caudal propuesto.....	- 109 -
Tabla No 6.4: Tabla con datos experimentales del chorro descargado.	- 110 -
Tabla No 6.5: Resultados experimentales de la geometría y ubicación del foso socavado, pruebas del escenario N° 2	- 111 -
Tabla No 6.6: Parámetros para el cálculo de la profundidad del foso.	- 117 -
Tabla No 6.7: Comparación de los resultados experimentales con los teóricos.....	- 118 -

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico No 4.1: Granulometría del material en las pruebas del escenario N°1	- 70 -
Gráfico No 5.1: Anchuras del foso según las alternativas propuestas.....	- 100 -
Gráfico No 5.2: Longitudes del foso socavado según las alternativas propuestas. .	- 101 -
Gráfico No 5.3: Profundidades del foso socavado según las alternativas	- 101 -
Gráfico No 6.1: Granulometría del material utilizado en las pruebas del escenario N° 2	- 108 -
Gráfico No 6.2: Profundidades experimentales del foso socavado, escenario N° 2.	- 117 -
Gráfico No 6.3: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso derecho adimensional (t_d/h_2)	- 121 -
Gráfico No 6.4: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso derecho adimensional (t_d/D_{50}).....	- 122 -
Gráfico No 6.5: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso izquierdo adimensional (t_l/h_2)	- 123 -
Gráfico No 6.6: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso izquierdo adimensional (t_l/D_{50})	- 124 -

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía No 4.1: Tanque y tuberías de abastecimiento.	- 51 -
Fotografía No 4.2: Vertedero de aforo y tanque uniformizador.....	- 51 -
Fotografía No 4.3: Modelo físico de la Presa Toachi.....	- 52 -
Fotografía No 4.4: Modelo del embalse y ataguía	- 53 -
Fotografía No 4.5: Modelo físico del canal y bocatoma	- 54 -
Fotografía No 4.6: Modelo del vertedero Sarapullo.....	- 55 -
Fotografía No 4.7: Estructura en acrílico de los vertederos de excesos.....	- 56 -
Fotografía No 4.8: Estructura en acrílico de los desagües de fondo.	- 57 -
Fotografía No 4.9: (a) Modelo físico del cuenco amortiguador recomendado. (b) Modelo físico de la transición.....	- 58 -
Fotografía No. 4.10: Modelo del cuenco amortiguador y la transición.....	- 59 -
Fotografía No 4.11: Chorro producido por el deflector dentado.....	- 60 -
Fotografía No 4.12: Chorro generado por las paredes convergentes.	- 62 -
Fotografía No 4.13: Chorro producido por la pared derecha en el esquí.	- 63 -
Fotografía No 4.14: Chorro generado por el deflector de altura variable.	- 64 -
Fotografía No 4.15: Chorro generado por el deflector peraltado.	- 66 -
Fotografía No 4.16: Chorro generado por el deflector discontinuo y contracción.. ..	- 67 -
Fotografía No 4.17: Aforo del caudal por el vertedero.	- 68 -
Fotografía No 4.18: Limnímetros en el modelo de la presa.	- 69 -
Fotografía No 4.19: a) Nivel marca wild Heerbrugg Switzerland b) Estación total marca Leyca 7500.	- 69 -

Fotografía No 5.1: Deflector del diseño original, prueba con caudal de 398.04 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 78 -
Fotografía No 5.2: Deflector del diseño original, prueba con caudal de 594.78 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 80 -
Fotografía No 5.3: Deflector, paredes convergentes, prueba con caudal de 397.0 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 82 -
Fotografía No 5.4: Deflector, paredes convergentes, prueba con caudal de 605.45 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 84 -
Fotografía No 5.5: Deflector, pared en la parte derecha del esquí, prueba con caudal de 606.10 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 86 -
Fotografía No 5.6: Deflector de altura variable, prueba con caudal de 403.30 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 88 -
Fotografía No 5.7: Deflector de altura variable, prueba con caudal de 606.12 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 90 -
Fotografía No 5.8: Deflector peraltado, prueba con caudal de 402.77 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 92 -
Fotografía No 5.9: Deflector peraltado, prueba con caudal de 600.77 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 94 -
Fotografía No 5.10: Deflector discontinuo y contracción, prueba con caudal de 398.10 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 96 -
Fotografía No 5.11: Deflector discontinuo y contracción, prueba con caudal de 598.77 m ³ /s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.	- 98 -
Fotografía No 6.1: Deflectores del diseño modificado, prueba con 1203.12 m ³ /s. (a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.	- 112 -
Fotografía No 6.2: Deflectores del diseño modificado, prueba con 1002.57 m ³ /s. (a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.	- 113 -

Fotografía No 6.3 Deflectores del diseño modificado, prueba con 701.32 m³/s.
(a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.- 114 -

Fotografía No 6.4: Deflectores del diseño modificado, prueba con 499.57 m³/s.
(a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.- 115 -

Fotografía No 6.5: Deflectores del diseño modificado, prueba con 197.89 m³/s.
(a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.- 116 -

LISTA DE PLANOS

Plano No 1: Foso socavado, prueba “D1”: $Q=1203.12 \text{ m}^3/\text{s}$	- 174 -
Plano No 2: Cortes del foso, prueba “D1”: $Q=1203.12 \text{ m}^3/\text{s}$	- 175 -
Plano No 3: Fosos socavados, prueba “D2”: $Q=1002.57 \text{ m}^3/\text{s}$	- 176 -
Plano No 4: Cortes de los fosos, prueba “D2”: $Q=1002.57 \text{ m}^3/\text{s}$	- 177 -
Plano No 5: Fosos socavados, prueba “D3”: $Q=701.32 \text{ m}^3/\text{s}$	- 178 -
Plano No 6: Cortes de los fosos, prueba “D3”: $Q=701.32 \text{ m}^3/\text{s}$	- 179 -
Plano No 7: Fosos socavados, con prueba “D4”: $Q=499.57 \text{ m}^3/\text{s}$	- 180 -
Plano No 8: Cortes de los fosos, prueba “D4”: $Q=499.57 \text{ m}^3/\text{s}$	- 181 -
Plano No 9: Fosos socavados, prueba “D5”: $Q=197.89 \text{ m}^3/\text{s}$	- 182 -
Plano No 10: Cortes de los fosos, prueba “D5”: $Q=197.89 \text{ m}^3/\text{s}$	- 183 -
Plano MPT3-01: Implantación general del modelo.....	- 184 -
Plano MPT3-02: Vista en planta del cuenco amortiguador para las pruebas del escenario N° 1	- 185 -
Plano MPT3-03: Vista en planta del cuenco amortiguador para las pruebas del escenario N° 2	- 186 -

RESUMEN

ESTUDIO EN MODELO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI, PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN

Los chorros que despegan desde saltos en esquí e impactan en el cuenco amortiguador caen a cierta distancia de la presa, estos producen fosos de socavación existiendo la probabilidad de que las estructuras de descarga y las márgenes del cuenco amortiguador sean afectadas. Los modelos hidráulicos son muy importantes para el diseño de la geometría del cuenco dissipador de energía.

El presente trabajo de investigación trata del análisis de la evolución temporal del foso socavado en un lecho de fondo móvil que contiene grava, esta se encuentra ubicado al pie de los vertederos de excesos de la presa Toachi, se realiza un análisis cualitativo del foso socavado producido para cinco diferentes estructuras de caída (deflectores) presentes en el salto en esquí. Para todas las alternativas ensayadas en la socavación resultante se observa que el material es arrastrado hasta cubrir el umbral, el mismo que restringe el desarrollo longitudinal del foso. Con la operación simultánea de los vertederos de excesos usando los deflectores discontinuos y contracción, se observa la incidencia negativa del foso en las márgenes del cuenco amortiguador.

DESCRIPTORES: MODELO HIDRÁULICO/ SIMILITUD DE FROUDE /
DEFLECTOR EN SALTOS EN ESQUÍ / CUENCO AMORTIGUADOR /
PROFUNDIDAD DEL FOSO / PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI –
PILATÓN.

ABSTRACT

STUDY IN MODEL OF SCOUR HOLE AT THE FOOT OF EXCESS SPILLWAY IN DAM TOACHI, HYDROELECTRIC PROJECT TOACHI - PILATÓN

The jets taking off from ski jumps and impact in the stilling basin fall some distance from the dam; these scour pits produce the probability exists that discharge structures and stilling basin margins are affected. Hydraulic models are very important for the design of the geometry of the stilling basin.

This work presents the analysis of the temporal evolution of the pit undermined in a bed of gravel containing mobile background, this is located at the foot of spillway excess Toachi dam, is performed a qualitative analysis of the pit produced undermined for five different drop structures (buckets) present in the ski jump. For all alternatives tested in the resultant scour shows that the material is drawn to cover the doorway, restricting the same longitudinal development of the pit. With the simultaneous operation of spillways excess using discontinuous buckets and contraction seen the negative impact of the pit in the stilling basin margins.

DESCRIPTORS: HYDRAULIC MODEL / SIMILARITY OF FROUDE /
DEFLECTOR IN JUMPS IN SKI / STILLING BASIN / DEPTH SCOUR /
HYDROELECTRIC PROJECT TOACHI - PILATÓN.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN¹.

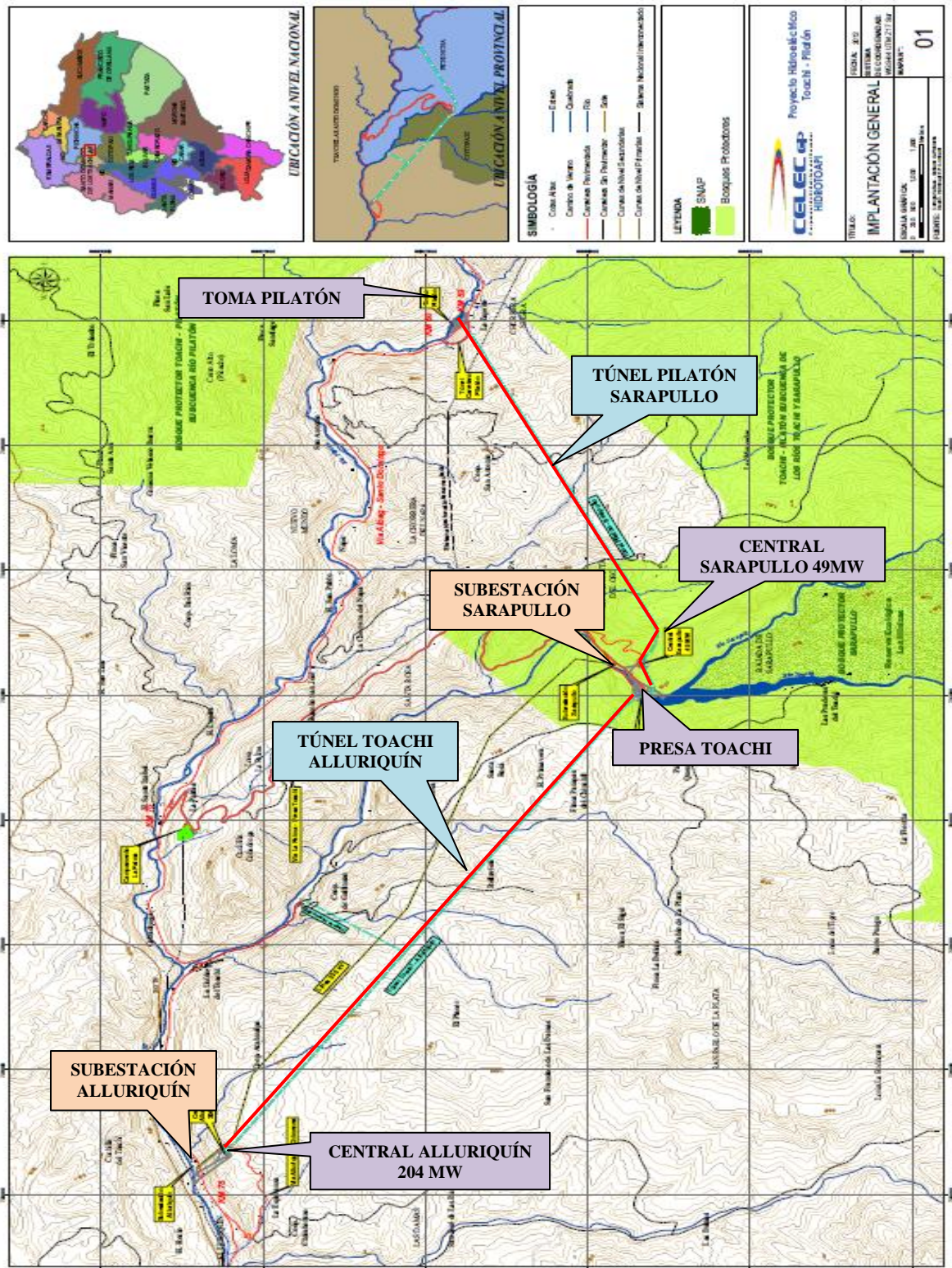
El Proyecto Toachi-Pilatón está ubicado al sur- oeste de Quito, muy cerca de la vía Quito-Alóag – Santo Domingo de los Tsáchilas, el proyecto se desarrolla en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi. La captación del Pilatón y la presa del Toachi están localizadas en las coordenadas N 9°961.630; E 737.980 y N 9°959.340; E 731.980, respectivamente, del sistema UTM WGS 84. La cuenca del río Toachi tiene una superficie de drenaje de 1476 km², se extiende en una longitud de 85 Km y un ancho medio de 20 km hasta el sitio de la presa (914 msnm) que es inmediatamente aguas abajo de recibir a su río afluente Sarapullo. La cuenca superior del río Pilatón, antes de su confluencia con el río Toachi tiene una superficie de drenaje de 521 km², se extiende en una longitud de 40 Km y un ancho medio de 20 km hasta el sitio de la captación (1099 msnm).

El Proyecto comprende dos aprovechamientos en cascada, llamados Pilatón-Sarapullo y Toachi-Alluriquín. La potencia instalada en las tres turbinas Francis de la casa de máquinas de Sarapullo es 49 MW, para un caudal máximo de 40 m³/s y una altura bruta de 135 m; y la potencia instalada en las tres turbinas Francis de la casa de máquinas de Alluriquín es 204 MW, para un caudal de 100 m³/s y una altura bruta de 232 m. Adicionalmente, se dispondrá de una mini central al pie de la presa del Toachi, de 1,4 MW, que turbinará en forma constante el caudal ecológico de 4,14 m³/s que corresponde al río Toachi.

El aprovechamiento Pilatón - Sarapullo está conformada por la captación del río Pilatón, obras de conducción, casa de máquinas de Sarapullo, obras de descarga. Los 40 m³/s turbinados en la casa de máquinas de Sarapullo son conducidos hasta la galería de interconexión de los dos aprovechamientos ubicado en la presa Toachi.

¹ CELEC EP HIDROTOAPI, Documentos de licitación-Información técnica general, Proyecto Hidroeléctrico Toachi- Pilatón. 2010. 36 p.

Figura No 1.1: Implantación general del Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón.



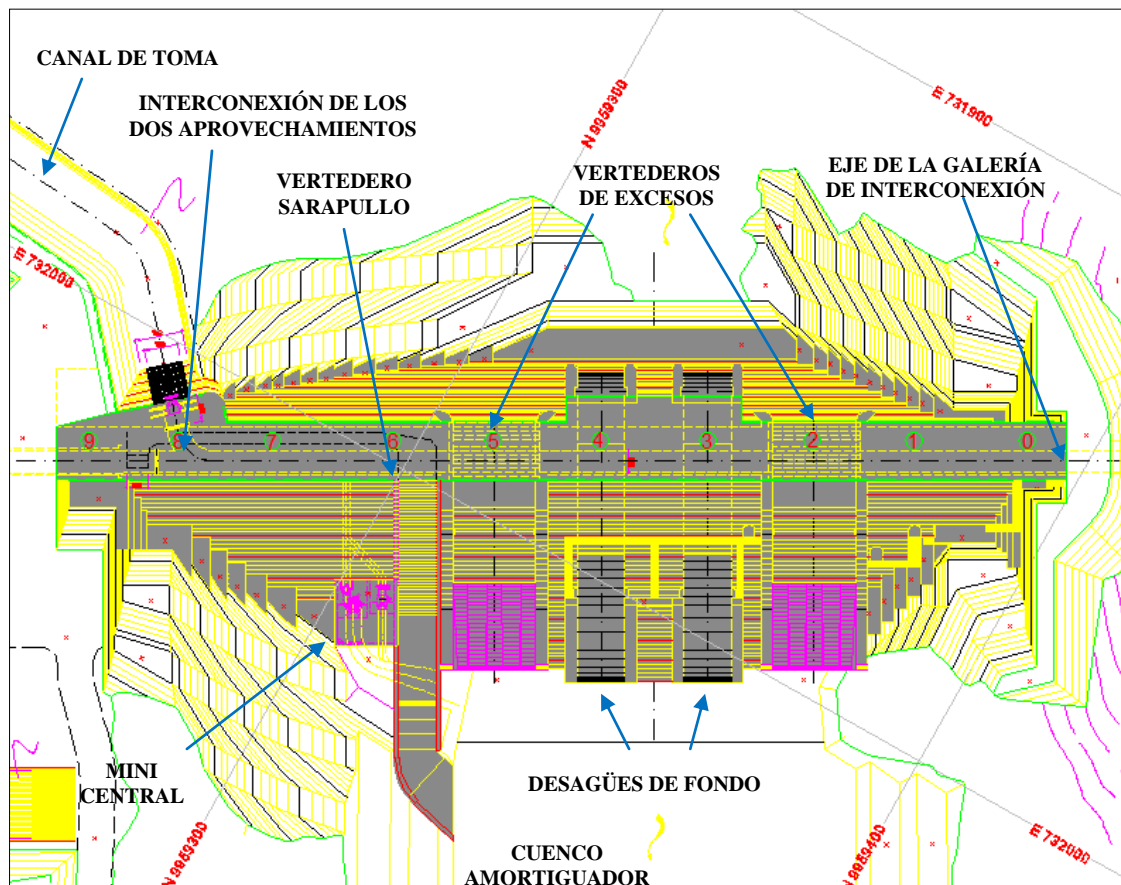
Fuente: CELEC E.P HIDROTOAPI “Descripción del Proyecto Hidroeléctrico Toachi - Pilatón” Quito 2012

1.1.1 APROVECHAMIENTO TOACHI-ALLURIQUÍN

1.1.1.1 La Presa del Toachi

La presa tiene una altura de 59 m, una longitud de 170.5 m y un ancho de 10.0 m, la presa es de hormigón a gravedad, está conformada por 10 bloques, en donde seis contienen estructuras hidráulicas. La presa se ubica cerca de la confluencia de los ríos Toachi y Sarapullo, tiene una capacidad de embalse de regulación diaria de 2 millones de m^3 entre sus niveles máximo y mínimo de operación 970 y 965 msnm. Las obras anexas a la presa son: las ataguías y el túnel de desvío del río para su construcción, el canal de alimentación de la toma, la casa de control, la mini central hidroeléctrica a pie de presa y el estanque de disipación de energía de las descargas de las estructuras hidráulicas de control. El embalse tiene un volumen de 8 Hm^3 .

Figura No 1.2: Esquema de las obras complementarias de la presa Toachi.



1.1.1.1.1 Canal de alimentación de la toma.- Se encuentra en la margen derecha, tiene una longitud de 100 m y su forma se acopla a la topografía, la pendiente del canal es 4.5%,

presenta un vertedero cuya cresta se encuentra en la cota 964 msnm y se halla 1 m por debajo del nivel mínimo de operación que corresponde a 965 msnm, trabajando así sumergido para alimentar el canal, por este medio se captará 60 m³/s.

1.1.1.1.2 Obra de Toma y conexión con el túnel de descarga de Sarapullo.- A la salida del canal de toma se encuentra una embocadura de 5.75m x 7.85 m, posteriormente cambia a 3.50 m x 5.60 m en donde se tiene una compuerta plana, luego se une con la galería de interconexión que atraviesa longitudinalmente la presa. En este bloque 8 como se observa en la figura No 1.2, además se tiene una compuerta que desconecta la descarga Sarapullo con la galería de interconexión, en caso que Sarapullo esté funcionado y Alluriquín esté fuera de servicio, para tal caso este bloque tiene un pozo que conecta la descarga Sarapullo con una galería de 2.00 m x 3.50 m, que se conecta con un vertedero escalonado ubicado en el bloque 6 cuya cresta está en cota 969.5 msnm y descarga un caudal máximo de 40 m³/s. al cuenco amortiguador ubicado al pie de la presa.

1.1.1.1.3 Mini central a pie de presa.- El ingreso a la mini central es desde la galería interior de la presa, la casa de máquinas de la mini central de 1.4 MW, consta de una turbina Francis de eje vertical, para una altura de caída de 42 m, se ubica al pie de la presa en el bloque 6. La mini central turbinará el caudal ecológico del río Toachi que es de 4,14 m³/s.

1.1.1.1.4 Vertederos de excesos.- El vertedero es de tipo Creager cuya cresta se encuentra en la cota 962.50 msnm, su ancho es de 14 m, la rápida tiene una pendiente de 1:0.7, el caudal de diseño es de 598 m³/s para operación individual, al final del perfil tienen saltos en esquí en donde se encuentran deflectores para conseguir una disipación de energía y así evitar graves daños aguas abajo. Se encuentran ubicados en los bloques 2 y 5 como se observa en la figura No 1.2, el control de los vertederos se lo hará por medio de clapetas con el objetivo de controlar el nivel máximo de operación.

1.1.1.1.5 Desagües de fondo.- Aguas arriba la cresta de los desagües de fondo está en la cota 927 msnm tienen un ancho de 8.00 m, se controla con compuertas radiales de 8.00 m x 8.00 m, la descarga se efectúa por medio de saltos en esquí cuyo radio de curvatura es de 15 m, la cresta del salto en esquí está en la cota 923.02 msnm. El caudal de diseño para operación individual es de 1600 m³/s cuando el embalse está en la cota 970 msnm.

1.1.1.1.6 Cuenco amortiguador.- Se encuentra aguas abajo de los vertederos de excesos y de los desagües de fondo, está prevista de una pre-excavación en esa zona, en una distancia de 10 m se protegerá la presa con un enrocado de escollera provista de grandes piedras unidas con hormigón. El cuenco de disipación de energía es de aproximadamente 65 m de longitud y 70 m de ancho, en las dos márgenes del río se tendrá excavaciones laterales. Posteriormente se tiene una escollera de hormigón que tiene una abertura que descargará caudales al canal de transición de unos 80 m de longitud hasta la restitución con el río.

1.1.1.1.7 Galería de interconexión entre los dos aprovechamientos.- Esta galería conecta el túnel de descarga de la casa de máquinas de Sarapullo con el túnel de presión Toachi-Alluriquín, con el objeto de que las aguas limpias turbinadas en Sarapullo alimenten directamente a la casa de máquinas de Alluriquín, evitando así su descarga en el embalse. La galería de interconexión atraviesa longitudinalmente toda la presa, tiene una altura de 5.60 m y un ancho de 3.50 m

1.1.1.1.8 Casa de control.- Se encuentra ubicada en la plataforma formada al nivel de la corona de la presa. Allí se dispondrá de todos los sistemas de control de los equipos de la presa.

1.1.1.2 Obras de conducción

1.1.1.2.1 Túnel de presión.- La longitud del túnel de presión es de 8.65 km hasta el inicio del blindaje de acero, se inicia al final de la galería de interconexión en la cota 952 msnm y llega hasta la cota 779.50 msnm. Es de sección circular de 5.60 m de diámetro y 0.30 m de recubrimiento si se lo excava por el método convencional pero si se excava con TBM (Tunnel Boring Machine) el diámetro interno es de 6.0 m y el diámetro de excavación 6,70 m revestido con dovelas de hormigón empacadas con gravilla contra la roca y luego con inyecciones de cemento.

1.1.1.2.2 Chimenea de equilibrio superior.- Está conformado por un pozo vertical inferior (garganta) con un diámetro interior útil de 3,50 m hasta la cota 905 msnm. Esta se ubica 38 m aguas abajo del inicio de la tubería de presión y está desplazada 20 m del eje de la conducción. La chimenea será revestida de hormigón, la garganta con 0,35 m y el pozo principal con 0,55 m.

1.1.1.2.3 Tubería de presión.- El ramal principal tiene un diámetro interior de 4.70 m, una longitud de 187 m hasta el inicio de los tres ramales distribuidores de 2.70 m de diámetro interno, la longitud hasta la primera, segunda y tercera turbina es 23 m, 20 m, 30 m, respectivamente, al final del tramo de la primera turbina los diámetros se reducen a 2,60 m para su unión con las válvulas de guardia tipo mariposa, el tramo que alimenta a las dos últimas turbinas es de 3,85 m de diámetro y 16 m de longitud.

1.1.1.3 Casa de máquinas de Alluriquín

La casa de máquinas es subterránea cuyas dimensiones son $L \times B \times H = 66 \text{ m} \times 24 \text{ m} \times 45 \text{ m}$. posee tres turbinas tipo Francis con potencia nominal por unidad de 68 MW, para una caída neta de 231 m y caudal de diseño de $33,33 \text{ m}^3/\text{s}$, además tres generadores, tres transformadores tres válvulas de guardia y un puente grúa.

1.1.1.4 Obras de descarga

1.1.1.4.1 Chimenea de equilibrio inferior.- Ésta tiene una cámara inferior sección tipo baúl de área útil $L \times B \times H = 41 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 36 \text{ m}$, con la solera a la cota 722,40 msnm.

1.1.1.4.2 Túnel y estructura de descarga.- El túnel es de sección circular, de diámetro interno 5,60 m, y 504 m de longitud, revestido de hormigón hasta empatar con la estructura de descarga. La cota inicial y final del túnel es de 722 msnm y 732 msnm respectivamente. La estructura de descarga está constituida por una transición de 26 m de longitud entre el túnel y el azud-vertedero de 21 m de ancho, cuya cresta se encuentra a la cota 736 msnm y permitirá la restitución de los caudales turbinados al río Toachi.

1.1.1.5 Subestación Alluriquín

La subestación es exterior y está ubicada entre el carretero y el río. Es del tipo SF6 y permitirá la conexión del Proyecto con las líneas del sistema nacional Interconectado.

1.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL E INFORMACIÓN DE BASE.

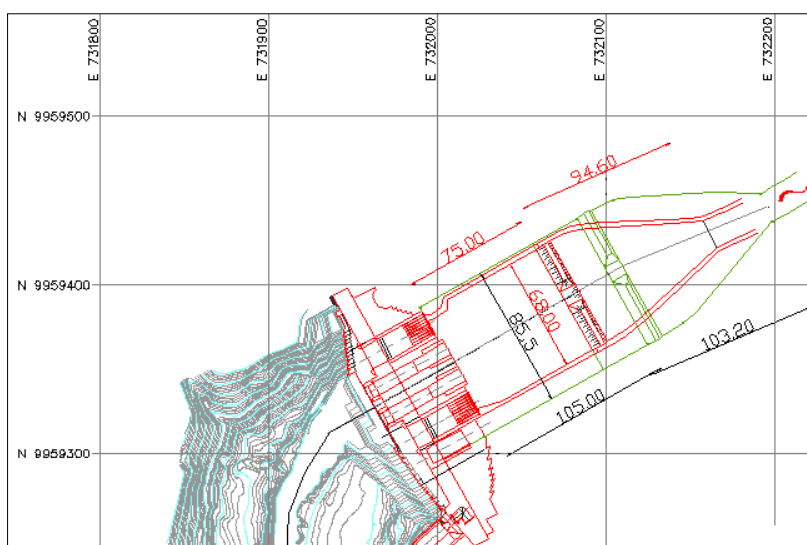
El estudio experimental del modelo hidráulico de la Presa Toachi anteriormente se desarrolló en dos fases de investigación.

En la primera fase se construyó el modelo en el laboratorio del CIERHI (Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos) de la Escuela Politécnica Nacional, en base a los planos del diseño definitivo entregados por CELEC EP HIDROTOAPI. En esta fase se efectuaron pruebas en los vertederos de excesos, el vertedero Sarapullo y desagües de fondo, los resultados enfocados únicamente a la socavación en el cuenco amortiguador en la primera fase de investigación son²:

- Los alcances de los chorros de descarga observados durante las pruebas con Diseño Original para los vertederos de excesos, desagües de fondo y vertedero Sarapullo muestran que las dimensiones del cuenco de disipación, tanto en ancho como en longitud no son suficientes para recibir a los chorros dentro del estanque.
- El chorro proyectado desde el salto esquí del vertedero de Sarapullo debe llegar hasta el cuenco de disipación de energía. No es admisible su impacto en la ladera.

Una vez terminada la fase de pruebas con diseño original se recomendó el incrementar el ancho y la longitud del cuenco de disipación de energía para recibir dentro de él todos los chorros proyectados por las obras complementarias de la presa. En la siguiente figura se muestra una comparación del cuenco amortiguador con diseño original y el modificado.

Figura No 1.3: Esquema del cuenco amortiguador recomendado por EPN para la fase II.



Fuente: Informe técnico fase II, Estudio en modelo hidráulico de la presa Toachi y sus obras complementarias, EPN, enero 2012.

² ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. Informe técnico fase I, EPN. Quito, Noviembre 2011. 98 p.

En la segunda fase de la investigación experimental, acogiendo con las recomendaciones efectuadas, se procedió a construir las modificaciones en el cuenco disipador de energía. Se efectuaron pruebas para analizar la socavación del material que conforma el cuenco de disipación por efecto de la descarga de los vertederos de exceso y se obtuvo los siguientes resultados³:

- La disposición asimétrica de la estructura de disipación de energía con respecto a la ubicación de la descarga de los vertederos de excesos y desagües de fondo no permite la conformación simétrica de los cuencos de socavación. Esta asimetría es más notable cuando se tiene la descarga de los vertederos de excesos. Los diseñadores deberán revisar la estabilidad del talud izquierdo en el disipador de energía que estará sometido a mayores exigencias que el talud derecho del mismo.
- El efecto del umbral como sección de control no es eficiente, pues las máximas profundidades se ubican en la sección estrecha de la transición.

Con esta información base es necesario realizar una tercera fase del estudio experimental en donde se considere modificar la geometría de los deflectores del salto en esquí y controlar los efectos de socavación.

1.3 PLAN DE OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS Y DEL CUENCO PREEXCAVADO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

La operación de los vertederos de excesos se lo hará con compuertas que tienen por objeto controlar el nivel máximo de operación (970 msnm) del embalse de regulación diaria con el caudal firme del proyecto. La descarga se desarrolla en un cuenco preexcavado delante de los vertederos de excesos y desagües de fondo, posteriormente se tiene un umbral y una transición para la restitución hacia el río.

Respecto al tiempo total de operación de los vertederos de excesos, las obras de descarga son solicitadas por crecidas extremas sólo por intervalos de tiempo limitados, durante los cuales, el fenómeno erosivo no tiene la posibilidad de desarrollarse completamente.

³ ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. Informe técnico fase II, EPN. Quito, Enero 2012. 62 p.

1.4 HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE SOCAVACIÓN.

Durante la iniciación de los trabajos en el sitio de implantación de la presa Toachi en las márgenes del cuenco amortiguador se determinó que las condiciones geológicas no son las admisibles para ensanchar el mínimo recomendado en la primera fase de investigación. Por ello la descarga de los vertederos de excesos produciría grandes socavación y ocasionarían inestabilidad en las márgenes, cosa que no es admisible dentro del diseño hidráulico.

Por lo tanto existe la necesidad de un estudio experimental en donde se varíe la geométrica de los deflectores de los saltos en esquí con el fin de asegurar la ubicación de las fosas de socavación hacia el centro del cuenco amortiguador y alejado de las márgenes del mismo.

Para este tipo de fenómenos, el diseño hidráulico se basa en una investigación de los siguientes aspectos: Predicción del foso de socavación para diferentes condiciones de funcionamiento, análisis para evaluar el posible efecto de socavación en la estabilidad de la estructura, control de la socavación y medidas correctivas. Los diferentes enfoques para la estimación de las características de socavación aguas abajo de la presa producto de los chorros de descarga son:

- Análisis teóricos junto con las investigaciones en laboratorio.
- Análisis teóricos junto con las observaciones en prototipo.
- Relaciones empíricas basadas en las observaciones en prototipo.
- Experimentos de laboratorio para un proyecto específico.

Por lo tanto es muy importante tratar el proceso de socavación en un modelo físico con el fin de obtener bases que nos servirán para un diseño definitivo.

1.5 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO.

El objetivo general es analizar en modelo físico la formación, ubicación y desarrollo del foso de socavación, generado por la caída del chorro descargado desde los vertederos de exceso de la presa Toachi sobre material no cohesivo que contiene el cuenco amortiguador.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO.

- ❖ Análisis cualitativo del foso socavado por efecto de cinco tipos de deflectores ubicados en el salto en esquí, con el fin de alejar la socavación de las márgenes del cuenco amortiguador.
- ❖ Análisis de la afectación del foso socavado a las márgenes laterales del cuenco amortiguador previstas al pie de la Presa Toachi.
- ❖ Verificación del dimensionamiento del cuenco amortiguador prevista al pie de la presa.

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO Y ANÁLISIS TEÓRICO SOBRE EL PROCESO DE SOCAVACIÓN DE UN CUENCO AL PIE DE UN CHORRO.

Los saltos en esquí producen chorros libres dirigidos hacia arriba y caen en el cuenco predispuesto como disipador de energía, a una cierta distancia del extremo del vertedero, esto a su vez provoca un cuenco socavado o también llamado “*foso socavado*,” en este proceso intervienen: el análisis de difusión del chorro, zonas de recirculación en el cuenco amortiguador.

El efecto que produce los chorros libres se puede estimar dentro de ciertos rangos de confiabilidad, mediante expresiones empíricas elaboradas con datos de laboratorio y en prototipo. El equilibrio de la profundidad de socavación se alcanza cuando las partículas de los sedimentos desprendidos del cuenco no pueden salir del foso socavado, Los problemas que se plantea para este tipo de estructuras no son la identificación de la profundidad de socavación, sino la respuesta del medio ante este fenómeno, por lo que es muy importante verificar si el comportamiento de las laderas resiste esa profundidad de cauce.

2.1 ANÁLISIS TEÓRICO BÁSICO SOBRE EL CHORRO DE SALIDA DESDE EL SALTO EN EL ESQUÍ.

En una gran presa, los saltos en esquí son elementos muy importantes, porque son las únicas estructuras capaces de cumplir con la disipación de energía satisfactoria para velocidades de salida mayores de 20 m/s. En saltos en esquí la energía es disipada por efecto de tres acciones que son: Contacto aire-agua, turbulencia del agua y fricción del flujo con el cauce del río. La elevación del chorro por el salto en esquí es de aproximadamente un 30 a 50% la altura de la presa⁴.

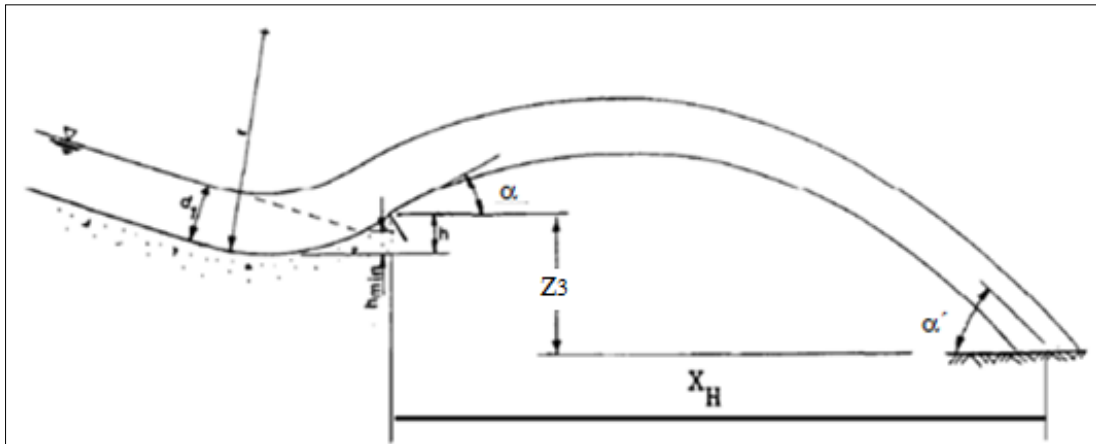
2.1.1 PARAMETROS PARA EL DISEÑO DEL SALTO EN ESQUÍ.

Los parámetros geométricos requeridos para el diseño de un salto en esquí son el radio de curvatura (r), la altura mínima del labio (h_{\min}) y el ángulo de salida de la trayectoria (α).⁵

⁴VISCHER, D.L., HAGER, W.H., “Dam Hydraulics”. Switzerland. John Wiley & Sons. 1998. 304 p.

⁵ WHITTAKER, J. “Scour Related to Energy Dissipators for Head Structures.” Zurich. 1984. 73 p.

Figura No 2.1: Parámetros para el diseño de salto en esquí.



Fuente: Berker Yalin Imamoglu. (2008). “Scour at downstream of flip buckets and roller bucket type energy dissipators”, CE 573, Fundamentals of River Engineering Spring Term

2.1.1.1 Radio mínimo.- Es el mínimo radio de curvatura que puede tener el esquí, para que posteriormente el flujo despegue hacia arriba.

$$r_{\text{mín}} = \frac{\rho V_1^2 d_1}{P_T - \gamma d_1} \quad (\text{ft}) \quad (2.1)$$

En donde: ρ = Densidad del agua ($\text{lb}\cdot\text{seg}^2/\text{ft}^4$); V_1 = Velocidad del flujo (ft/s); d_1 = Profundidad del flujo (ft); P_T = Unidad de carga específica en la solera del esquí (lb/ft^2); γ = Peso específico del agua (lb/ft^3). Como guía de diseño general el radio debe ser al menos igual a cuatro veces la profundidad del flujo máximo.

2.1.1.2 Altura mínima.- Para tener un correcto flujo, la altura del esquí debe ser al menos lo suficientemente alta como para interceptar la pendiente hacia adelante proyectada de la superficie del agua en el punto de curvatura del vertedero y la curva del esquí.

$$h_{\text{mín}} = r - r \cos(\phi - \tan^{-1} s) \quad (\text{ft}) \quad (2.2)$$

En donde: s = Pendiente de la rápida (ft/ft), $\phi = \alpha$, cuando la cuerda del arco (cucharón o esquí) sea horizontal.

La elevación del labio del esquí debe estar por encima del nivel máximo de agua en el cuenco amortiguador, con el fin de evitar que el material suelto entre en el esquí, caso

contrario este material provocaría abrasión, además daños por cavitación debido a las fluctuaciones sumergidas.

2.1.1.3 Ángulo de trayectoria.- El ángulo de trayectoria es el ángulo a la salida del esquí que hace con respecto a la horizontal. El ángulo de trayectoria es un factor importante para determinar la longitud de la distancia de trayectoria del chorro y las características generales hidráulicas en el área de impacto.

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{[d_1 (2r - d_1)]^{0.5}}{r - d_1} \right\} \quad (^\circ) \quad (2.3)$$

2.1.1.4 Ángulo de impacto.- Es el ángulo con que impacta en el colchón de agua

$$\alpha' = \tan^{-1} \left\{ \sec \alpha \left(\sin^2 \alpha + \frac{z_3}{h_e} \right)^{0.5} \right\} \quad (^\circ) \quad (2.4)$$

En donde: h_e = Altura de velocidad en el labio del esquí (ft); z_3 = Es el desnivel que existe desde la cresta del esquí hasta el nivel aguas abajo del impacto del chorro (ft).

Los parámetros r , h_{\min} y α están estrechamente relacionados por lo que se los puede reajustar con el fin de obtener un diseño satisfactorio.

2.1.2 ALCANCE Y ALTURA MÁXIMA DEL CHORRO.

La formación del chorro altamente desintegrado es deseable para la disipación de energía, el flujo de aproximación más o menos compacto se desvía en el aire por efecto del salto en esquí que sale como un chorro libre dirigido hacia arriba en donde se consigue una buena aireación y cae aguas abajo de la estructura de descarga.

En la trayectoria de vuelo la desintegración de un chorro de agua está relacionado con: la turbulencia en la aproximación, geometría en el despegue, acción del viento y las propiedades del flujo. Existen pocos resultados generales disponibles y muchos el número de parámetros que influyen en la desintegración del chorro en su trayectoria de vuelo. Para mejorar el proceso de desintegración se mencionan los siguientes aspectos⁶:

⁶ VISCHER, D.L., HAGER, W.H., "Dam hydraulics". Switzerland. John Wiley & Sons. 1998. 304 p.

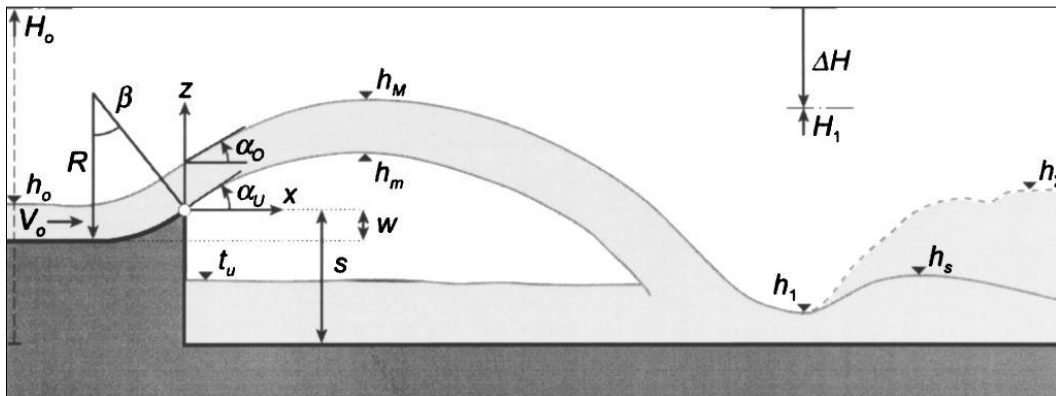
- La sección transversal del chorro no debe ser circular para contrarrestar la compacidad del chorro.
- Raspar el esquí en el despegue del chorro para aumentar su nivel de turbulencia (Cuidando los daños por cavitación).
- Transición desde la rápida hasta el esquí debe ser abrupta para no estrechar el chorro en el aire.
- Creación de una mezcla de aire-agua en la zona de despegue.

La geometría de la trayectoria del chorro se puede aproximar a una parábola, teóricamente si se desprecia la separación del chorro y la fricción o resistencia del aire tenemos⁷:

$$Z(x) = z_0 + (\tan\alpha_j)x - \left(\frac{g}{2V_0^2 \cos^2\alpha_j}\right)x^2 \quad (2.5)$$

En donde α_j es el ángulo de despegue del chorro, V_0 es la velocidad en la salida en el esquí. Teóricamente el máximo alcance es cuando $\alpha_j = 45^\circ$, pero el ángulo de despegue óptimo está entre 20° y 40° , $z_0 = 0$ para la parte inferior del chorro y $z_0 = h_0$ para la parte superior del chorro

Figura No 2.2: Definición de los elementos del chorro en un salto en esquí



Fuente: Valentin Heller; William H. Hager, F.ASCE; and Hans-Erwin Minor, (2005). "Ski Jump Hydraulics" Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 5.

La altura máxima de elevación del chorro es:

⁷ HELLER Valentin, HAGER William H., F.ASCE, and HANS-ERWIN Minor. "Ski Jump Hydraulics." Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 5. 2005. 347-355 p.

$$\frac{h_M}{h_o} = \frac{z_o}{h_o} + \frac{1}{2} F_o^2 \sin^2 \alpha_j \quad (2.6)$$

En donde: F_o es el número de Froude en el esquí, h_o es la profundidad de agua en el esquí. Investigaciones observadas muestran que para una radio de curvatura en el esquí $R= 0.10$ m, un ángulo de deflexión $\beta = 40^\circ$, un flujo de aproximación de $h_o = 0.05$ m, los ángulos despegue α_o y α_v son siempre menores al ángulo de deflexión β , también parece ser menor el ángulo inferior del chorro α_v que el ángulo de despegue de la trayectoria del chorro superior. Un chorro en salto esquí por tanto aumenta su anchura a medida que viaja a través de la atmósfera⁸.

Se tienen varias ecuaciones encontradas en base de modelos hidráulicos y mediciones hechas en prototipo que permiten calcular el alcance máximo del chorro entre ellas se menciona las siguientes:

2.1.2.1 Ecuación de Kawakami.- El alcance máximo del impacto del chorro despreciando la resistencia del aire es:

$$L_o = \frac{V_o^2}{g} \sin 2 \alpha \quad (m) \quad (2.7)$$

Siendo:

L_o =Alcance teórico del chorro (m)

α = Ángulo de lanzamiento ($^\circ$)

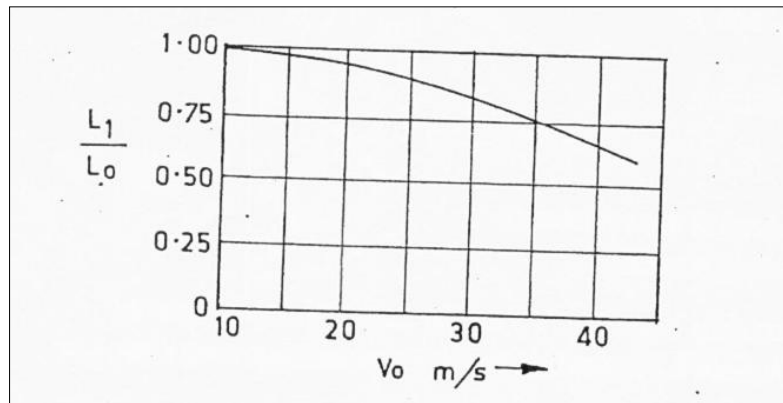
g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

V_o =Velocidad a la salida del esquí (m/s)

Considerando la resistencia del aire en la trayectoria del chorro, Kawakami desarrollo un ábaco L_1/L_o que está en función de la velocidad del flujo de salida y en donde L_1 es el alcance máximo del chorro considerando la resistencia del aire. El ábaco se presenta en la figura No 2.3.

⁸ HELLER Valentin, HAGER William H., F.ASCE, and HANS-ERWIN Minor. "Ski Jump Hydraulics." Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 5. 2005. 347-355 p.

Figura No 2.3: Efecto de la resistencia del aire, Ábaco de Kawakami



Fuente: Khatsuria. M. "Hydraulics of spillways and energy dissipators". 2005

2.1.2.2 Ecuación de Elevatorsky.- Mediciones realizadas para flujos de menos de la mitad de la descarga máxima muestran que el 19% a 20% de la energía total se disipa por la interacción del chorro con aire. Con el objeto de compensar la reducción de velocidad y pérdida de energía del chorro durante su trayectoria por efecto de la interacción del chorro con aire Elevatorsky propone⁹:

$$x = 1.9 h \text{ sen } 2 \alpha \text{ (m)} \quad (2.8)$$

Siendo:

α = Ángulo de salida del esquí (°)

h = Carga hidráulica entre el nivel aguas arriba del vertedero y el nivel más bajo del esquí (m).

2.2 ANÁLISIS DE LA DIFUSIÓN DEL CHORRO EN LA MASA DE AGUA TRANQUILA¹⁰.

El chorro de agua impacta contra el colchón de agua y penetra en él. El chorro al chocar contra el lecho experimenta una división en dos chorros con diferentes caudales asociados y direcciones opuestas, tal como muestra la figura No 2.4.

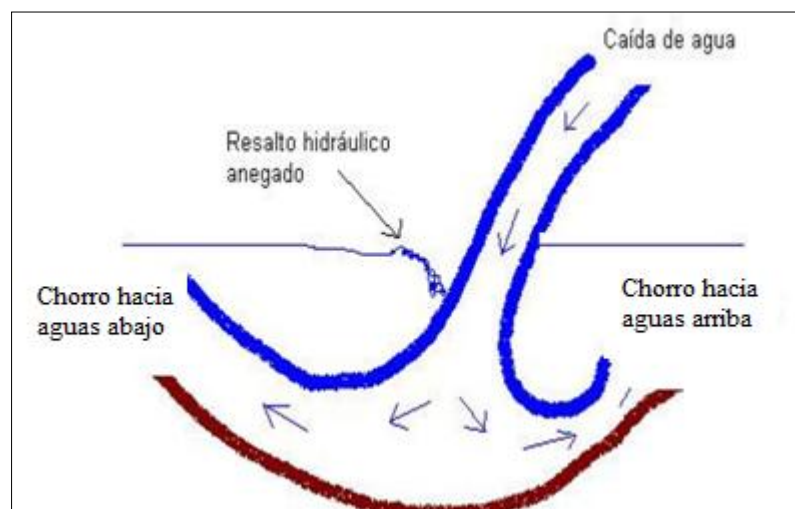
⁹ ELEVATORSKI, E.A. "Hydraulic, Energy dissipators." 1959.

¹⁰ CID SOLÉ, Jordi. "Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esquí" Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesis. 2004. 153 p.

El caudal asociado a cada chorro dependerá del ángulo de impacto del chorro. Si el ángulo de impacto del chorro es de 90° , los caudales se repartirán de forma igual, siendo los dos chorros generados iguales. A medida que el ángulo de impacto del chorro va disminuyendo, el caudal asociado al chorro cuya dirección es hacia aguas abajo, va aumentando, mientras que el caudal asociado al chorro que sigue en la dirección hacia aguas arriba va disminuyendo.

Los chorros al impactarse en el lecho de fondo móvil cambiarán de dirección siguiendo la dirección del lecho presente en cada instante. Como inicialmente el lecho es plano, el chorro seguirá la dirección del lecho arrastrando las partículas en esa dirección. El chorro al entrar en contacto con el lecho, tiene pérdidas de energía por rozamiento, produciéndose una disminución de las tensiones que produce sobre las partículas.

Figura No 2.4: Esquema de los chorros formados en la zona de impacto de la caída de agua.



Fuente: CID SOLÉ, Jordi. “Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esquí” Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesis. 2004. 153 p.

A medida que el foso va progresando en profundidad, la dirección de los chorros se adapta a la dirección de las paredes que forman el foso y la duna, pero también las modifica haciendo variar su trayectoria. Si analizamos el chorro que sigue en la dirección aguas abajo, parte del caudal del chorro seguirá hacia aguas abajo, generando una zona de ondas o resalto ondulado que se sitúa aproximadamente después de la cresta de la duna, debido al cambio de régimen rápido a régimen lento. La otra parte del chorro se irá hacia aguas

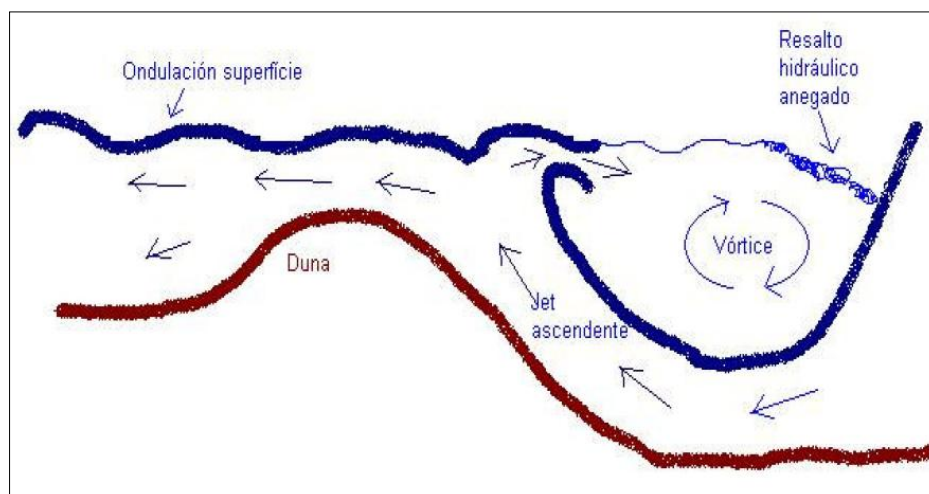
arriba produciendo la anegación de la zona de impacto de la caída, generando el resalto anegado que se ve en la figura No 2.5. Estos dos chorros generados se comportan de igual forma que los chorros generados al chocar contra el lecho, pero cambiando el ángulo de incidencia del chorro por el ángulo de emergencia del chorro, tal como se puede apreciar en la figura No 2.6

Figura No 2.5: Resalto anegado producido en la zona de impacto de la caída de agua.



Fuente: CID SOLÉ, Jordi. “Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esquí” Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesis. 2004. 153 p.

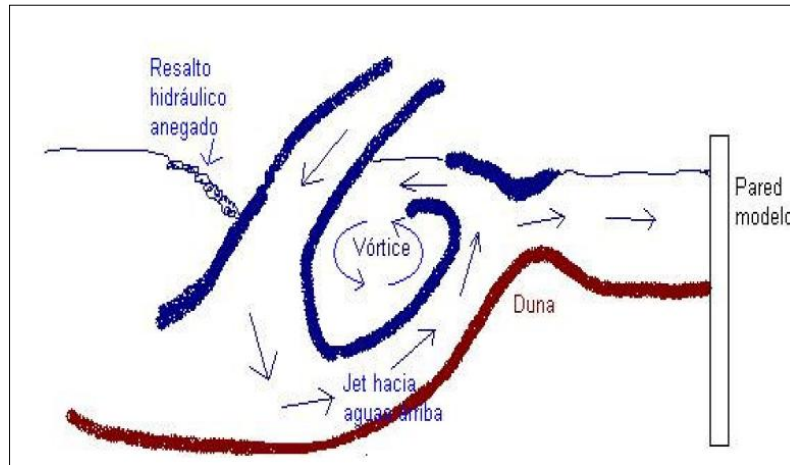
Figura No 2.6: Esquema del chorro ascendente hacia aguas abajo.



Fuente: CID SOLÉ, Jordi. “Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esquí” Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesis. 2004. 153 p.

El chorro que en la zona de impacto se dirige hacia aguas arriba es el responsable de la erosión tras la zona de impacto y de la generación del vórtice de eje horizontal, tal como se puede apreciar en la figura No 2.7. El vórtice de eje horizontal se sitúa tras la zona de impacto de la caída. La duna asociada al chorro no se puede ver en el foso final ya que es barrida por el retroceso de la zona de impacto al disminuir el caudal.

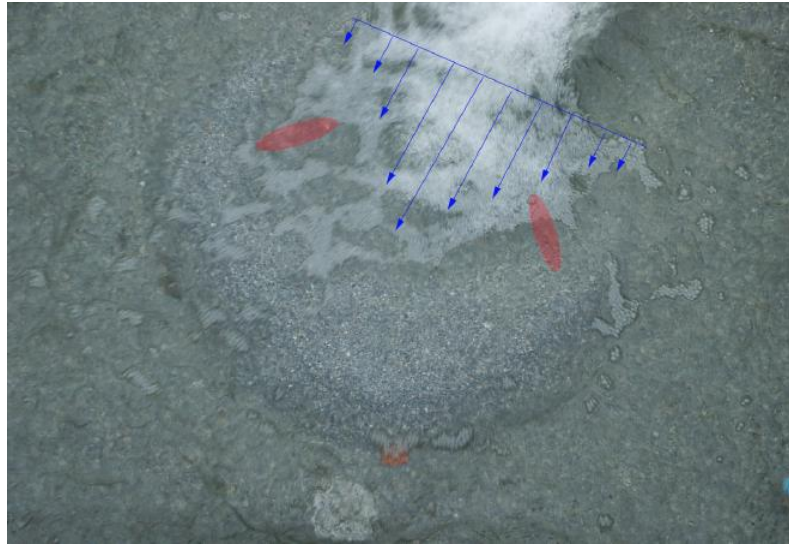
Figura No 2.7: Esquema del chorro ascendente hacia aguas arriba



Fuente: CID SOLÉ, Jordi. “Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esquí” Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesis. 2004. 153 p.

La geometría de la duna asociada, ver figura No 2.8, generalmente presenta una forma de media luna. La explicación de esta forma peculiar está relacionada con la distribución de velocidades longitudinal y transversal de un chorro. La longitud del foso de erosión y de la posición de la cresta de la duna será mayor en el eje del chorro que en las esquinas, ya que la velocidad en el chorro disminuye transversalmente a medida que nos alejamos del eje del mismo y longitudinalmente a medida que nos alejamos del origen del chorro. Como la velocidad es máxima en el eje del chorro, las tensiones tangenciales asociadas también serán mayores, afectando mayor longitud de lecho, generando mayor erosión y transportando las partículas más lejos.

Figura No 2.8: Geometría de la duna, perfil de velocidad y zonas donde se producen los derrumbes de los taludes.



Fuente: CID SOLÉ, Jordi. “Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esquí” Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesis. 2004. 153 p.

La socavación progresara hasta que se obtenga un colchón de agua suficiente en donde el chorro turbulento se difunde totalmente y las velocidades y fluctuaciones de presión han disminuido hasta un cierto nivel, de tal forma que no son capaces de movilizar y extraer el material del fondo.

En prototipo la difusión del chorro en la masa de agua del cuenco amortiguador generalmente se produce un fenómeno que se conoce como atomización debido a la difusión del chorro aireado y salpicaduras, se forma a partir de velocidades mayores a 20 m/s y alturas de caída mayores a 20m¹¹. El flujo atomizado podría producir fuertes lluvias, así como una densa niebla en una determinada zona inmediatamente aguas abajo de la presa bajo la influencia del viento y la topografía, por ello en las obras hidráulicas se puede producir inundaciones, deslizamientos de tierra, etc. De tal modo que la investigación sobre este fenómeno es muy importante.

¹¹ CASTILLO, L, PUERTAS, J., DOLZ, J., “Análisis conjunto de las formulaciones de socavación y presión dinámica media al pie de presas.” 12 p.

2.3 GENERALIDADES SOBRE LAS ZONAS DE RECIRCULACIÓN EN EL CUENCO AMORTIGUADOR¹².

La acción del chorro conduce a una sobreelevación del nivel libre del agua hacia aguas abajo por efecto de la turbulencia generada y un nivel más bajo hacia aguas arriba por efecto de la succión

Si el chorro se descarga en una gran masa de agua, sería óptimo pues la recirculación también tiene su origen por una configuración no adecuada con respecto a los flujos internos de la masa de agua. La recirculación en el cuenco pre-excavado puede producir erosiones inconvenientes para la estabilidad de obras cercanas. Para corregir el problema de recirculación se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Geometría adecuada del cuenco preexcavado.
- b) Aumentar el ángulo de incidencia del chorro
- c) Alargar el chorro (Variar el ángulo de salida del deflector).

2.4 DESARROLLO, PROFUNDIDAD Y UBICACIÓN DEL FOSO SOCAVADO AL PIE DE LA PRESA.

La mayor parte de los estudios del foso de socavación aguas abajo de caídas con saltos en esquí han sido motivados por la necesidad de evaluar la erosión máxima posible aguas abajo de los vertederos de las grandes presas. Todos estos estudios consideran que el material erosionable es no cohesivo y cuyo espesor es infinito.

2.4.1 DESARROLLO DEL FOSO SOCAVADO.

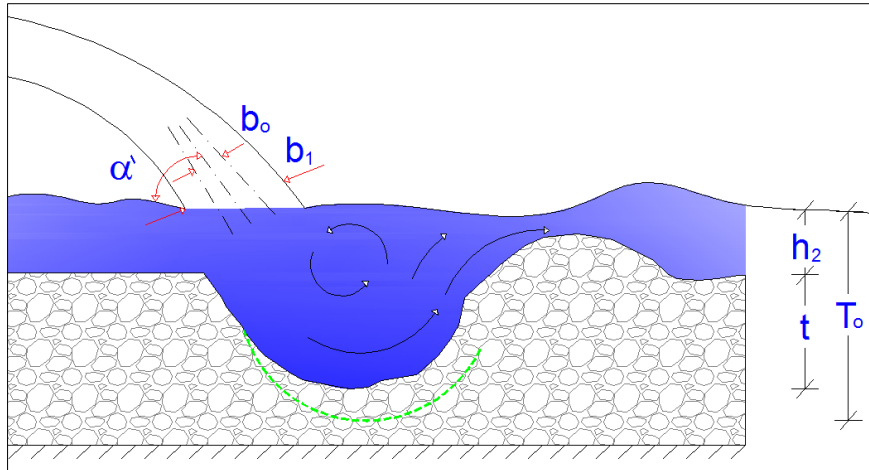
Cuando el nivel de agua en el lecho o cuenco amortiguador es mayor que la profundidad de disturbio del chorro, es decir el chorro sumergido no impacta con el lecho entonces no se forma el foso.

¹² ARGÜELLO, W. "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." Tesis de Grado. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 1991.111 p.

Cuando la profundidad del agua es menor que la profundidad de disturbio del chorro, el chorro sumergido excava los materiales sueltos del lecho. La ecuación para determinar la profundidad de disturbio del chorro (T_o) se expresa como:

$$T_o = \frac{K V q \operatorname{sen}^2 \alpha'}{g b_1 \left(1 - \frac{b_o}{b_1}\right)} \quad (2.9)$$

Figura No 2.9: Profundidad de disturbio del chorro.



Donde:

q = Caudal unitario ($(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$).

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

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

α' = Ángulo de impacto del chorro ($^\circ$)

K = Coeficiente de seguridad (1 - 1.1)

$$b_o = \frac{q}{V} \quad (\text{m}) \quad (2.10)$$

Donde: b_o = Espesor del chorro (m). $V = \varphi \sqrt{g h}$: φ = Coeficiente de velocidad (0.90),

h = Nivel de agua entre aguas arriba y aguas abajo (m)

$$b_1 = h_o + \frac{JX}{20} \quad (\text{m}) \quad (2.11)$$

Donde: b_1 = Espesor del chorro incluye la aireación (m), h_o = Profundidad de agua en el esquí (m), X = longitud de trayectoria del chorro (m), J = Coeficiente de Reynolds, Re = Número de Reynolds en el esquí.

$$J = \frac{0.8 * 10^4}{Re + 0.1} \quad ; Re (8000-100000) \quad (2.12)$$

El proceso de socavación se produce cuando chorro sumergido excava los materiales sueltos y por lo tanto la pendiente de la fosa en la parte más baja es mayor que en la parte de arriba o acumulada, cuando la acumulación de los materiales aguas abajo es demasiado grande y la pendiente de los taludes del foso es muy pronunciado, entonces se produce una falla de la pendiente, el foso socavado será rellenado con las partículas colapsadas, después serán excavados una vez más y llevados hacia afuera, repitiéndose este proceso hasta cuando ninguna partícula sea llevada hacia la parte superior de la acumulación de los materiales del foso, por lo que no se aumentará la profundidad de socavación en el cuenco amortiguador a esto se lo conoce como un estado de equilibrio estático. Debido al desarrollo descrito se puede decir que la geometría del foso es inestable en el proceso de socavación.

El efecto de la forma irregular del foso genera corrientes secundarias, la erosión de los remolinos de agua causa gran turbulencia el mismo que rompe las rocas por colisión y abrasión¹³.

2.4.2 PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL FOSO SOCAVADO.

En la literatura técnica existe una coincidencia importante en cuanto a las variables que intervienen en el proceso, apareciendo únicamente discrepancias en los coeficientes de ajuste de los datos experimentales.

Existen varias relaciones desarrolladas para la predicción de la profundidad de socavación que van desde aquellas extensas en donde intervienen una serie de parámetros tales como: la descarga, carga de llegada, geometría del esquí, nivel de agua en el cuenco

¹³ ARGÜELLO, W. “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.” Tesis de Grado. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 1991.111 p.

amortiguador, característica mecánica de la roca y aquellas relaciones simples en donde se tienen parámetros como: la descarga, carga de llegada, profundidad de agua aguas abajo, independiente de las características de las rocas.

Es necesario indicar que las ecuaciones para calcular la profundidad socavación se limita a la estimación de la profundidad máxima de socavación probable que se produzca durante el funcionamiento de los vertederos a lo largo de los años. Además para complementar la información anterior se debe tener en cuenta otros aspectos que son mucho más importantes para el diseñador como la extensión del área de socavación, patrón de socavación adyacente a la estructura, y la variación de socavación en relación con los pequeños cambios en la geometría de la estructura. La aplicación de relaciones complejas a menudo se dificulta en determinar las características mecánicas de roca (que se requieren para la investigaciones en profundidad de socavación) y que, después de todo, ofrecen casi el mismo resultado que se podría obtener mediante el uso de relaciones muy simples¹⁴.

Las bases teóricas de la socavación por el chorro de agua no son muy diferentes a las usadas en el resto de fenómenos relacionados con el transporte de sedimentos. Consiste en compensar fuerzas, se conoce tres casos en este ámbito de estudio.

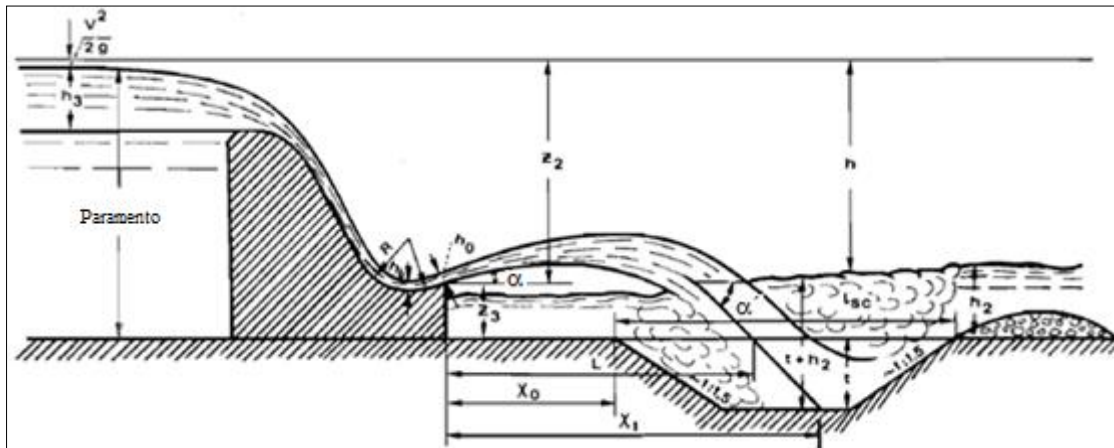
- 1.- Resultado de compensar la velocidad ascensional del chorro con la velocidad de caída de la partícula.
- 2.- Compensar las tensiones de fondo con las tensiones de inicio de movimiento.
- 3.- Aplicar directamente la segunda ley de Newton, aplicando el equilibrio horizontal de fuerzas específicas.

El primer caso sería más típico del transporte en suspensión mientras que el segundo sería característico del transporte de fondo. Además se estudia la influencia que tiene la aireación en la profundidad de los fosos de erosión.

Las relaciones siguientes, consideradas con la debida prudencia, por la complejidad del fenómeno, permiten una evaluación preliminar de la profundidad de la socavación debida a la acción del chorro descargado.

¹⁴ KHATSURIA, R., M. "Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators." New York. Marcel Dekker. 2005. 629 p.

Figura No 2.10: Parámetros que interviene en la predicción de la profundidad de socavación.



Fuente: WHITTAKER, J. "Scour Related to Energy Dissipators for Head Structures." Zúrich. 1984. 73 p.

2.4.2.1 Ecuación de Damle (1966).- En base a investigaciones a partir de estudios de modelos y justificados con los datos de prototipos, se tiene la siguiente, $t + h_2 = A(q z_2)^{0.5}$ sin embargo esta ecuación no es dimensionalmente homogénea, por lo que se requiere que la ecuación tenga la siguiente forma.

$$t + h_2 = A \left(\frac{q z_2}{\sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (2.13)$$

Donde:

t = Profundidad del foso socavado (m).

h_2 = Profundidad de agua en el cuenco amortiguador (m).

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

z_2 = Altura desde el nivel del embalse hasta el nivel labio del esquí (m).

A = Coeficiente que indica el estado de socavación: (2.4 – 4.5) = socavación máxima última, (1.4 - 2.3) = Probable socavación en operación continuo, (0.9 - 1.3) = Socavación mínimo esperada.

2.4.2.2 Ecuación de Veronese Modificada (1976).- La siguiente expresión es recomendada para vertederos con saltos en esquí y corresponde a una versión modificada de la ecuación de Veronese.

$$t + h_2 = 1.90 q^{0.54} h^{0.225} \text{sen } \alpha' \quad (\text{m}) \quad (2.14)$$

Donde:

t = Profundidad del foso socavado (m).

h_2 = Profundidad de agua en el cuenco amortiguador (m).

q = Caudal unitario, ((m³/s)/m).

h = Altura desde el nivel de carga del embalse hasta el nivel de restitución, (m).

α' = Ángulo de impacto del chorro en el cuenco amortiguador (°).

2.4.2.3 Ecuación de Martins.- Esta ecuación empírica se basa en observaciones en prototipo con lo cual se tiene.

$$t + h_2 = 1.5 q^{0.6} z_2^{0.1} \quad (\text{m}) \quad (2.15)$$

Donde:

t = Profundidad del foso socavado (m).

h_2 = Profundidad de agua en el cuenco amortiguador (m).

q = Caudal unitario, ((m³/s)/m).

z_2 = Diferencia entre el nivel de agua aguas arriba y labio del salto en esquí (m).

2.4.2.4 Ecuación de Chian Min Wu.- Esta es una ecuación simple similar a la de Veronese y Martins, en esta ecuaciones no se toma en cuenta la influencia de sedimento en el proceso de erosión.

$$t + h_2 = 1.18 h^{0.235} q^{0.51} \quad (\text{m}) \quad (2.16)$$

Donde:

t = Profundidad del foso socavado (m).

h_2 = Profundidad de agua en el cuenco amortiguador (m).

q = Caudal unitario, ((m³/s)/m)

h = Altura desde el nivel de carga del embalse hasta el nivel de restitución (m).

2.4.2.5 Ecuación de Mason (1985 - 1989).- La expresión 2.17 la obtuvo el autor utilizando los datos correspondientes a modelos a escala, siendo este su rango de aplicabilidad.

$$t + h_2 = 3.27 \frac{q^{0.6} h^{0.05} h_2^{0.15}}{g^{0.3} d_m^{0.06}} \quad (\text{m}). \quad (2.17)$$

Posteriormente demostró que la altura desde el nivel del embalse hasta el nivel de agua en el cuenco no afecta directamente a la profundidad de socavación, sino la variación de la cantidad de aire que entra en el cuenco amortiguador, esto afecta la fuerza sobre las partículas del material del lecho.

$$t + h_2 = 3.39 \frac{q^{0.6} (1 + \beta)^{0.5} h_2^{0.16}}{g^{0.3} d_m^{0.06}} \quad (\text{m}). \quad (2.18)$$

Donde:

t = Profundidad del foso socavado (m).

h = Altura desde el nivel de carga del embalse hasta el nivel de restitución, (m).

h_2 = Profundidad de agua en el cuenco amortiguador (m).

β = Volumen de aire con relación al agua.

q = Caudal unitario ((m³/s)/m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

d_m = Tamaño medio del material suelto en el cuenco (m).

La relación de aireación se $\beta = \frac{q_a}{q}$, también se puede expresar así:

$$\beta = 0.13 \left[1 - \frac{V_e}{V_i} \right] \left[\frac{h}{b_o} \right]^{0.45} \quad (2.19)$$

Donde:

V_e = Velocidad de arrastre equivalente a 1.10 m/s

V_i = Velocidad de impacto del chorro (m/s)

h = Altura desde el nivel de carga del embalse hasta el nivel de restitución, (m).

b_o = Espesor del chorro en el impacto

2.4.2.6 Ecuación de Soloveva.- Esta ecuación se desarrolló basándose en un lecho rocoso coherente en donde puede ser considerado como material no cohesivo o roca no fracturada.

$$t + h_2 = 0.45 h_o F_o^{1.5} \left(\frac{h_2}{d_m} \right)^{0.25} \quad (m). \quad (2.20)$$

La ecuación 2.20 se realizó para un ángulo de despegue del chorro de 35° y número de Froude mayor a 5.5.

Donde:

t = Profundidad del foso socavado (m).

h_2 = Profundidad de agua en el cuenco amortiguador (m).

F_o = Número de froude.

h_o = Tirante de agua a la salida de la cresta del salto en esquí (m)

d_m = Diámetro característico del material. (m).

2.4.3 CLASIFICACIÓN GLOBAL DE LA ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN.

Para obtener una visión general y conjunta de la investigación realizada sobre el tema de la erosión en caídas con fondo granular no cohesivo podemos recurrir a la clasificación que se encuentra en Mason et al (1985), Además se unificó el sistema de unidades de todas ellas al S.I., para lo que tuvieron que reajustar las constantes de muchas de ellas.

2.4.3.1 Grupo I.- Los autores usan una formulación del tipo de expresión 2.21, donde t_o es la profundidad máxima de socavación, q es el caudal unitario (m^3/s), h la altura de la caída de agua (m), del diámetro característico de las partículas (m) y K una constante.

$$t_o = K \frac{q^x h^y}{d^z} \quad (2.21)$$

La única diferencia entre los diversos autores proviene de los exponentes x , y , z . En la tabla No 2.1 podemos ver los exponentes utilizados.

Tabla No 2.1: Valores de la constante, los exponentes y diámetro a utilizar en la expresión No 2.21 para los diferentes autores

Autor	Año	K	x	y	z	d
Schoklitsch	1932	0.521	0.570	0.200	0.320	d90
Veronese (a)	1937	0.202	0.540	0.225	0.420	dm
Veronese (a)	1937	1.900	0.540	0.225	0.000	--
Eggenburger	1944	1.440	0.600	0.500	0.400	d90
Hartung	1959	1.400	0.640	0.360	0.320	d85
Franke	1960	1.130	0.670	0.500	0.500	d90
Damle (a)	1966	0.652	0.500	0.500	0.000	--
Damle (b)	1966	0.543	0.500	0.500	0.000	--
Damle (c)	1966	0.362	0.500	0.500	0.000	--
Chee y Padiyar	1969	2.126	0.670	0.180	0.063	dm
Bisaz y Tschopp	1972	2.760	0.500	0.250	1.000	d90
Chee y Kung	1974	1.663	0.600	0.200	0.100	dm
Martins (b)	1973	1.500	0.600	0.100	0.000	--
Taraimovich	1978	0.633	0.670	0.250	0.000	--
Machado	1980	1.350	0.500	0.315	0.065	d90
SOFRELEC	1980	2.300	0.600	0.100	0.000	--
INCYTH	1981	1.413	0.500	0.250	0.000	--

Destaca un valor medio para la x de 0.5, un valor para la y de 0.2-0.3 y una cierta dispersión para los exponentes del diámetro. Esto puede ser consecuencia de varios factores, entre ellos está la dificultad de caracterizar una granulometría con un solo valor.

2.4.3.2 Grupo II.- Se incluyen las fórmulas que consideran la influencia del colchón de agua presente en el foso, en este grupo encontramos dos autores: Jaeger (1956) y Martins (1973).

2.4.3.3 Grupo III.- Varios autores utilizan fórmulas simplificadas. El primer de estos autores es Cola cuya fórmula es que la profundidad del foso de erosión es igual a cuarenta veces el espesor del chorro de agua. En segundo lugar encontramos a Davis y Sorensen cuya fórmula es que la profundidad del foso de erosión es igual a dos tercios la altura de la caída de agua. Finalmente tenemos a Hartung y Haustler cuya fórmula para un chorro circular es que la profundidad del chorro de erosión es igual a veinte veces el diámetro del chorro.

2.4.4 UBICACIÓN DE LA FOSA DE SOCAVACIÓN¹⁵.

Los disipadores de energía con saltos en esquí, son de gran utilidad en la práctica por su probada eficacia, sin embargo la predicción del foso que habrá de producirse aguas abajo de la estructura está sujeta a un cierto grado de incertidumbre. En el foso o también llamado cono de socavación se produce el impacto del chorro y ocurrencia de fuerte turbulencia, es por lo tanto que al mencionado cono de socavación se puede identificar como el real disipador de energía. La ubicación de la fosa de socavación viene dado con la siguiente expresión.

$$L_{vc} = L_v + \frac{t_o}{\tan \alpha'} \quad (m) \quad (2.22)$$

Donde:

t_o = Profundidad de socavación máxima (m).

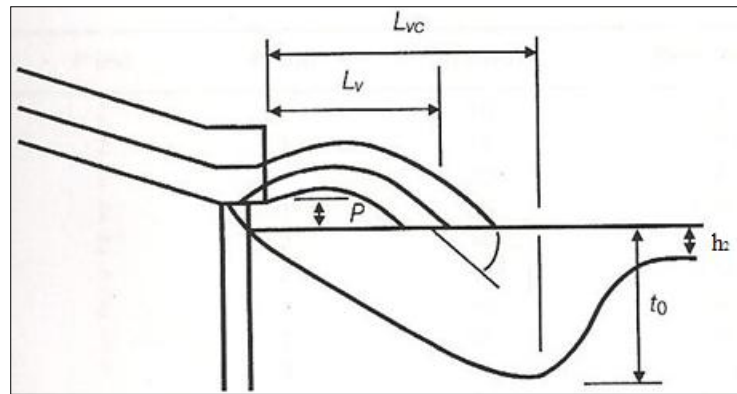
¹⁵ PARDO-GÓMEZ, R. "Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo". Ingeniería hidráulica en México. abril-junio de 2008. 111-121 p

L_{vc} = Distancia horizontal desde la presa (salto en esquí) hasta que se produce la mayor profundidad de la fosa de socavación (m).

L_v = Distancia horizontal desde la presa (salto en esquí) hasta el impacto de chorro en la superficie de agua en el cuenco amortiguador (m).

α' = Ángulo de entrada del chorro a la superficie de agua en el cuenco amortiguador ($^\circ$).

Figura No 2.11: Esquema de la ubicación del foso



Fuente: Pardo-Gómez, R., “Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo”, Ingeniería hidráulica en México., abril-junio de 2008.

Además L_v y α' se determina según las siguientes expresiones: La ecuación 2.24 es la misma que la ecuación 2.4.

$$L_v = \left[\frac{V_1^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} + V_1 \cos \alpha \sqrt{\frac{V_1^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{2(P+h_1)}{g}} \right] K \quad (\text{m}). \quad (2.23)$$

$$\alpha' = \arctan \left(\sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{2g(P+h_1)}{V_1^2 \cos^2 \alpha}} \right) \quad (^\circ). \quad (2.24)$$

Donde:

V_1 = Velocidad del flujo a la entrada del salto en esquí (final de la rápida) (m/s)

h_1 = Tirante de circulación a la entrada del salto en esquí (final de la rápida) (m).

P = Altura medida desde la salida del salto en esquí hasta la superficie de agua en el cuenco amortiguador (m).

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

K = Coeficiente que toma en cuenta la aireación del chorro; se sigue tomar $K = 0.90$

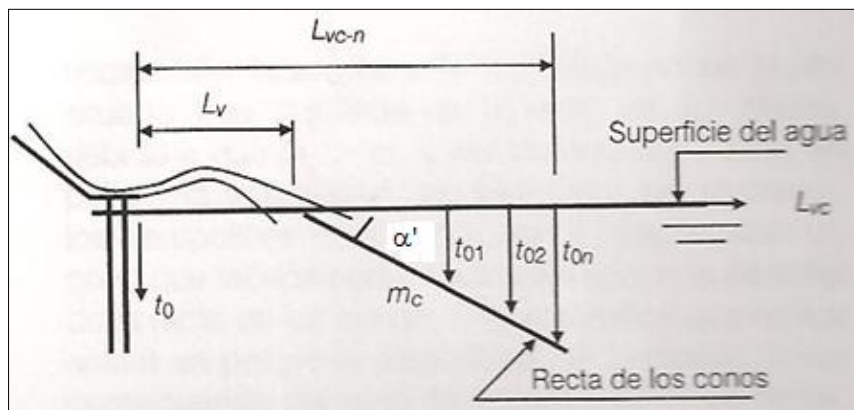
α = Ángulo de salida del chorro desde el salto en esquí ($^\circ$).

Se observa en las ecuaciones 2.23 y 2.24 que las variables del lado derecho son fijas para una condición de diseño determinada y por lo tanto, también L_v lo es. A partir de lo anterior se puede concluir que la ecuación 2.22 corresponde a una línea recta de pendiente.

$$m_c = \frac{1}{\tan \alpha'} \quad (2.25)$$

Todos los pares de valores ($L_{vc}; t_o$) quedan situados sobre una recta, tal como lo expresa la ecuación 2.22 a la que se denomina recta de conos.

Figura No 2.12: Esquema del foso, recta de conos.



Fuente: PARDO-GÓMEZ, R. “Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo”. Ingeniería hidráulica en México. Abril-Junio de 2008. 111-121 p.

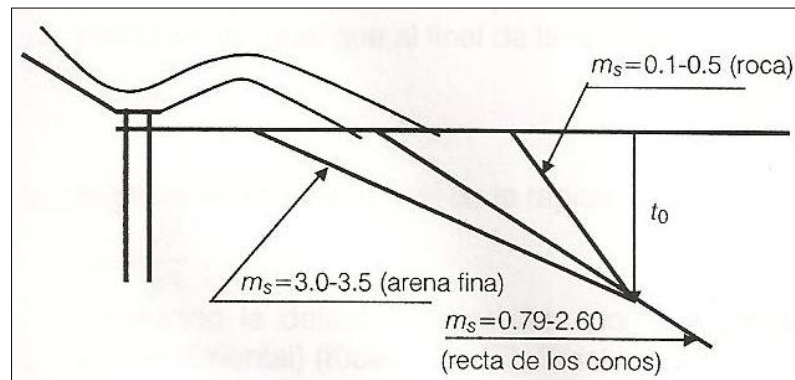
Tabla No 2.2: Valores de talud de reposo m_s , para diferentes tipos de suelo.

SUELO	m_s
Arena fina	3.0 - 3.5
Arena	2.5 - 3.0
Rocoso, Tierra, Arena gruesa	2.0 - 2.5
Tierra arcillosa ligera, tierra arenosa densa	1.5 - 2.0
Grava y arena-grava, cascajo grueso	1.5
Arcilla pesada, Loess denso, arcilla	1.0 - 1.5
Arcilla densa pesada, aluvión compacto	1.0
Roca	0.1 - 0.5

Se debe realizar un análisis en donde debe verificarse:

- a) Si $m_c \geq m_s$ El talud de aguas arriba de la fosa de socavación sale a la derecha o sobre la recta de conos y la presa no corre riesgos.
- b) Si $m_c < m_s$ El talud de aguas arriba de la fosa de socavación sale a la izquierda o debajo la recta de conos y la presa pudiera correr riesgos.

Figura No 2.13: Relación entre m_s y m_c



Fuente: PARDO-GÓMEZ, R. “Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo”. Ingeniería hidráulica en México. Abril-Junio de 2008.

Por otro lado se considera que el foso socavado afecta la estabilidad de la presa, cuando esta penetra debajo de la rápida, es decir puede penetrar hasta debajo del propio salto en esquí y ello no afecta la estructura del vertedero. De manera que si conocemos que la fosa se produce aguas abajo del salto en esquí a una distancia L_{vc} y se define la longitud del salto en esquí como $L_{esquí}$, además sabiendo que la salida del foso desde el punto más bajo hasta el nivel del salto en esquí es $X_{fosa} = m_s(t_0 + P)$ entonces sí:

$$L_{esquí} + L_{vc} > m_s(t_0 + P) \quad (2.26)$$

Esto implica que el foso no afecta la estabilidad del vertedero y en general de la presa, caso contrario si lo afectaría.

2.4.5 LONGITUD DEL FOSO (L)

La ecuación 2.27 la obtuvo Martins para la longitud del foso (L) donde t es la profundidad del foso de erosión (m), medida desde el lecho original, α' es el ángulo de impacto del chorro con respecto a la horizontal y b_o espesor del chorro de agua.

$$L = (0.8 + 2 \cos(\alpha')) \sqrt[4]{t(t + b_o)^3} \quad (2.27)$$

2.4.6 ANCHO DEL FOSO (A)

La ecuación 2.28 la obtuvo Martins para la anchura del foso (A) donde las variables tienen el mismo significado que la ecuación 2.27

$$A = 1.6 \sqrt[4]{t(t + b_o)^3} \quad (2.28)$$

2.5 CONCLUSIONES.

- Se concluye que durante el proceso de socavación, el foso socavado tiene una geometría inestable, debido a que el chorro sumergido excava los materiales del lecho rocoso.
- Se concluye que en la literatura técnica existe una extensa variedad de ecuaciones para la estimación de la profundidad de socavación y que muchos autores coinciden en la utilización de las variables que intervienen en el fenómeno, diferenciándolos únicamente por los coeficientes utilizados. Las ecuaciones mencionados en el numeral 2.4.2., permiten una evaluación preliminar de la profundidad de socavación.
- Con un modelo físico se puede verificar las bases teóricas e hipótesis empíricas existentes, para determinar las características geométricas del foso socavado producto de los chorros descargados desde saltos en esquí.
- Se concluye que algunas ecuaciones de la literatura técnica para el cálculo de la profundidad de socavación dimensionalmente no son correctas ya que los exponentes de ajuste obligan a utilizar constantes de corrección de unidades dimensionales, pero que no las valida ni descarta tomando en cuenta que son adaptadas a la escala de experimentación con que se ajustaron modelo y prototipo.
- Conforme el chorro penetra en el colchón de agua, éste pierde potencia, por lo se puede concluir que si se tiene mayor profundidad de agua en el cuenco amortiguador la socavación no se produce o es menor, mientras que si se tiene menor colchón de agua la profundidad del foso es mayor.

CAPITULO 3

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO DE SOCAVACIÓN POR IMPACTO DEL CHORRO DE AGUA EN UN CUENCO DE MATERIAL SUELTO.

3.1 BASES DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA.

La condición de la similitud geométrica define la relación que existe entre las longitudes del prototipo con las longitudes del modelo, a esto se establece como escala de longitudes.

$$e_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (3.1)$$

Siendo:

e_L = Escala de longitud.

L_p = Longitud en prototipo.

L_m = Longitud en modelo.

3.2 BASES DE LA SIMILITUD CINEMÁTICA.

La representación del patrón de flujo o distribución de velocidades en el tiempo debe ser igual tanto en modelo como en prototipo. Si relacionamos la magnitud física, la velocidad de los dos sistemas observando la condición de homólogas y acordes, se tiene la escala de velocidades.

$$e_v = \frac{e_L}{e_T} \quad (3.2)$$

Siendo:

e_v = Escala de velocidad.

e_L = Escala de longitud.

e_T = Escala de tiempo.

3.3 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA.

En cuanto a la representatividad de las fuerzas que intervienen en el prototipo lo más frecuente y físicamente posible de alcanzar, es dar prioridad a la fuerza más importante que condiciona el fenómeno hidráulico en el prototipo y representarla en el modelo a través de la identidad de uno solo de los parámetros, sea Froude, Reynolds, Weber, Mach. Es así que al no poder lograr una similitud hidráulica perfecta se trata de alcanzar una similitud restringida o particular¹⁶

Tabla No 3.1 Similitud restringida o particular

FUERZA PREDOMINANTE	IDENTIDAD	SIMILITUD PARTICULAR	TIPO DE MODELO
F _g gravitacional	F _o = F _{om}	Froude	froudiano
F _μ viscosa	Re = Re _m	Reynolds	viscoso
F _σ tensión superficial	W = W _m	Weber	—————
F _E elástica	Ma = Ma _m	Mach, F _o	elástico
F _g , F _μ	F _o = F _{rm} ; y, Re = Re _m (simultáneo)	Froude-Reynolds	grávico-viscoso

Fuente: Hidalgo, M. (2007) “Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones_básicas.” Quito. Departamento de hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Pág. 33

3.3.1 SIMILITUD DE FROUDE.

Es aquella cuando se tiene una influencia de las fuerzas gravitacionales o de peso, dentro de esta clasificación tenemos aquellos movimientos o fenómenos con superficie libre que se desarrolla por la acción de la gravedad y en los que las pérdidas de energía no sean despreciables. Tal es el caso del movimiento del agua a través de un vertedero, donde es suficiente que sólo se dependa de la geometría del contorno y del número de Froude y por ende los efectos de las demás fuerzas sea mínimo que puedan ser despreciables. Es importante señalar que la similitud de Froude se puede deducir directamente de la pendiente hidráulica o motriz.

$$I = \frac{f V^2}{2 g D} \quad (3.3)$$

¹⁶ HIDALGO, Marcelo. “Introducción a la teoría de los Modelos Hidráulicos y Aplicaciones básicas”. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 2007. 62 p.

Dónde:

I = Pendiente hidráulica.

f = Coeficiente de fricción.

V = Velocidad del flujo.

g = Aceleración de la gravedad.

D = Longitud característica.

Esta expresión aplicando a modelo y a prototipo nos queda lo siguiente:

$$e_I = e_f \frac{F_{Op}^2}{F_{Om}^2} \quad (3.4)$$

Dónde:

e_I = Escala de pendiente hidráulica.

e_f = Escala de coeficiente de fricción.

F_{Op} = Número de Froude en prototipo.

F_{Om} = Número de Froude en modelo.

De la ecuación 3.4 para una igualdad de pendientes hidráulicas $I_p = I_m$ se tiene que $e_I = 1$ y además la igualdad del grado de turbulencia $f_p = f_m$ por lo que tenemos $e_f = 1$. De la deducción resulta que el número de Froude que involucra las fuerzas de inercia y de gravedad debe ser la misma tanto en modelo como en prototipo $F_{Op} = F_{Om}$.

En la siguiente tabla se indica las leyes de transposición de magnitudes, según la ley de similitud de Froude.

Tabla No 3.2 Equivalencias según la ley de similitud de Froude.

Magnitudes Geométricas	Equivalencias
Longitud	$L_p = L_m (e_L)$
Area	$A_p = A_m (e_L)^2$
Volumen	$V_p = V_m (e_L)^3$
Rugosidad	$n_p = n_m (e_L)^{1/6}$
Magnitudes Cinemáticas	
Tiempo	$t_p = t_m (e_L)^{1/2}$
Velocidad	$V_p = V_m (e_L)^{1/2}$
Aceleración	$a_p = a_m$
Caudal	$Q_p = Q_m (e_L)^{5/2}$
Magnitudes Dinámicas	
Número de Reynolds	$Re_p = Re_m (e_L)^{3/2}$
Masa	$M_p = M_m (e_L)^3$
Fuerza	$F_p = F_m (e_L)$
Energía	$E_p = E_m (e_L)$
Potencia	$P_p = P_m (e_L)^{7/6}$

Fuente: Arguello, 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”, Tesis de Grado: Quito. Escuela Politécnica Nacional - Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

Si bien existe un acuerdo generalizado sobre la semejanza a aplicar para la modelación hidráulica del foso socavado producido por el chorro libre descargado desde un salto en esquí (semejanza de Froude), la semejanza a aplicar en el caso de la granulometría no es tan sencillo, ya que las fuerzas preponderantes en el fenómeno de erosión y sedimentación son diferentes.

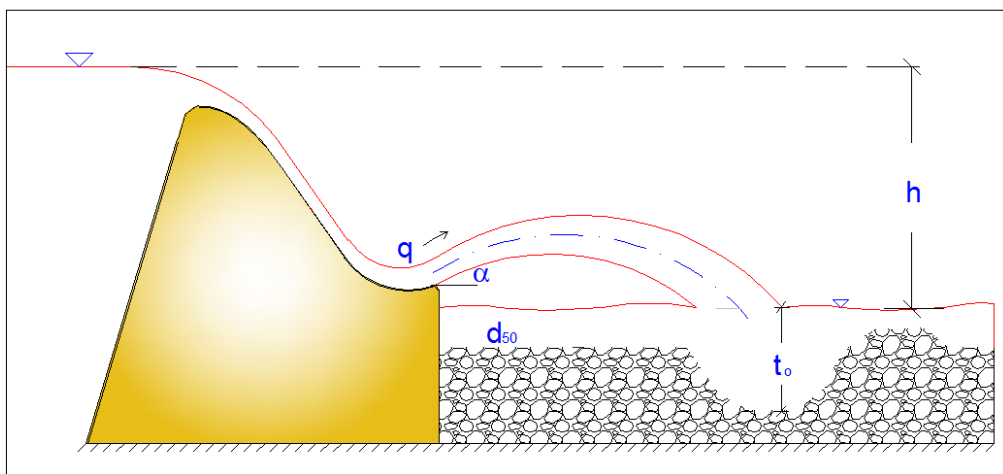
Las ecuaciones para la estimación de la profundidad máxima de erosión mencionadas en el capítulo 2, conduce a dos problemas: en primer lugar hay muchas formulaciones que dimensionalmente no son correctas ya que los exponentes de ajuste obligan a utilizar constantes de corrección de unidades dimensionales, la mayor parte de fórmulas no resisten la aplicación de la semejanza de Froude, lo que en principio no las valida

ni descarta, pero que obliga a emplearlas con las variables adaptadas a la escala de experimentación con que se ajustaron (modelo-prototipo).

3.3.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL.

Planteándose el problema de la socavación al pie de la presa se puede establecer la dependencia que existe entre la profundidad máxima de socavación y las variables geométricas, cinemáticas y dinámicas.

Figura No 3.1 Parámetros para determinar la profundidad de socavación



Entre las variables geométricas tenemos:

h = Diferencia de nivel que hay desde aguas arriba del vertedero hasta aguas abajo del impacto del chorro.

α = Ángulo de salida del chorro.

d = Diámetro nominal del material suelto.

Entre las variables cinemáticas tenemos:

q = Caudal unitario.

Entre las variables dinámicas tenemos:

γ_s = Peso específico del material.

γ = Peso específico del agua.

g = Gravedad.

Una vez conocidas las variables que intervienen en el fenómeno se aplican el teorema π o de Buckingham para determinar los parámetros adimensionales: Como primer paso identificamos el número de magnitudes y las magnitudes fundamentales.

- Número de magnitudes.- $(t_0, h, q, d, \gamma_s, \gamma, g, \alpha) \rightarrow r = 8$

- Magnitudes fundamentales.- $(L, M, T) \rightarrow m = 3$

De acuerdo al teorema π o de Buckingham se tiene la función general del análisis que se indica en la ecuación 3.5.

$$0 = f(t_0, h, q, d, \gamma_s, \gamma, g, \alpha) \quad (3.5)$$

Los monomios adimensionales resulta $\pi = r - m = 8 - 3 = 5$ por lo tanto se tiene:

$$0 = 1 (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (3.6)$$

Para encontrar los grupos adimensionales, tomamos los parámetros d, g, γ , para el dimensional de la matriz característica cuyo determinante no es nulo, por tanto el arreglo planteado tiene solución.

Tabla No 3.3 Matriz Característica

Magnitudes	M	L	T
d	0	1	0
g	0	1	-2
γ	1	-3	0
t_0	0	1	0
h	0	1	0
q	-2	1	0
γ_s	1	-3	0
α	0	0	0

3.3.2.1 Resolución del adimensional π_1 .- Determinamos este parámetro adimensional con los parámetros d, g, γ en función de la profundidad máxima de socavación.

$$\pi_1 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta t_o \quad (3.7)$$

Procedemos a determinar los valores φ , β , δ planteando un sistema de ecuaciones en donde se resuelve 3 incógnitas.

$$\pi_1 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta t_o \quad \varphi + \beta - 3\delta + 1 = 0 \rightarrow \varphi = -1$$

$$\pi_1 = (L)^\varphi (L T^{-2})^\beta (M L^{-3})^\delta L \quad \delta = 0$$

$$\pi_1 = L^{\varphi+\beta-3\gamma+1} M^\delta T^{-2\beta} \quad -2\beta = 0 \rightarrow \beta = 0$$

Reemplazando los coeficientes encontrados anteriormente, en la ecuación 3.7. $\pi_1 = d^{-1} g^0 \gamma^0 t_o$, y simplificando se tiene.

$$\pi_1 = \frac{t_o}{d} \quad (3.8)$$

3.3.2.2 Resolución del adimensional π_2 .- Determinamos este parámetro adimensional con los parámetros d, g, γ en función de la diferencia de nivel que hay desde aguas arriba del vertedero hasta aguas abajo del impacto del chorro.

$$\pi_2 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta h \quad (3.9)$$

Procedemos a determinar los valores φ , β , δ planteando un sistema de ecuaciones en donde se resuelve 3 incógnitas.

$$\pi_2 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta h \quad \delta = 0$$

$$\pi_2 = (L)^\varphi (L T^{-2})^\beta (M L^{-3})^\delta L \quad -2\beta = 0 \rightarrow \beta = 0$$

$$\pi_2 = L^{\varphi+\beta-3\delta+1} M^\delta T^{-2\beta} \quad \varphi + \beta - 3\delta + 1 = 0 \rightarrow \varphi = -1$$

Reemplazando los coeficientes encontrados anteriormente, en la ecuación 3.9. $\pi_2 = d^{-1} g^0 \gamma^0 h$, simplificando se tiene.

$$\pi_2 = \frac{h}{d} \quad (3.10)$$

3.3.2.3 Resolución del adimensional π_3 .- Determinamos este parámetro adimensional con los parámetros d , g , γ en función del caudal unitario.

$$\pi_3 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta q \quad (3.11)$$

Procedemos a determinar los valores φ , β , δ planteando un sistema de ecuaciones en donde se resuelve 3 incógnitas.

$$\pi_3 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta q \quad \delta = 0$$

$$\pi_3 = (L)^\varphi (L T^{-2})^\beta (M L^{-3})^\delta L^2 T \quad -2\beta + 1 = 0 \rightarrow \beta = -1/2$$

$$\pi_3 = L^{\varphi+\beta-3\delta+2} M^\delta T^{-2\beta+1} \quad \varphi + \beta - 3\delta + 2 = 0 \rightarrow \varphi = -3/2$$

Reemplazando los coeficientes encontrados anteriormente, en la ecuación 3.11. $\pi_3 = d^{-3/2} g^{-1/2} \gamma^0 q$, simplificando se tiene.

$$\pi_3 = \frac{q}{d^{3/2} g^{1/2}} \quad (3.12)$$

3.3.2.4 Resolución del adimensional π_4 .- Determinamos este parámetro adimensional con los parámetros d , g , γ en función del peso específico del material suelto.

$$\pi_4 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta \gamma_s \quad (3.13)$$

Procedemos a determinar los valores φ , β , δ planteando un sistema de ecuaciones en donde se resuelve 3 incógnitas.

$$\pi_4 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta \gamma_s \quad \delta + 1 = 0 \rightarrow \delta = -1$$

$$\pi_4 = (L)^\varphi (L T^{-2})^\beta (M L^{-3})^\delta M L^{-3} \quad -2\beta = 0 \rightarrow \beta = 0$$

$$\pi_4 = L^{\varphi+\beta-3\delta-3} M^{\delta+1} T^{-2\beta} \quad \varphi + \beta - 3\delta - 3 = 0 \rightarrow \varphi = 0$$

Reemplazando los coeficientes encontrados anteriormente, en la ecuación 3.13. $\pi_4 = d^0 g^0 \gamma^{-1} \gamma_s$, simplificando se tiene.

$$\pi_4 = \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad (3.14)$$

3.3.2.5 Resolución del adimensional π_5 .- Determinamos este parámetro adimensional con los parámetros d, g, γ , en función del ángulo de salida del chorro.

$$\pi_5 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta \alpha \quad (3.15)$$

Procedemos a determinar los valores φ , β , δ planteando un sistema de ecuaciones en donde se resuelve 3 incógnitas

$$\pi_5 = d^\varphi g^\beta \gamma^\delta \alpha \quad \delta = 0$$

$$\pi_5 = (L)^\varphi (L T^{-2})^\beta (M L^{-3})^\delta \text{ (adimensional)} \quad -2\beta = 0 \rightarrow \beta = 0$$

$$\pi_5 = L^{\varphi+\beta-3\delta} M^\delta T^{-2\beta} \quad \varphi + \beta - 3\delta = 0 \rightarrow \varphi = 0$$

Reemplazando los coeficientes encontrados anteriormente, en la ecuación 3.15. $\pi_5 = d^0 g^0 \gamma^0 \alpha$, simplificando se tiene.

$$\pi_5 = \alpha \quad (3.16)$$

Reemplazando en la expresión 3.6, todos los grupos adimensionales encontrados:

$$0 = f_1\left(\frac{t_o}{d}, \frac{h}{d}, \frac{q}{d^{3/2} g^{1/2}}, \frac{\gamma_s}{\gamma}, \alpha\right) \quad (3.17)$$

$$\frac{t_o}{d} = f_2\left(\frac{h}{d}, \frac{q}{d^{3/2} g^{1/2}}, \frac{\gamma_s}{\gamma}, \alpha\right) \quad (3.18)$$

La relación entre el peso específico del material y el agua $\frac{\gamma_s}{\gamma}$ puede ser eliminado debido que puede ser una relación constante dependiendo del material, α el ángulo de despegue del chorro debido a que es fijo, mantiene una posición constante también puede ser eliminado, simplificando esta expresión tenemos:

$$\frac{t_o}{d} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{q}{d^{3/2} g^{1/2}}\right) \quad (3.19)$$

Es decir que la profundidad de socavación es función de la carga h, del caudal unitario, del diámetro del material del lecho.

Las características del material granular empleado en el modelo (su tamaño y densidad) deben elegirse de manera que el inicio del movimiento ocurra bajo las condiciones homólogas en modelo y prototipo. Del parámetro de Shields se debe cumplir que la tensión de corte adimensional debe ser igual en modelo y prototipo, si el modelo físico es no distorsionado resulta:

$$\lambda_{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)} \cdot \lambda_D = \lambda_L \quad (3.20)$$

Con esta ecuación podemos saber el material a emplear en el modelo, si el material del modelo es de origen mineral, igual que el prototipo la escala de densidades es igual a 1 por lo tanto la escala de diámetros es igual a la escala geométrica ($\lambda_D = \lambda_L$), es decir el material del cuenco debe reducirse en el modelo a la misma escala geométrica que el resto de las dimensiones¹⁷.

Si las profundidades máximas de socavación alcanzadas en modelo se transforma a magnitudes correspondientes en prototipo, se debe tomar en cuenta que el modelo tiene una escala de “tiempo morfológico,” diferente de la escala de tiempos según Froude, sin embargo Yalin (1985) propone que los procesos de arrastre y transporte del material sólido dentro del problema de socavación puede ser representado adecuadamente con escala de tiempos según Froude si es que satisface la condición¹⁸:

$$\lambda_{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)} \cdot \frac{\lambda_D}{\lambda_L} = 1 ; D_m \geq 1.8 \text{ mm} \quad (3.21)$$

Este requerimiento es muy importante para los ensayos con fondo suelto utilizando material de diferente peso específico que la del prototipo. Si se trata del análisis de resultados cualitativos y no cuantitativos se recomienda utilizar sin restricciones la condición de Yalin, tal como es el caso de este modelo.

¹⁷ CASTRO, D., Marco “Introducción a la Hidráulica de ríos”. 199 p

¹⁸ CASTRO, Marco. “Análisis Dimensional y Modelación física en Hidráulica”. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 50 p.

3.4 SIMILITUD DINÁMICA EXACTA.

Cuando en la similitud dinámica restringida se consideran los efectos de escala que deben ser relativamente bajos, entonces como resultado tenemos un criterio para la similitud dinámica exacta.

3.4.1 EFECTOS DE ESCALA

En modelos hidráulicos que son investigaciones en laboratorios se tiene por lo general: Errores accidentales, son debidas a la apreciación del observador y la posible desviación de los resultados. Errores sistemáticos, son debidas a la técnica empleada en la modelación, a efectos no considerados.

Sin embargo un modelo físico tiene sus limitaciones en la simulación del proceso de socavación. Por lo tanto la mayoría de las pruebas de modelo se utiliza material no cohesivo fracturado en el cuenco amortiguador con el fin de que sean transportados por el flujo formando la fosa de socavación.

En modelos hidráulicos utilizados en el estudio de la disipación de energía por medio de un salto en esquí no se puede reproducir fenómenos como aireación de los chorros de descarga, influencia del viento, es por ello que en el prototipo se tendrá longitudes de alcance más pequeñas que las alcanzadas en modelo, ya que en prototipo el chorro contiene mayor aire.

La introducción de aire en la zona de sumersión del chorro es otro de los fenómenos no considerados en el modelo, por lo que la situación más crítica es el prototipo.

El fenómeno de atomización es otro efecto no considerado en el modelo, pero que es bien importante considerarlo en el prototipo.

3.5 JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA LONGITUDINAL DEL MODELO EXISTENTE.

La selección de la escala del modelo hidráulico se basó en cumplir con varios aspectos importantes que influyen en la obtención de resultados, de manera que se cumpla con la ley de similitud adoptada, Entre los aspectos fundamentales analizados para la selección de la escala tenemos:

1. Área disponible en el laboratorio para la construcción del modelo.
2. Caudales disponibles para la alimentación del sistema del modelo.
3. La similitud que gobierna el fenómeno en estudio.
4. Materiales con lo que se va a construir el modelo, ya que la rugosidad del modelo debe ser más lisa que el prototipo.
5. Instrumentación de medida disponible.
6. Factor económico.

El depósito de material erosionable junto con la presa Toachi en modelo, para esta etapa de la investigación ya está construida, por tanto ha sido necesario mantener la coherencia en cuanto a la elección de la escala geométrica de los nuevos elementos a construir. Así, se ha mantenido una escala geométrica 1:50, no distorsionada en la construcción tanto de las modificaciones en los deflectores como en la modificación del estanque dissipador de energía. Así mismo, se ha considerado la semejanza de Froude como base para las transformaciones de las variables físicas que intervienen en el proceso.

En la tabla 3.4, se presenta el análisis que se realizó para la selección de la escala.

Tabla No 3.4 Selección de la escala del modelo.

DIMENSIONES	PROTOTIPO	MODELO		
		1:40	1:50	1:60
CAUDAL	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Desagües	3200	0.316	0,181	0.115
Vertederos	1182	0.117	0,067	0.042
CALADO	(m)	(m)	(m)	(m)
Desagües	43.00	1.075	0,860	0.717
Vertederos	7.50	0.188	0,150	0.125
LONGITUD	(m)	(m)	(m)	(m)
Altura Presa	59.00	1.480	1,180	0.980
Longitud Presa	170.50	4.260	3,410	2.840
Ancho del cuenco	68.00	1.700	1,360	1.133
Longitud del cuenco	105.00	2.625	2,100	1.750
MATERIAL	(m)	(m)	(m)	(m)
Roca cuenco	1.00	0.025	0,020	0.017

Fuente: Informe técnico fase I, Estudio en modelo hidráulico de la presa Toachi y sus obras complementarias, EPN, Noviembre 2011.

Se llegó a adoptar la escala 1:50 debido a la capacidad que se requiere para la alimentación del sistema en el modelo.

El modelo es hidráulicamente más liso que el prototipo con el fin de alcanzar en lo posible a ser dinámicamente semejante al prototipo y este corresponde el objetivo principal de la calibración del modelo.

Además con esta escala podemos garantizar un flujo turbulento completamente desarrollado en donde el número de Reynolds es mayor en prototipo que en modelo, pero se tiene que el coeficiente de fricción es igual tanto en modelo como en prototipo. El número de Reynolds en prototipo es 4.28×10^7 , lo que corresponde a 1.21×10^5 en el modelo hidráulico y este a su vez es mayor a 2×10^4 lo que garantiza la turbulencia completamente desarrollada.

Con el objeto de verificar que los efectos de viscosidad y la tensión superficial no afectan en la interpretación de resultados se tiene una relación que combina el número de Reynolds y el número de Weber para lo cual si se cumple la condición 3.20, los efectos antes mencionados son despreciados.

$$Re^{0.20} \times We^{0.60} > 900 \quad (3.22)$$

3.6 CONCLUSIONES.

- Las profundidades de agua en las estructuras hidráulicas como vertederos de excesos, desagües de fondo, cuenco amortiguador son superiores a los 3 cm por lo tanto los efectos de tensión superficial son despreciables y no afectan el análisis de los resultados obtenidos.
- Es importante tener un conocimiento claro de los criterios de la modelación hidráulica con el objetivo de representar adecuadamente el fenómeno de socavación en el cuenco amortiguador y así obtener buenos resultados.
- Se concluye que el número de Froude es similar en el modelo y en el prototipo en cambio el número de Reynolds en el modelo es menor que en el prototipo, a pesar de esta diferencia entre el número de Reynolds el coeficiente de fricción es el mismo porque el flujo se efectúa en la zona turbulenta completamente desarrollada.

- Se concluye que para evaluar la socavación al pie de un vertedero es aconsejable realizarlo utilizando un modelo físico porque en este se puede representar con relativa facilidad y precisión la mayoría de las variables presentes en el fenómeno y en este tipo de estudio generalmente se utiliza la similitud de Froude no distorsionado con lecho de fondo móvil.
- Se concluye que en un modelo físico se puede observar el flujo en el cuenco amortiguador en 3 dimensiones durante el proceso de socavación.
- Un modelo numérico difiere de los modelos físicos porque se prescinde de los esquemas físicos y se centra a la simulación de relaciones funcionales, estos a su vez representan los factores significativos que intervienen en el fenómeno.

CAPITULO 4

DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL MODELO FÍSICO EXISTENTE Y DE LAS VARIANTES

4.1 GENERALIDADES

El modelo físico no distorsionado de la presa Toachi se construyó en el laboratorio del CIERHI (Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídrico) de la Escuela Politécnica Nacional, cuyo laboratorio consta de: 4 bombas de impulsión, la cual cada una tiene una capacidad de 200 l/s y 13 m de carga, un canal de recirculación de agua, un tanque de carga, 4 líneas de abastecimiento con sus respectivas tomas a lo largo del perímetro del canal.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO EXISTENTE

El modelo físico de la presa Toachi fue construido en base a la información técnica entregada por CELEC EP HIDROTOAPI a la Escuela Politécnica Nacional, departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. En la primera fase de la investigación experimental se construyó:

- Zona de ingreso.
- Modelo de la Presa Toachi.
- Zona de salida y restitución.

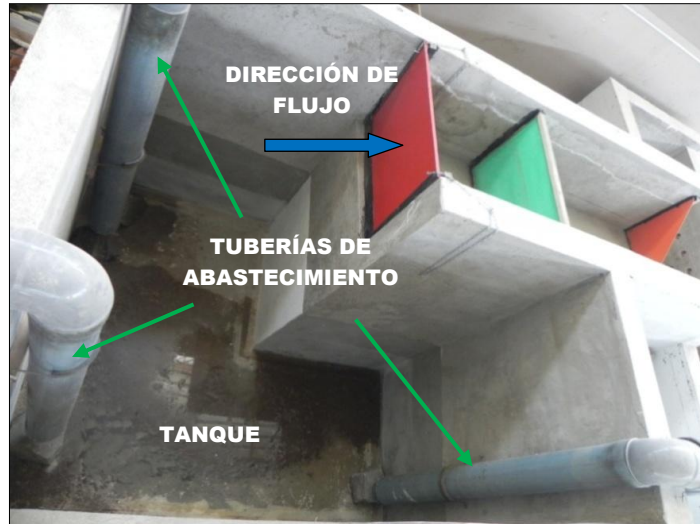
4.2.1 COMPONENTES DE LA ZONA DE INGRESO

La zona de ingreso permite: la entrada del rango de caudales de operación al modelo, la disipación de energía residual y la uniformización del flujo en el embalse de la presa, a continuación se describen las estructuras que lo conforman:

4.2.1.1 Sistema de tuberías.- Son aquellas tuberías que conducen el caudal de agua desde el canal de restitución que se encuentra en todo el perímetro del laboratorio, hacia el tanque de abastecimiento del modelo de la presa Toachi, son 3 tuberías de presión de PVC y cuyo diámetro es de 200mm

4.2.1.2 Tanque de abastecimiento.- Es aquel sitio donde se deposita el agua que llegan por las tuberías, para su posterior conducción por el canal y luego hasta el embalse.

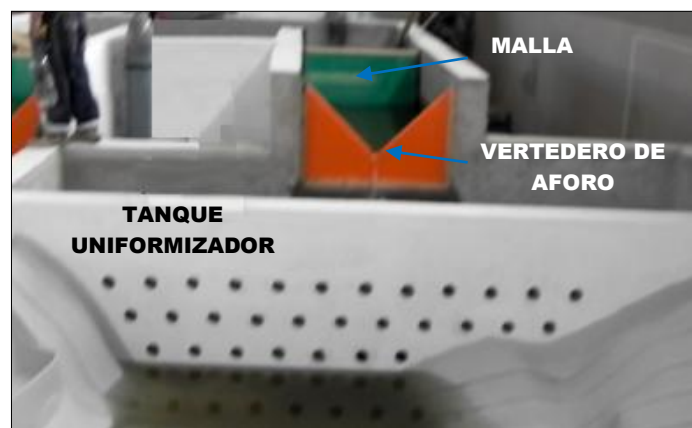
Fotografía No 4.1: Tanque y tuberías de abastecimiento.



4.2.1.3 Canal de ingreso al vertedero de aforo.- En la entrada del canal se tiene una malla que sirve para conseguir un flujo uniforme en la aproximación hacia el vertedero de aforo. El vertedero de aforo es de forma triangular con un ángulo central de 90° y este nos permite conocer el caudal que ingresa al modelo.

4.2.1.4 Tanque uniformizador.- Aguas abajo del vertedero de aforo se tiene un tanque y la salida del tanque es por medio de agujeros que presenta la pared ubicada a la entrada del embalse, además se cuenta con una malla que produce un flujo uniforme en la entrada al embalse de la presa, como se puede observar en la fotografía No 4.2.

Fotografía No 4.2: Vertedero de aforo y tanque uniformizador.



4.2.2 MODELO FÍSICO DE LA PRESA TOACHI

La escala del modelo físico es de 1:50, el área aproximada de la construcción es de 37 m². El tramo de aproximación que representa en el modelo la curvatura que presenta el cauce y márgenes del río Toachi tiene una longitud aproximada de 4.5 m que equivale a 225m en prototipo. Aguas abajo del modelo tenemos: el cuenco amortiguador de energía, la transición de entrega al cauce natural y un pequeño tramo del río, toda esta longitud es de 3.90 m.

Fotografía No 4.3: Modelo físico de la Presa Toachi.



La presa se compone de las siguientes obras complementarias:

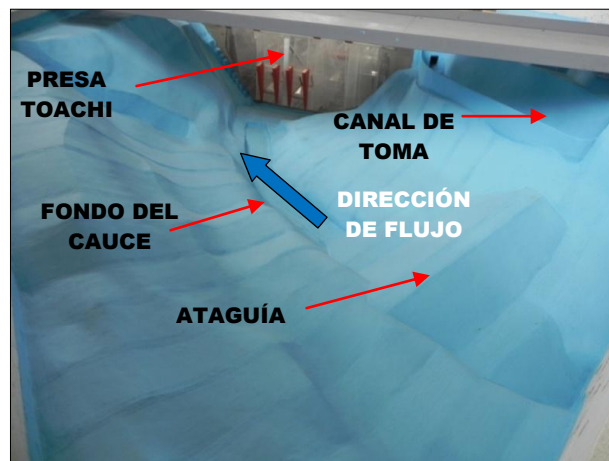
4.2.2.1 EMBALSE Y ATAGUÍA

El modelo del embalse tiene las mismas características topográficas que en prototipo, con el fin de simular el flujo de aproximación hacia la presa. Los taludes laterales y cauce del río fueron moldeados en un tanque de losa de hormigón y paredes de mampostería, la topografía fue moldeada con terrocemento, después impermeabilizada y luego pintada.

Tabla No 4.1: Datos mas relevantes del embalse y ataguía.

Embalse		
Descripción	Prototipo	Modelo físico
Volumen	$8 \times 10^6 \text{ m}^3$	64 m^3
Pendiente de fondo	2.5 %	2.5%
Ataguía		
Volumen	$5.75 \times 10^4 \text{ m}^3$	0.46 m^3
Longitud de la cresta	85.5 m	1.71 m
Ancho de la cresta	6.0 m	0.12 m

Fotografía No 4.4: Modelo del embalse y ataguía



4.2.2.2 CANAL DE TOMA Y OBRA DE TOMA

El canal de toma se desarrolla en la margen derecha del embalse, el agua fluye sobre el muro vertedero. Al final del canal ya en la presa se ubica la toma que permite ingresar hacia la interconexión. Se usó mortero de cemento con terminado liso para la elaboración del canal, la salida de la bocatoma descarga a través de una tubería de PVC, de 110mm y está regulada por una válvula de compuerta.

Tabla No 4.2: Dimensiones en modelo y prototipo de la obra de toma.

Obra de toma		
Descripción	Prototipo (m)	Modelo físico (m)
Longitud de canal	100	2
Ancho del canal	10	0.2

Pendiente longitudinal	4.5%	4.5 %
Bocatoma	5.75x7.8	0.115x0.156

Fotografía No 4.5: Modelo físico del canal y bocatoma



4.2.2.3 VERTEDERO ESCALONADO SARAPULLO.

El vertedero Sarapullo para esta etapa de investigación se modificó en su totalidad, presenta una rápida gradeada y escalones variables hasta su descarga dentro del cuenco amortiguador, el material con el que fue construido es acrílico transparente de 6mm de espesor, en la tabla N° 4.3 se indica los datos más relevantes del vertedero.

Tabla No 4.3: Dimensiones en prototipo y modelo del vertedero Sarapullo.

Vertedero Sarapullo		
Descripción	Prototipo	Modelo físico
Ancho del vertedero	6.5 m	0.13 m
Número de gradas en la rápida	48.0	48.0
Huella	0.52 m	0.0104 m
Contrahuella	0.75 m	0.015 m
Número de gradas variables	6.0	6.0

Fotografía No 4.6: Modelo del vertedero Sarapullo.



4.2.2.4 VERTEDERO DE EXCESOS.

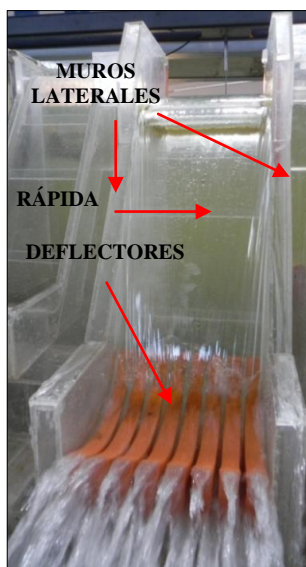
Los vertederos en el modelo son de acrílico transparente de 6mm de espesor, las pila fueron elaborados en madera con acabado liso, sobre el esquí se plantean alternativas de deflectores construidos en madera y acrílico. En la tabla No 4.4 se describe los datos más relevantes de los vertederos de excesos.

Tabla No 4.4: Dimensiones en prototipo y modelo de los vertederos.

Vertedero de Excesos		
Descripción	Prototipo (m)	Modelo físico (m)
Ancho del bloque	18	0.36
Ancho del vertedero	14	0.28
Radio de clapetas	17	0.34
Ángulo de salida del esquí	12°	12°
Radio del esquí	14	0.28

El caudal de descarga para los vertederos cuando el nivel del embalse está en la cota máxima de 970.00 msnm (nivel máximo de operación) es de 67 l/s que equivale a 1200 m³/s en prototipo, este corresponde a una crecida con período de retorno de 10.000 años.

Fotografía No 4.7: Estructura en acrílico de los vertederos de excesos.



4.2.2.5 DESAGÜES DE FONDO

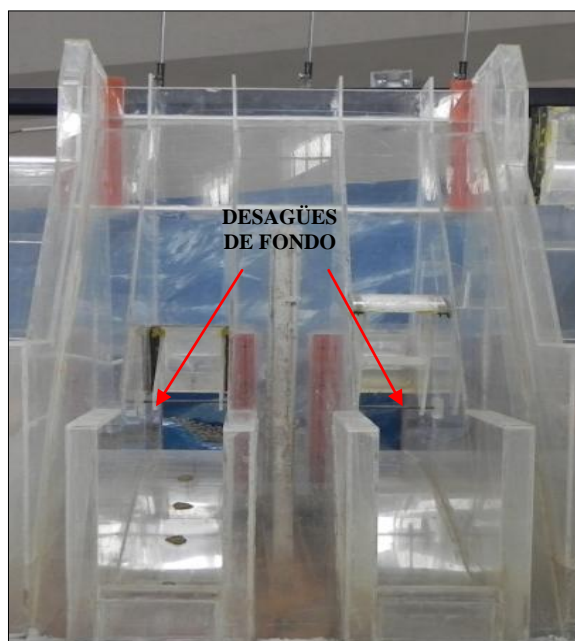
Los dos desagües de fondo fueron construidos en acrílico transparente de 6 mm de espesor. Las pilas en la sección de entrada a los desagües de fondo fueron elaboradas en madera, con un terminado liso. En la siguiente tabla se indica las dimensiones en modelo y prototipo del desagüe de fondo.

Tabla No 4.5: Dimensiones en prototipo y modelo de los desagües de fondo.

Desagües de Fondo		
Descripción	Prototipo (m)	Modelo físico (m)
Ancho del bloque	18.0	0.36
Sección de entrada	8x8	0.16x0.16
Radio del esquí	15.0	0.30
Ángulo de salida del esquí	29°	29°
Radio de la compuerta radial	11.5	0.23

Los desagües de fondo descargan un caudal de 3200 m³/s que equivale a 181 l/s en el modelo cuando se tiene el nivel máximo de operación de 1.73 m (970msnm).

Fotografía No 4.8: Estructura en acrílico de los desagües de fondo.



4.2.2.6 CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA

En modelo esta estructura se la construyó con una losa de fondo de hormigón y paredes de mampostería, pintadas e impermeabilizadas. En base a los resultados experimentales obtenidos en la primera fase de la investigación se recomendó incrementar el ancho y longitud del cuenco de disipador de energía, en este modelo se realizó las pruebas del escenario No 1. Las dimensiones del cuenco de disipación de energía modificada se presentan en la siguiente tabla:

Tabla No 4.6: Dimensiones en prototipo y modelo del cuenco amortiguador.

Cuenco disipador de energía modificado		
Descripción	Prototipo (m)	Modelo físico (m)
Longitud del cuenco disipador	105	2.10
Ancho del cuenco disipador	83.5	1.67
Nivel del cuenco disipador	918.5 msnm	0.70
Material aluvial	1.0	0.02

4.2.2.6.1 TRANSICIÓN HACIA EL RÍO

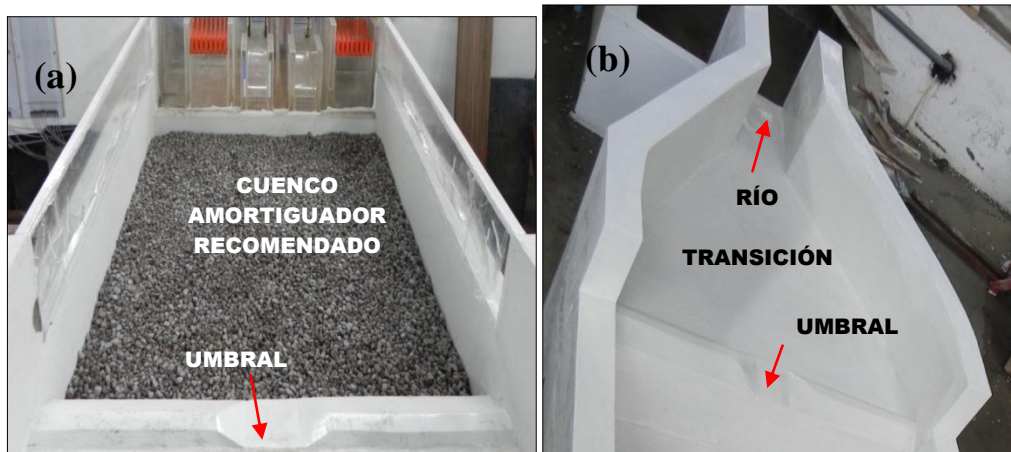
En el modelo la transición entre el cuenco amortiguador y la restitución al río es de hormigón, en la entrada de la transición se tiene una escollera (umbral) de 7cm de altura, la

transición tiene una pendiente del 2%, en el siguiente cuadro se indica las dimensiones de la transición.

Tabla No. 4.7: Dimensiones en prototipo y modelo de la transición.

Transición hacia el río.		
Descripción	Prototipo (m)	Modelo físico (m)
Longitud de transición	85	1.70
Ancho aguas arriba	83.5	1.67
Ancho aguas abajo	17.25	0.345
Altura de escollera	1.0	0.02

Fotografía No 4.9: (a) Modelo físico del cuenco amortiguador recomendado. (b) Modelo físico de la transición.



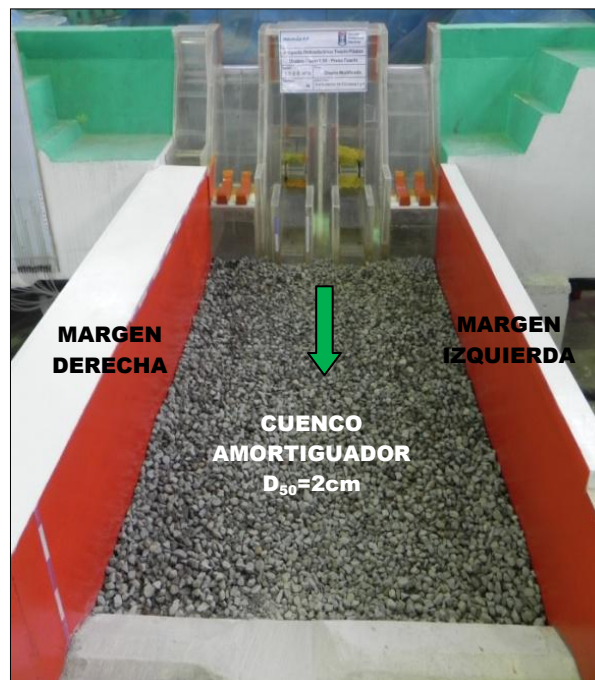
4.2.2.7 CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA (DISEÑO ORIGINAL)

El cuenco amortiguador para la tercera fase de investigación tiene las dimensiones del diseño original en la cual tenemos un ancho de 1.36 m (68 m), y mantenemos la longitud de 2.10 m (105 m) que se modificó en la segunda fase, las paredes del cuenco son de madera (triplex 18mm), para garantizar su impermeabilidad se lo selló con silicón. El cuenco contiene grava $D_{50}=2\text{cm}$ hasta la cota 0.70 (cota referenciada al laboratorio), en prototipo es la cota 918.50 msnm. Podemos observar la fotografía No 4.10, el cuenco amortiguador con ancho del diseño original y en la cual se realizará las pruebas del escenario No 2, que se indicará posteriormente.

4.2.2.7.1 TRANSICIÓN HACIA EL RÍO

Aguas abajo del cuenco amortiguador se encuentra un umbral que en modelo tiene una altura de 7cm y posteriormente una transición hacia el río, el ángulo de transición en la margen derecha es de 13° y en la margen izquierda es de 26°, por lo que se tiene una forma asimétrica, estas márgenes o paredes falsas también fueron construidas de madera (triplex 18mm).

Fotografía No. 4.10: Modelo del cuenco amortiguador y la transición.



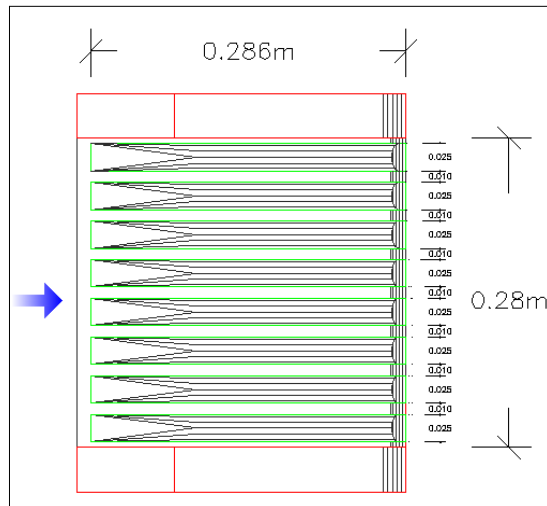
4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE DEFLECTORES CONSTRUIDOS SOBRE EL ESQUÍ DEL VERTEDERO.

En esta tercera fase del estudio experimental y como parte del trabajo de graduación se construyó cinco tipos de deflectores con el fin de dirigir el chorro del salto en esquí hacia el centro del cuenco amortiguador, a continuación se describe cada una de las estructuras construidas y se describe la trayectoria de vuelo del chorro desde su despegue hasta su impacto en el colchón de agua del cuenco amortiguador.

4.3.1 DELECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL: DEFLECTOR RANURADO.

Los ocho deflectores fueron moldeados en MDF (Medium Density Fiberboard), éstos a su vez son lacados para obtener una superficie lisa. Los pequeños deflectores están distribuidos simétricamente sobre el esquí de ancho igual a 28 cm, cada deflector tiene un ancho de 2.5 cm, separadas a una distancia de 1cm, como se indica en la figura N° 4.1. El radio de curvatura de los deflectores es de 20 cm y el ángulo de salida de los deflectores es de 37°.

Figura No 4.1: Vista superior del deflector ranurado.



Fotografía No 4.11: Chorro producido por el deflector dentado.



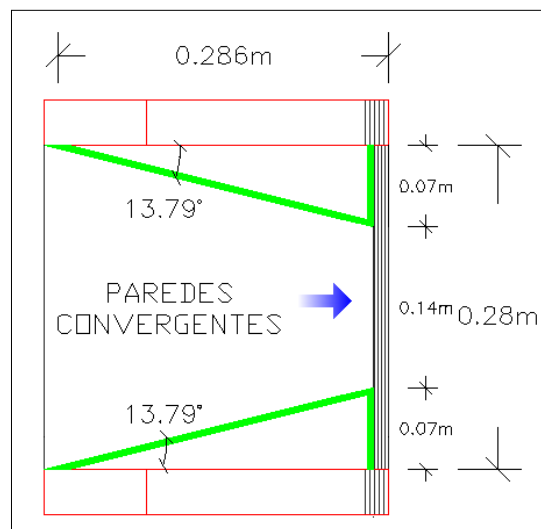
Por efecto del deflector ranurado se producen múltiples chorros, hay inmersión de aire durante la trayectoria del chorro por los espacios existentes, Conociendo los niveles de agua tanto aguas arriba del embalse como aguas abajo del cuenco amortiguador resulta que la disipación de energía que se produce es del 85 %¹⁹.

4.3.2 ALTERNATIVA “A”: ESQUÍ CON PAREDES CONVERGENTES.

Las paredes se encuentran ubicadas sobre el esquí, con un ángulo de 13.79° formado desde la margen derecha e izquierda del salto en esquí del vertedero de excesos derecho, el ancho de salida en el esquí se reduce a 0.14 m y el ángulo de salida del chorro es de 12°, en la figura N° 4.2 se indica las características geométricas de la alternativa “A”.

Debido a las paredes convergentes se observa una elevación del calado a la salida del esquí y el flujo de agua en su trayectoria tiene una forma plana que sale en dirección del eje del esquí hacia el cuenco disipador de energía. El chorro es compacto y se puede considerar entonces que no existe la suficiente aireación del chorro por efecto de las paredes convergentes, como se ve en la fotografía No 4.12

Figura No 4.2: Vista superior de las paredes convergentes.



¹⁹ VELASCO, C., VERA, P. “Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón”. Tesis de grado. Quito. Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 2012. 172 p.

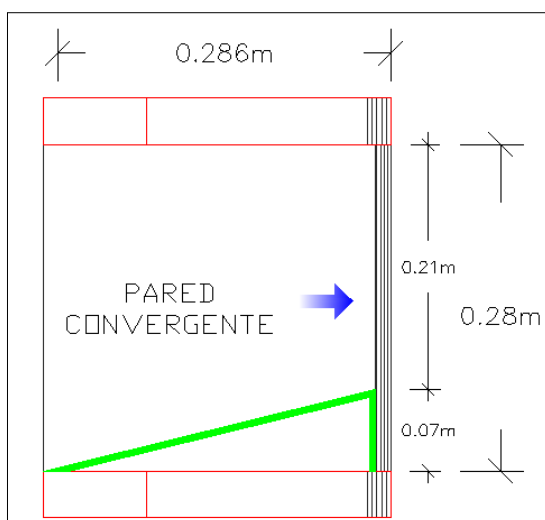
Fotografía No 4.12: Chorro generado por las paredes convergentes.



4.3.3 ALTERNATIVA “A – 1”: PARED CONVERGENTE EN LA MARGEN DERECHA DEL ESQUÍ.

Con el objetivo de que el chorro de descarga se impacte en el centro del cuenco amortiguador, en esta alternativa se retira la pared de la parte izquierda del esquí. Se observa que el flujo tiende una ligera tendencia a desviarse hacia el lado izquierdo, como se puede apreciar en la fotografía No 4.13. El ángulo de despegue es de 12° y corresponde al del esquí que tiene un radio de curvatura de 0.28 m en modelo. El chorro tiene una forma asimétrica. El ancho a la salida del salto es de 0.21 m como se puede observar en la figura No 4.3.

Figura No 4.3: Vista superior de la pared derecha.



Al no disponer de una estructura que permita una posible desintegración del chorro en su despegue, éste impacta con gran energía en el material suelto que contiene el cuenco amortiguador, lo cual produce una gran socavación y arrastre de material.

Fotografía No 4.13: Chorro producido por la pared derecha en el esquí.



4.3.4 ALTERNATIVA “B”: DEFLECTORES DE ALTURA VARIABLE.

En esta alternativa se colocó 3 deflectores sobre el esquí, siendo uno de ellos igual al diseño original y los 2 restantes son 1.5 y 0.5 veces la altura del original. En la tabla 4.8 se presentan los datos de la estructura, tanto en modelo como en prototipo, para la escala 1:50.

Figura No 4.4: Vista lateral de los deflectores de altura variable.

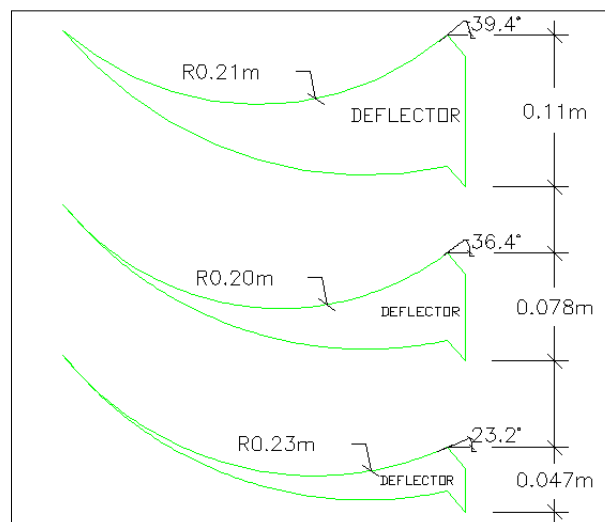


Tabla No 4.8 Dimensiones de los deflectores de altura variable.

ESTRUCTURA	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
DEFLECTOR DERECHO			
Ángulo de salida	°	39.4	39.4
Radio	m	10.6	0.212
Altura(desde esquí)	m	4.77	0.0954
Ancho	m	4.67	0.0933
DEFLECTOR CENTRAL			
Ángulo de salida	°	36.4	36.4
Radio	m	10	0.20
Altura(desde esquí)	m	3.18	0.0636
Ancho	m	4.67	0.0933
DEFLECTOR IZQUIERDO			
Ángulo de salida	°	24.7	23.2
Radio	m	11.7	0.234
Altura(desde esquí)	m	1.59	0.0318
Ancho	m	4.67	0.0933

El chorro de descarga tiene una forma alargada y los chorros de mayor altura tienden a desviarse hacia el chorro de menor altura. Se puede observar que el chorro no es compacto, debido a la altura variable de los deflectores y al diferente ángulo de despegue de los mismos. La disipación de energía en esta alternativa es del 89%

Fotografía No 4.14: Chorro generado por el deflector de altura variable.



4.3.5 ALTERNATIVA “C”: DEFLECTOR PERALTADO.

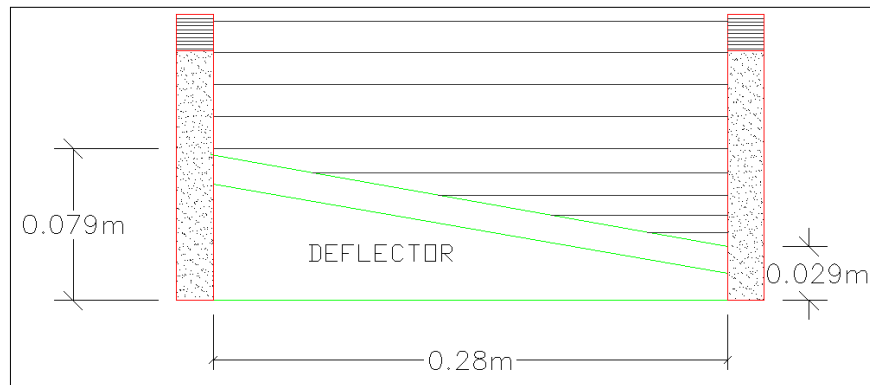
Se construyó el deflector en madera con un terminado liso para obtener una buena circulación del flujo, a continuación en la tabla 4.9 se presentan los datos de la estructura, tanto en modelo como en prototipo.

Tabla No 4.9: Dimensiones del deflector peraltado.

ESTRUCTURA	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
SALTO EN ESQUÍ DE RÁPIDA			
Angulo de salida	°	12	12
Cota de la cresta	msnm	933.74	1.00 m
DEFLECTOR PERALTADO			
Angulo de salida	°	37	37
Radio	m	10	0.20
Cota en la cresta inferior	m	935.19	1.029
Cota en la cresta superior	msnm	937.69	1.079

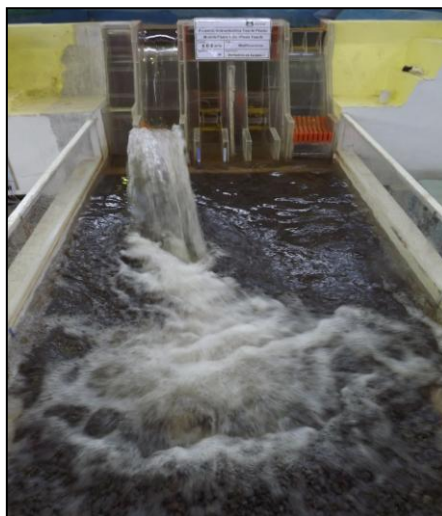
La pendiente transversal a la salida del deflector es de 17.86%, esto produce que el chorro tenga en su vuelo un desnivel.

Figura No 4.5: Vista frontal del deflector peraltado.



El flujo de descarga en la margen izquierda del esquí tiene un mayor alcance por el hecho que se encuentra 5 cm más abajo y en consecuencia la velocidad de despegue en esta parte es mayor y por ende el alcance es mayor, que en la margen derecha del esquí como se puede observar en la fotografía No 4.15. El impacto del chorro y la socavación se producen cerca de la parte central del cuenco.

Fotografía No 4.15: Chorro generado por el deflector peraltado.



4.3.6 ALTERNATIVA “D”: DEFLECTOR DISCONTINUO Y CONTRACCIÓN EN LA MARGEN DERECHA DEL ESQUÍ.

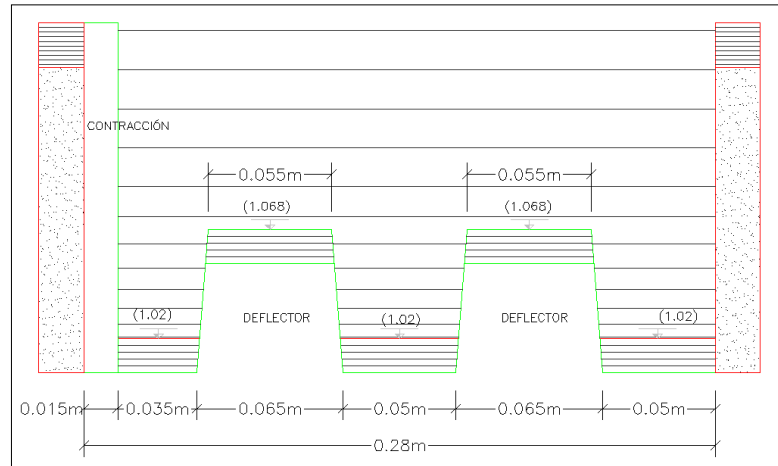
Esta modificación fue entregada por CELEC EP HIDROTOAPI a la Escuela Politécnica Nacional, para continuar con la tercera fase de investigación en los vertederos de excesos de la Presa Toachi. En la siguiente tabla se indican las dimensiones de la geometría del deflector y la modificación del ángulo de salida del salto en esquí de 12° a 20°.

Tabla No 4.10: Dimensiones en modelo y prototipo del deflector discontinuo y contracción lateral.

ESTRUCTURA	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
SALTO EN ESQUÍ DE RÁPIDA			
Angulo de salida	°	20	20
Cota de la cresta	msnm	934.50	1.020m
Radio	m	12	0.24
DEFLECTORES			
Angulo de salida	°	37	37
Radio	m	10	0.20
Cota en la cresta	m	936.92	1.068m
PARED (CONTRACCIÓN)			
Longitud	m	14.50	0.29
Altura	m	7.02	0.14

Los 2 deflectores tienen una forma trapezoidal desde una vista frontal, cuando el flujo despega se puede observar claramente la forma de los chorros que salen por los deflectores y los que despegan por el salto en esquí.

Figura No 4.6: Vista frontal del deflector discontinuo y contracción lateral



La contracción en la margen derecha produce una despreciable desviación del chorro en su trayectoria hacia la parte central del cuenco amortiguador como se ve en la fotografía No 4.16. Se observa que el ancho del chorro que salen de los deflectores se incrementa conforme se elevan en el aire.

Fotografía No 4.16: Chorro generado por el deflector discontinuo y contracción.



4.4 INSTRUMENTACIÓN PARA LAS PRUEBAS.

La instrumentación en un modelo físico es de suma importancia debido que a través de ella se realizan las diferentes medidas experimentales. Los instrumentos utilizados en la investigación son:

- Vertedero triangular de 90°, pared delgada.
- Limnímetros.
- Cintas métricas.
- Estación total, nivel

4.4.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE 90°, PARED DELGADA.

El vertedero triangular es utilizado para medir los caudales de ingreso a la presa, en el modelo se han instalado un vertedero, construido en madera de forma triangular que se ubica a la entrada del tanque uniformizador, el ancho del veredero es de 1.0 m, la altura desde el fondo del canal hasta el vértice del vertedero es de 0.20 m, la altura del vertedero es de 0.66 m

Fotografía No 4.17: Aforo del caudal por el vertedero.

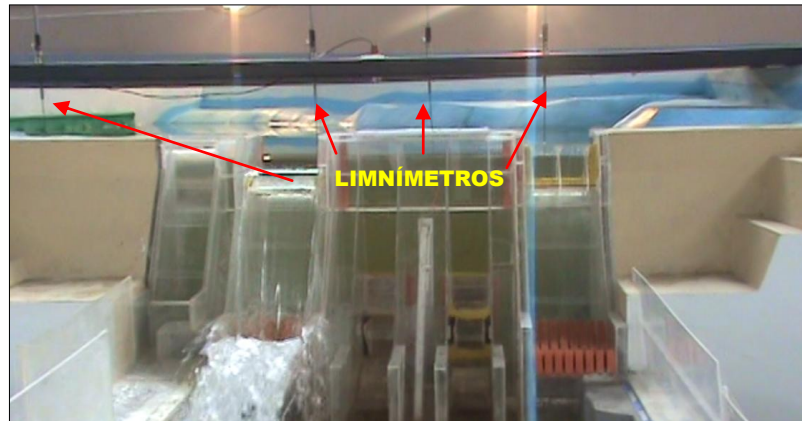


4.4.2 LIMNÍMETROS, CINTA MÉTRICA.

El limnómetro tiene una apreciación de 0.1 mm en escala vernier, se utiliza para medir los calados o niveles de agua en el embalse, es así que se ubicaron 4 limnímetros aguas arriba de la presa. Además se usa el limnómetro en el proceso de levantamiento del foso socavado, al medir el calado en el cuenco amortiguador.

Las cintas métricas permiten medir longitudes con precisión de 1 mm. Las aplicaciones de estas cintas es la medición experimental del alcance de los chorros de la descarga y para el calado en el cuenco amortiguador.

Fotografía No 4.18: Limnímetros en el modelo de la presa.

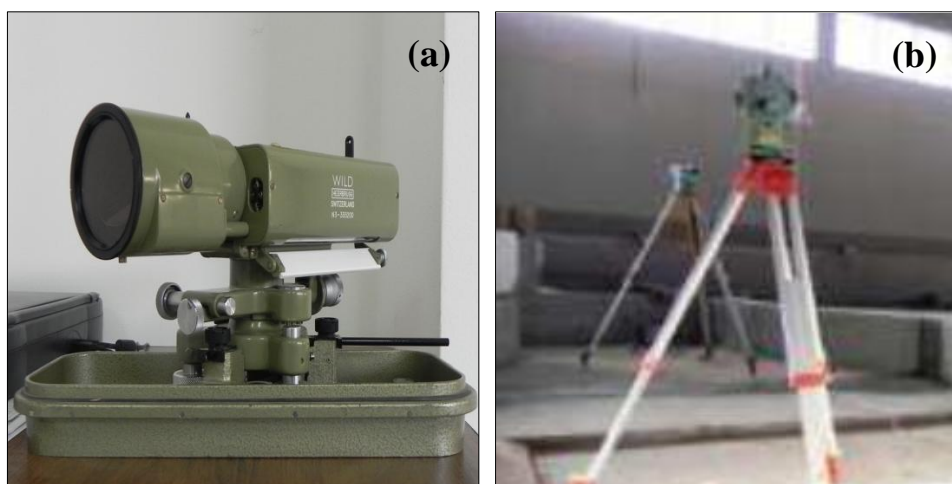


4.4.3 NIVEL Y ESTACIÓN TOTAL.

El nivel se utilizó en la implantación de los diferentes tipos de deflectores y con ello garantizar que las cotas tanto en modelo como en prototipo sean similares, manteniendo errores de hasta 1mm.

La estación total de marca Leica se utilizó para realizar los levantamientos de la configuración del foso de socavación producidos con las variantes realizadas en la en los deflectores ubicados en los saltos en esquí.

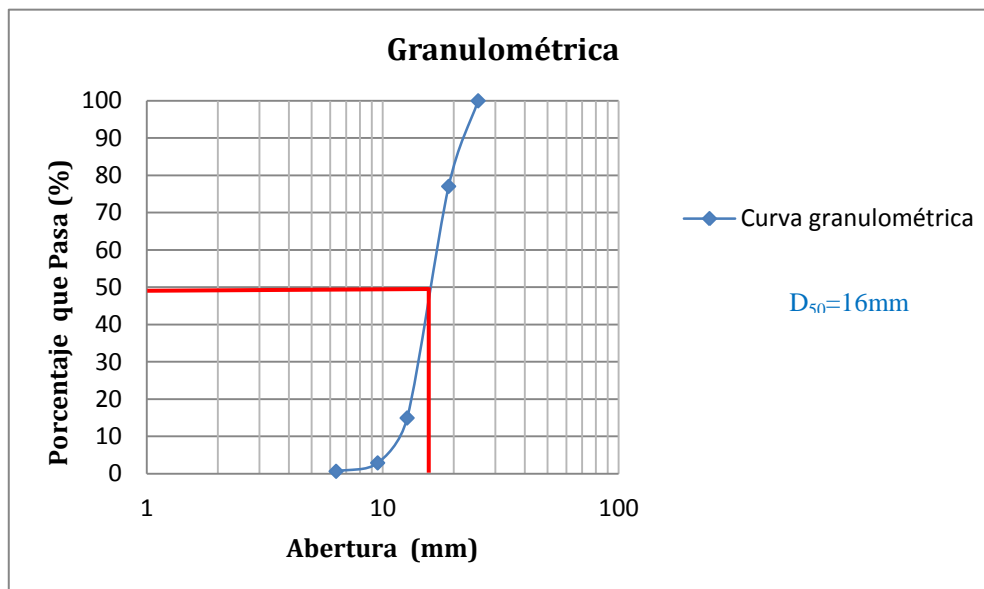
Fotografía No 4.19: a) Nivel marca wild Heerbrugg Switzerland b) Estación total marca Leyca 7500.



4.5 PLAN DE PRUEBAS. ESCENARIO N°1.

En el escenario N° 1 se opera únicamente el vertedero de excesos derecho de la Presa Toachi, consiste en abrir la clapeta en el nivel máximo de operación 970 msnm, analizar y evaluar las erosión producida en el cuenco de disipación de energía que contiene material suelto, para las distintas modificaciones realizadas en los deflectores ubicados en el esquí. El cuenco amortiguador preexcavado para estas pruebas tiene las dimensiones recomendadas en la segunda fase de investigación como se indicó en el numeral 4.2.2.6. Para la representación del material aluvial en la estructura de disipación de energía se utiliza grava hasta el nivel 0.70 cota en modelo. La granulometría del material suelto (grava) da como resultados que $D_{90}= 21\text{mm}$ y el diámetro medio es de $D_{50}= 16\text{mm}$ como se observa en la curva granulométrica de la gráfica No 4.1.

Gráfico No 4.1: Granulometría del material en las pruebas del escenario N°1



Las pruebas experimentales del escenario N° 1 se realizó con: $Q=400\text{m}^3/\text{s}$, que comprende un tiempo de retorno de 100 a 500 años y $Q=600\text{ m}^3/\text{s}$ cuyo tiempo de retorno es de 10000 años. Los caudales mencionados fueron seleccionados en función de los caudales de crecida, en el sitio de la presa Toachi, obtenidos del informe de revisión de la hidrología del Proyecto²⁰. La nomenclatura de las pruebas consta de una letra y un subíndice. La letra indica la modificación realizada en los deflectores, utilizándolo para ello las alternativas O,

²⁰ CELEC EP HIDROTOAPI, Informe 6256.0-R-18 Presa Toachi – Hidráulica – Memoria de cálculo. 2010. 28 p.

A, A-1, B, C, D y el subíndice identifica el caudal de ensayo. En la siguiente tabla se indica el plan de pruebas realizadas en el escenario N° 1:

Tabla No 4.11: Plan de pruebas del Escenario N° 1

Descripción	Prueba	Q _m	Q _p	Objetivos
		l/s	m ³ /s	
Deflector ranurado	O _{Q400}	22.627	400.0	- Se registra los calados sobre el vertedero y en el cuenco de disipación de energía. - Características del chorro descargado.
Paredes convergentes	A _{Q400}			
Deflector gradeado	B _{Q400}			
Deflector Peraltado	C _{Q400}			
Deflectores y contracción	D _{Q400}			
Deflector ranurado	O _{Q600}	33.941	600.0	- Se identifica el desarrollo, profundidad y configuración del foso socavado y se procede a su levantamiento con estación total.
Paredes convergentes	A _{Q600}			
Pared margen derecha	A-1 _{Q600}			
Deflector gradeado	B _{Q600}			
Deflector Peraltado	C _{Q600}			
Deflectores y contracción	D _{Q600}			

4.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL ESCENARIO N°1

En la tabla que se indica a continuación se tiene el porcentaje de diferencia de caudales ensayados en las pruebas con respecto al caudal propuesto y resulta que la desviación máxima al caudal propuesto es del 1.1%, rango que es admisible para comparar los resultados entre sí.

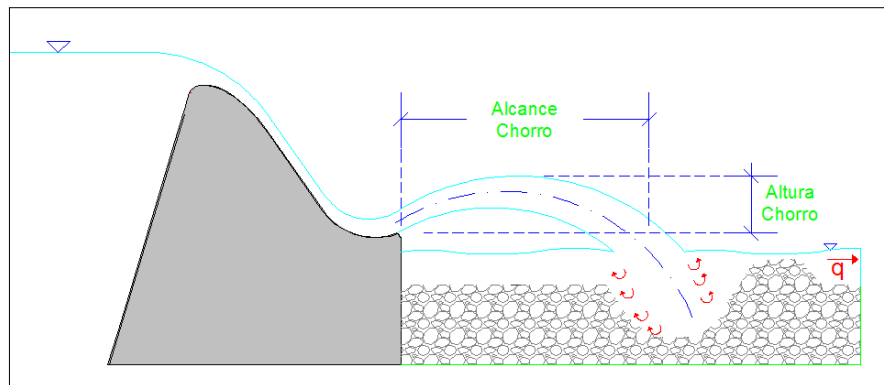
Tabla No 4.12: Tabla de comparación de caudal ensayado vs caudal propuesto

RESULTADOS DEL ESCENARIO N° 1				
Prueba	Q _m	Q _p	Q _{p(Propuesto)}	Diferencia Porcentual
	l/s	m ³ /s	m ³ /s	%
O _{Q400}	22.51	398.00	400	0.5
A _{Q400}	22.46	397.00	400	0.8
B _{Q400}	22.80	403.00	400	0.7
C _{Q400}	22.78	402.80	400	0.7
D _{Q400}	22.52	398.1	400	1.1
O _{Q600}	33.65	594.80	600	0.9
A _{Q600}	34.25	605.40	600	0.9
A-1 _{Q600}	34.29	606.10	600	1.0
B _{Q600}	34.28	606.00	600	1.0

C_{Q600}	33.98	600.80	600	0.1
D_{Q600}	33.87	598.80	600	0.2

Con el objeto de comparar los resultados experimentales con los obtenidos teóricamente, se tiene mediciones de profundidades de agua sobre las estructuras para las variantes propuestas. En la tabla No 4.13 y tabla No 4.14 se indican los valores experimentales de la altura y alcance del chorro de descarga en prototipo, además en la figura No 4.7 se observa un esquema de la salida del chorro desde el salto en esquí al cuenco.

Figura No 4.7: Esquema de la trayectoria del chorro de descarga.



En la tabla No 4.13 se observa que el máximo alcance del chorro se tiene con las geometrías propuestas en las alternativas “B” y “C”. La mayor altura del chorro corresponde a la geometría de la alternativa “A”, lo que se justifica por la contracción del flujo a la salida del esquí.

Tabla No 4.13: Tabla con datos experimentales del chorro $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO (Prototipo)						
PRUEBAS MEDICIONES	m^3/s	O_{Q400}	A_{Q400}	B_{Q400}	C_{Q400}	D_{Q400}
				398.04	397.00	403.30
Calado sobre vertedero	m	5.40	5.50	5.40	5.50	5.40
Calado en el cuenco amortiguador	m	7.35	8.00	5.35	7.00	6.00
Trayectoria del Chorro						
Altura máxima Chorro	m	10.0	13.41	8.17	9.30	11.0
Alcance máximo Chorro	m	66.00	66.50	69.00	69.00	67.00

En la tabla No 4.14, el máximo valor del alcance del chorro corresponde a las alternativas “B,” “C” y “D” además la altura máxima del chorro a las alternativas “A” y “B”

Tabla No 4.14: Tabla con datos experimentales del chorro $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO							
PRUEBAS MEDICIONES	m³/s	O_{Q600}	A_{Q600}	A-1_{Q600}	B_{Q600}	C_{Q600}	D_{Q600}
		594.78	605.45	606.10	606.12	600.77	598.77
Calado sobre el vertedero	m	6.70	6.70	6.70	6.70	7.00	7.00
Calado en el cuenco amortiguador	m	8.00	9.00	9.00	7.40	8.00	8.00
Chorro de descarga							
Altura máxima del chorro	m	10.66	14.76	4.76	9.27	11.55	11.50
Alcance máximo del chorro	m	67.75	69.00	59.00	70.50	70.50	71.25

Los valores de la altura del chorro es la medida desde el punto más elevado del chorro hasta el punto más bajo que presente la estructura para cada alternativa en la salida.

En base a los levantamientos realizados con la estación total del foso socavado producido por el chorro, se procedió a graficar los mismos en el civilcad obteniendo curvas de nivel que dan la forma del foso, de estas se obtuvo el perfil longitudinal y transversal del foso socavado, por medio de los gráficos mencionados se determinó la longitud del foso, el ancho del foso, distancia desde el pie de la presa hasta el punto más profundo del foso, distancia a las márgenes del cuenco amortiguador al punto más profundo del foso.

Tabla No 4.15: Resultados experimentales de la geometría y ubicación del foso socavado, $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$

RESULTADOS DE CUENCOS SOCAVADOS						
PRUEBAS MEDICIONES	m³/s	O_{Q400}	A_{Q400}	B_{Q400}	C_{Q400}	D_{Q400}
		398	397	403.3	402.8	398.1
Nivel máximo de socavación	msnm	906.80	908.00	908.00	907.69	906.72
Nivel máximo de acumulación	msnm	923.90	925.95	924.50	925.75	924.85
Profundidad del foso de Socavación (t_o=t+h₂)	m	19.05	18.5	15.85	17.81	17.78
Longitud del foso	m	50.50	65.00	48.50	60.50	59.50
Ancho del foso	m	34.00	38.00	43.50	39.0	33.50
Distancia: Desde la presa hasta el foso	m	67.00	71.50	70.00	75.00	71.00
Distancia: Desde la presa hasta el arraste máximo.	m	143.50	152.00	126.50	119.00	140.00
Distancia: Desde la margen derecha hasta el foso	m	22.50	20.50	32.50	37.00	20.50
Distancia: Desde la margen izquierda hasta el foso	m	61.00	63.00	51.00	46.50	63.00

Tabla No 4.16: Resultados experimentales de la geometría y ubicación del foso socavado,

$$Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$$

RESULTADOS DE CUENCOS SOCAVADOS							
PRUEBAS MEDICIONES	m ³ /s	O_{Q600}	A_{Q600}	A-1_{Q600}	B_{Q600}	C_{Q600}	D_{Q600}
		594.8	605.4	606.1	606	600.8	598.8
Nivel máximo de socavación	msnm	908.30	905.25	903.25	907.08	906.37	905.95
Nivel máximo de acumulación	msnm	926.70	928.25	928.45	926.75	926.80	925.73
Profundidad del foso de Socavación (t₀=t+h₂)	m	18.20	22.25	24.25	19.12	20.13	20.55
Longitud del foso	m	67.50	74.00	68.50	53.50	70.00	61.50
Ancho del foso	m	44.50	38.00	58.00	50.00	51.00	37.50
Distancia: Desde la presa hasta el foso	m	77.50	77.00	73.50	79.00	86.00	75.00
Distancia: Desde la presa hasta el arraste máximo.	m	145.00	146.50	146.50	142.50	140.00	153.00
Distancia: Desde la margen derecha hasta el foso	m	19.00	21.50	31.00	38.50	38.00	21.00
Distancia: Desde la margen izquierda hasta el foso	m	64.50	62.00	52.50	45.50	45.50	62.50

4.7 CONCLUSIONES.

- En esta tercera fase de investigación el modelo físico de la presa Toachi se encuentra construida, para cumplir con el objetivo del estudio se efectuaron modificaciones en los deflectores del salto en esquí y en las paredes del cuenco amortiguador a escala de modelo 1:50.
- El modelo físico tiene la rugosidad establecida por la condición de similitud requerida al diseño del prototipo ya que las estructuras hidráulicas fueron construidas en acrílico y madera. Los deflectores de las alternativas “A” y “A-1” fueron construidas en acrílico mientras que la alternativa “B”, “C”, “D” fue construido en madera.
- Las pruebas realizadas en el modelo físico permite concluir que de los cinco tipos de deflectores, sólo con las alternativas “A-1,” “B” y “C” (Contracción derecha en el esquí, deflector de altura variable y deflector peraltado) se consiguió una ligera tendencia en la desviación del chorro al centro del cuenco amortiguador.

- Los caudales con los que se realizaron las pruebas en el modelo se ajustaron a la similitud considerada para este estudio, sin embargo existe una desviación del 1.1% aproximadamente del caudal propuesto en el plan del pruebas.

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE LA SOCAVACIÓN EN EL CUENCO AMORTIGUADOR AL PIE DE LA PRESA TOACHI

La erosión aguas abajo de grandes presas se produce porque todas las descargas de la presa están libres de sedimento y por tanto las partículas transportadas aguas abajo no son reemplazadas por otras que vienen de aguas arriba. La socavación ocurre en el tramo inmediato aguas abajo de la descarga, cuya longitud aumenta en el tiempo.

La evolución temporal de la profundidad del foso de erosión presenta tres fases diferenciadas con diferentes comportamientos. A estas fases se denomina: fase activa, fase de inestabilidad y fase de equilibrio. La fase activa abarca los primeros minutos del ensayo y en ella la profundidad del foso aumenta muy rápidamente. En la fase pasiva, la profundidad del foso aumenta más lentamente hasta alcanzar la profundidad máxima o de equilibrio. En la fase de equilibrio, la profundidad oscila alrededor de la profundidad de equilibrio o máxima.

Durante el instante en que las partículas se mueven, la fuerza más importante que actúa sobre la partícula es la fuerza de la gravedad, pudiendo desplazar una partícula fuera del foso solamente venciendo el peso de la partícula. Al socavar, el espesor del colchón de agua aumenta, produciendo la disipación de energía del chorro y la disminución de la potencia del chorro por la caída a medida que penetra en el colchón de agua.

El chorro todavía tendrá una cierta potencia actuando sobre las paredes del foso que será la responsable de arrastrar algunas de las partículas hasta fuera del foso cuando éstas se encuentren inestabilizadas debido al movimiento. Llegará un momento en que ya no pueda sacar más partículas del fondo porque ya no dispone de la fuerza necesaria para vencer el peso de las partículas.

Como las partículas del fondo ya no se mueven, el talud del foso será estable. Es en este momento cuando entramos en la tercera fase, la fase de equilibrio.

5.1 SOCAVACIÓN EN EL CUENCO DE FONDO MOVIL DISPUESTO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR EFECTO DE LA DESCARGA DEL VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO DE LA PRESA TOACHI. ESCENARIO N° 1.

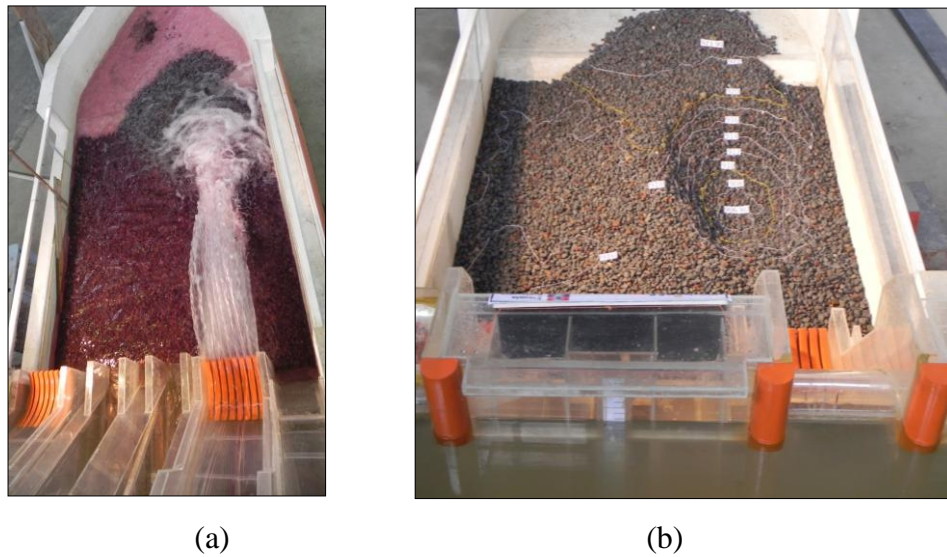
Las pruebas experimentales se las realiza en el cuenco amortiguador seco que contiene material pétreo hasta el nivel 0.70 m, para la investigación en el modelo usamos ripio de 2 cm de diámetro, teniendo en cuenta que la densidad de la roca es prácticamente similar tanto en modelo como en prototipo. La duración de cada una de las pruebas es de 45 minutos, este tiempo se determinó en base a la observación de que no se produzca cambios en el foso y se estabilice el movimiento del material sólido, con lo que el foso socavado queda conformado, sin embargo no se garantiza que este sea el tiempo de equilibrio de la profundidad del foso ya que este no es el objetivo del estudio, pero el tiempo establecido satisface el objetivo que es analizar cualitativamente la socavación.

Se realiza un análisis del foso socavado que se generan en el cuenco amortiguador con material suelto, para las diferentes variantes propuestas en los deflectores ubicados en el salto en esquí de los vertederos de excesos de la presa Toachi. Se presenta los fosos socavados para las pruebas con caudal de $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$, donde se opera únicamente el vertedero de excesos derecho este corresponde a un tiempo de retorno de entre 100 y 500 años. Además se analiza los fosos socavados para las pruebas con caudal de $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$, donde se opera únicamente el vertedero de excesos derecho este corresponde a un tiempo de retorno de 10000 años.

5.1.1 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR DEL DISEÑO ORIGINAL.

La descripción de la geometría de los deflectores dentados que corresponden al diseño original se indica en el numeral 4.3.1. En la fotografía No 5.1 se puede observar el flujo que despega del salto en esquí con deflectores y la conformación del foso socavado con curvas de nivel que permiten conocer los puntos más relevantes del foso.

Fotografía No 5.1: Deflector del diseño original, prueba con caudal de $398.04 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.



Para el caudal de $398.04 \text{ m}^3/\text{s}$, el flujo de recirculación debido a la operación del vertedero de excesos derecho se dirige hacia la margen izquierda, durante este movimiento el material petreo es removido hasta alcanzar un cierto equilibrio. En la figura No 5.1 se presenta el foso en el cuenco amortiguador que se obtuvo del levantamiento de la socavación, la forma del foso es simétrico, desde el inicio del umbral se tiene 38.5 m de material arrastrado por lo que cubre el umbral e ingresa a la transición.

Figura No 5.1: Socavación al pie de la presa, alternativa “O.” $Q = 398.04 \text{ m}^3/\text{s}$

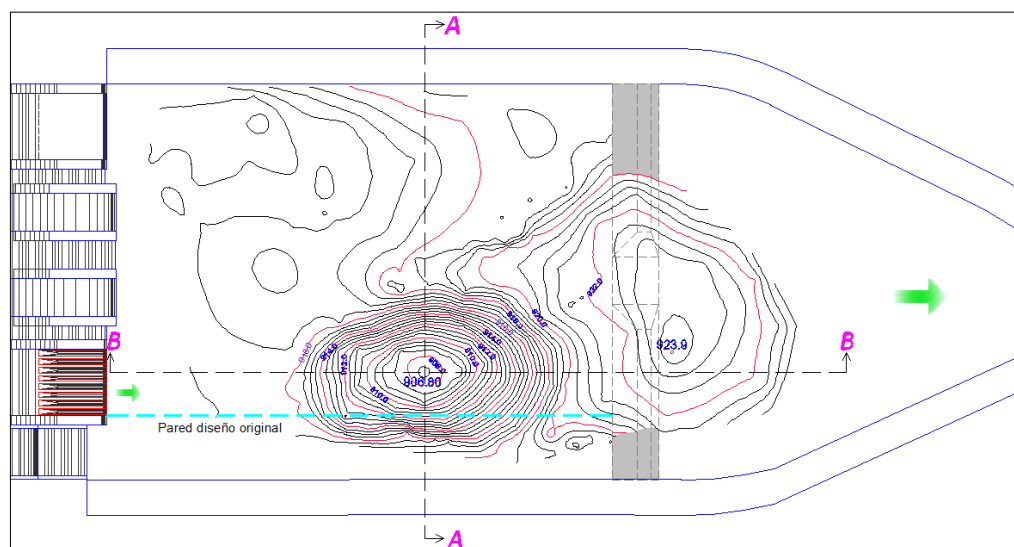
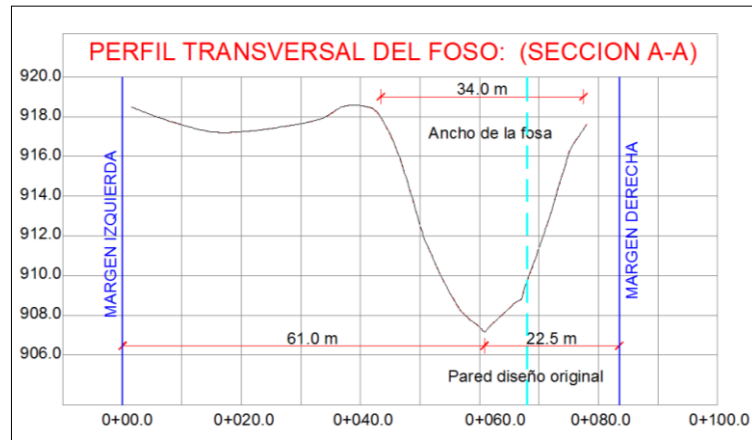
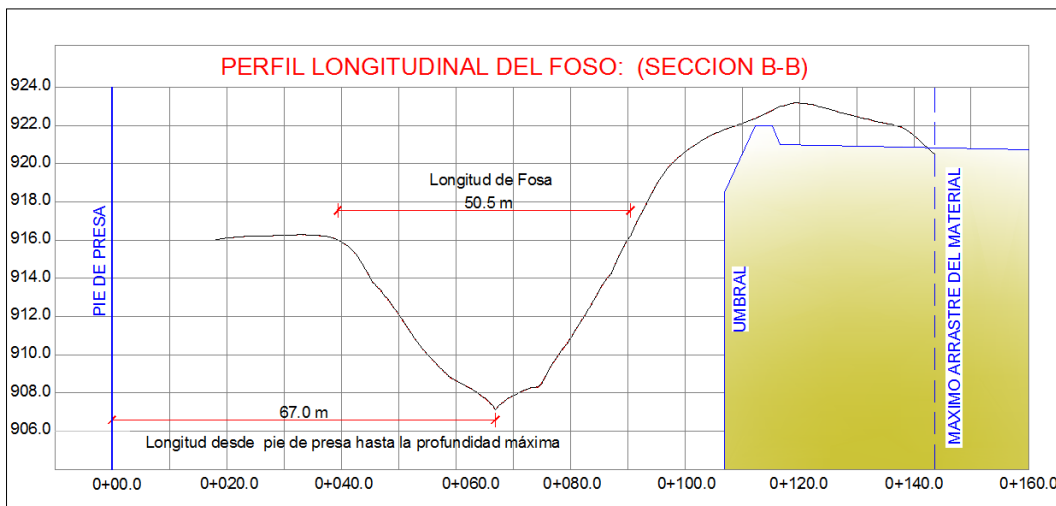


Figura No 5.2: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.1 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



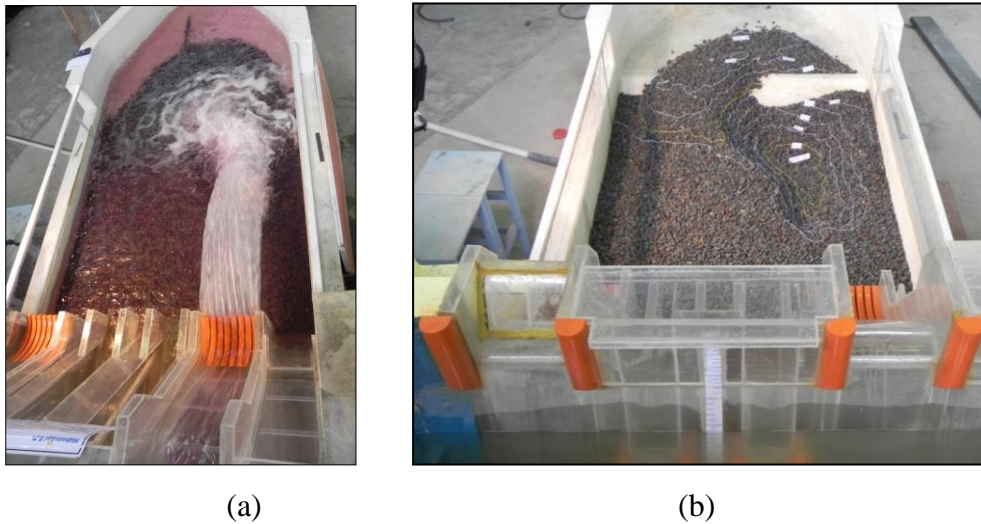
(b)

Del perfil transversal y longitudinal del foso socavado se tiene un ancho del foso de 34.0 m y no afecta a la margen derecha del cuenco amortiguador, pero con el ancho del diseño original que se observa en el perfil transversal y está representada por una línea entrecortada, la pared derecha del cuenco si es afectada. La distancia del pie de la presa hasta el punto más profundo de la socavación es de 67.0 m. Los valores presentados se observan en la figura No 5.2.

La máxima profundidad de socavación en el cuenco amortiguador avanza hasta la cota 906.80 msnm.

Para el caudal de $594.78 \text{ m}^3/\text{s}$, el flujo de recirculación tiende a dirigirse hacia la margen izquierda debido a que se opera solo el vertedero derecho, por esta razón el foso tiene una dirección hacia la izquierda del cuenco amortiguador.

Fotografía No 5.2: Deflector del diseño original, prueba con caudal de $594.78 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.



Con los datos del levantamiento del foso en el cuenco se obtuvo la figura No 5.3, ahí se observa que la forma del foso es irregular.

Figura No 5.3: Socavación al pie de la presa, alternativa “O.” $Q = 594.78 \text{ m}^3/\text{s}$

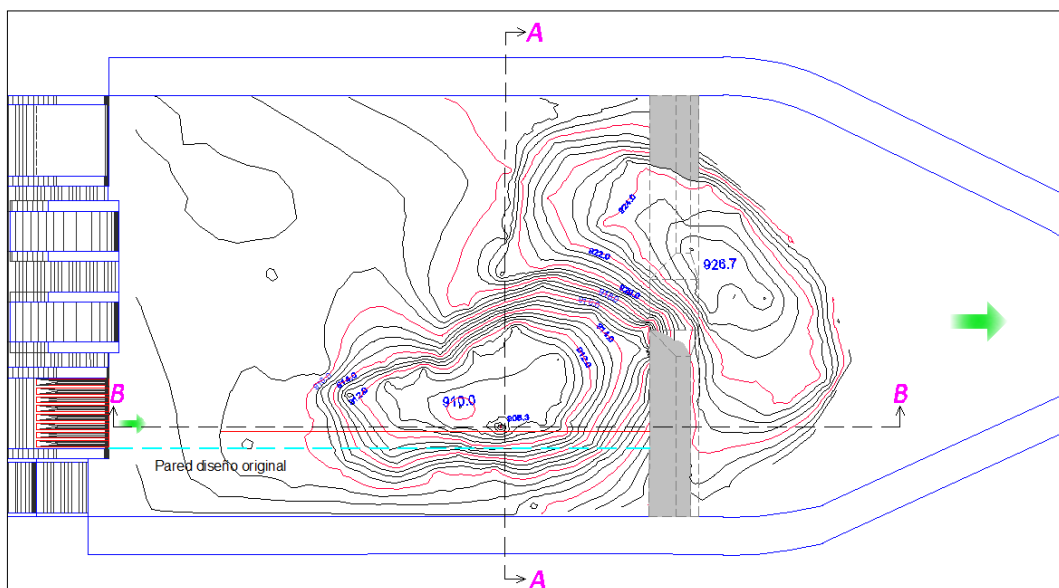
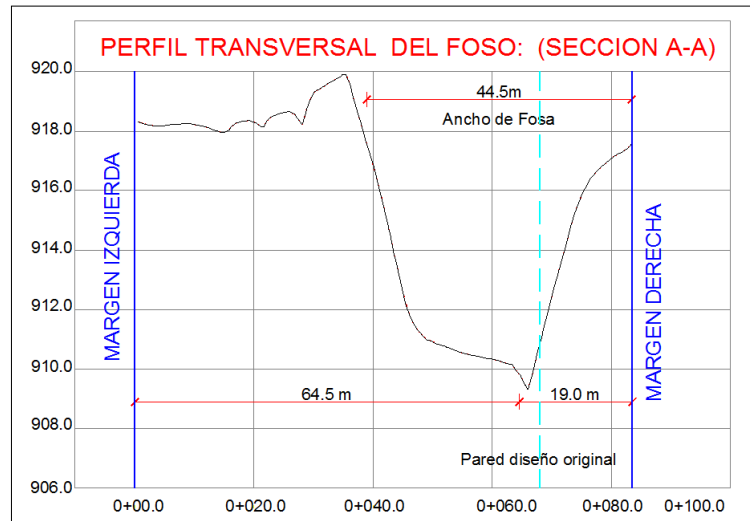
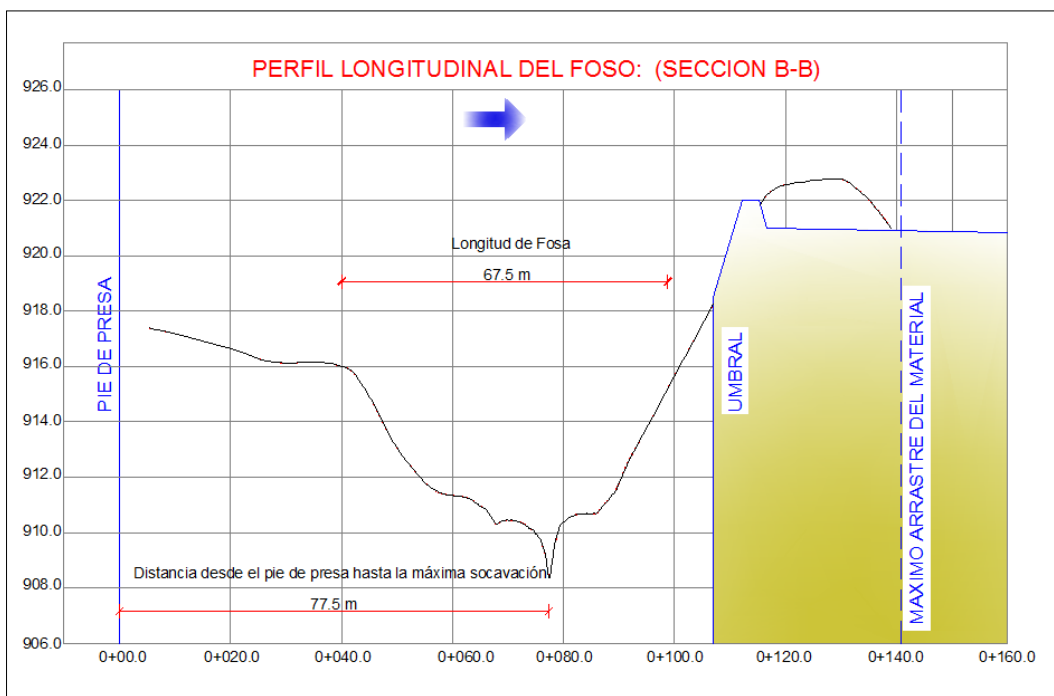


Figura No 5.4: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.3 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



(b)

En la figura No 5.4 se indica los perfiles transversales y longitudinales del foso socavado, la distancia desde el pie de la presa hasta el punto más profundo del foso es de 77.50 m, desde el inicio del umbral hay 40.0 m de material arrastrado además resulta que el umbral se descubre en la parte derecha.

La profundidad máxima del foso socavado llega hasta la cota 908.30 msnm

5.1.2 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON LAS PAREDES CONVERGENTES EN EL ESQUÍ. (ALTERNATIVA “A”)

Las dimensiones de las paredes colocadas en el esquí como deflector se presentan en el numeral 4.3.2, En la fotografía No 5.3 observamos la forma del flujo descargado y el foso resultante para la prueba con caudal de $397.00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fotografía No 5.3: Deflector, paredes convergentes, prueba con caudal de $397.0 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.

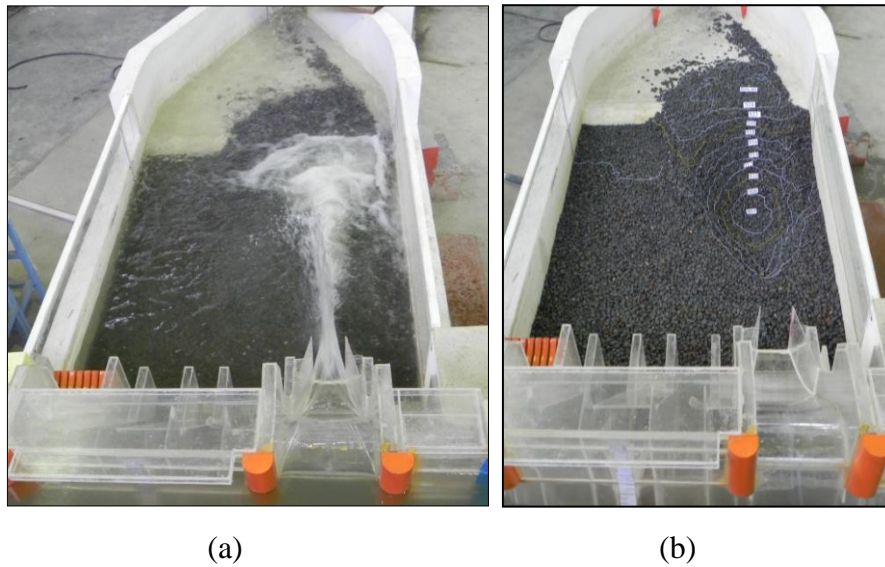


Figura No 5.5: Socavación al pie de la presa, alternativa “A.” $Q=397.00 \text{ m}^3/\text{s}$

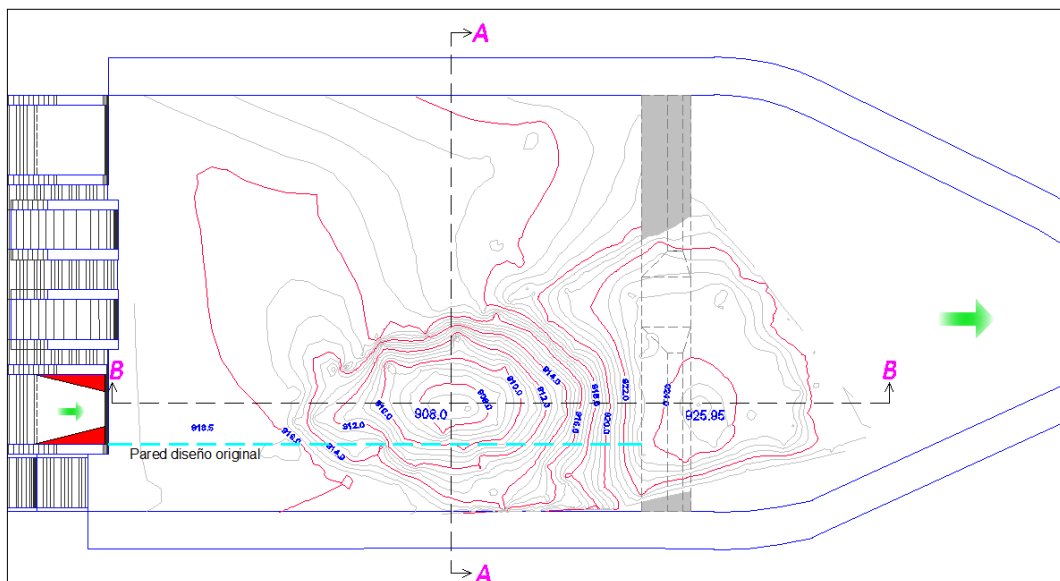
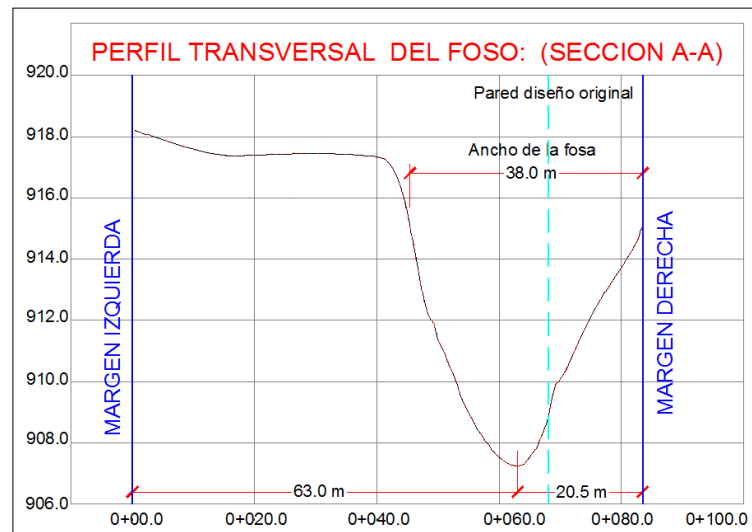
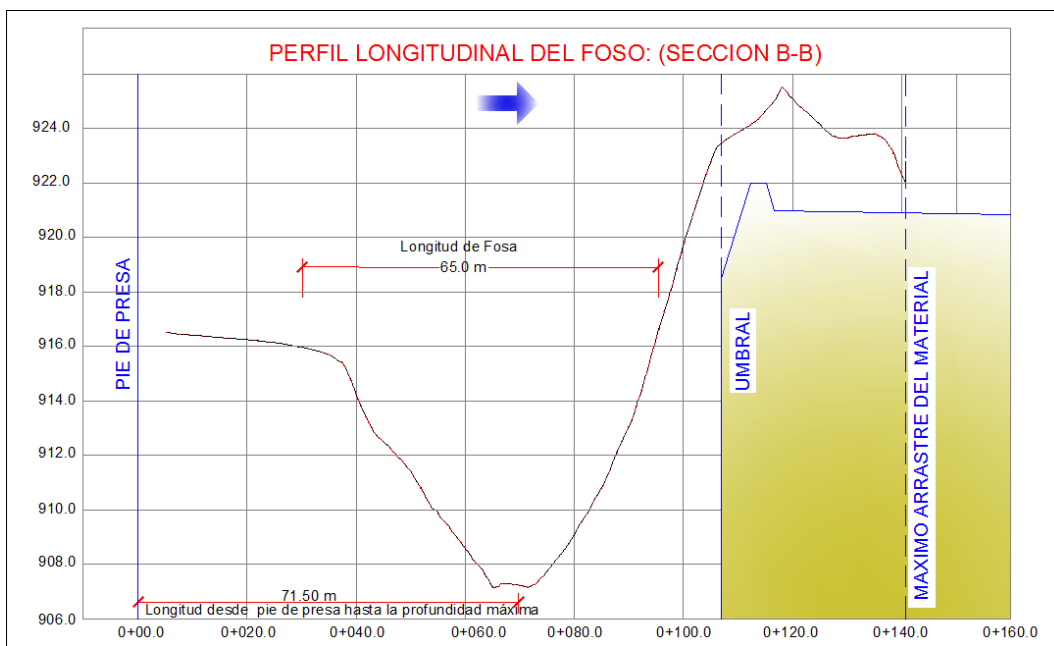


Figura No 5.6: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.5 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



(b)

El foso tiene una forma alargada esto se debe al efecto del chorro aplanado que produjeron las paredes convergentes en el esquí, del levantamiento se obtiene la figura No 5.5 y realizando el corte transversal y longitud del foso socavado en el cuenco se tiene un ancho de 38.0 m, la socavación afecta muy poco a la margen derecha del cuenco amortiguador, mientras que la longitud del foso es 65.0 m. El material es transportado a una distancia de 47 m medido desde el inicio del umbral.

El punto más bajo del cuenco avanza hasta la cota 908 msnm y se encuentra a una distancia de 71.50 m del pie de la presa.

Para el caudal de $605.45 \text{ m}^3/\text{s}$, se puede ver en la fotografía No 5.4 el chorro con colorante, y este a su vez nos permite observar las líneas de corriente para dicho flujo. De la socavación se puede observar que existe acumulación del material en la transición hacia el río.

Fotografía No 5.4: Deflector, paredes convergentes, prueba con caudal de $605.45 \text{ m}^3/\text{s}$.

(a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.

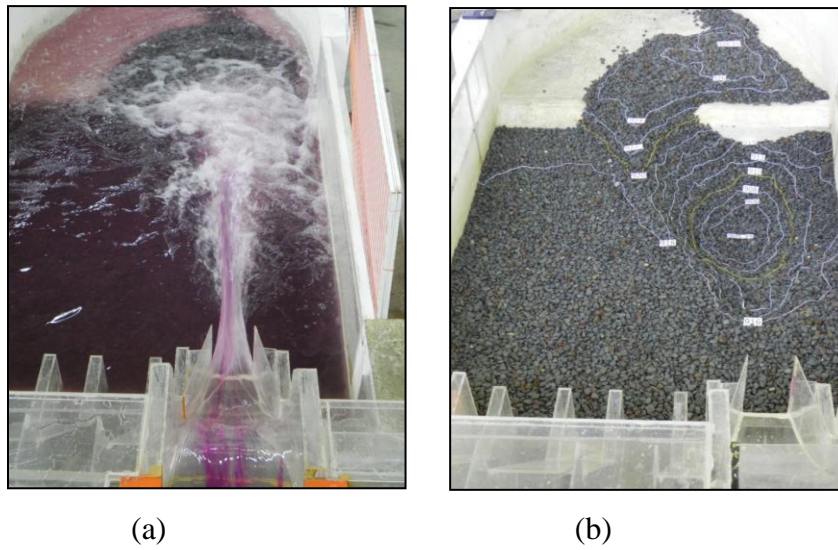


Figura No 5.7: Socavación al pie de la presa, alternativa “A.” $Q = 605.45 \text{ m}^3/\text{s}$

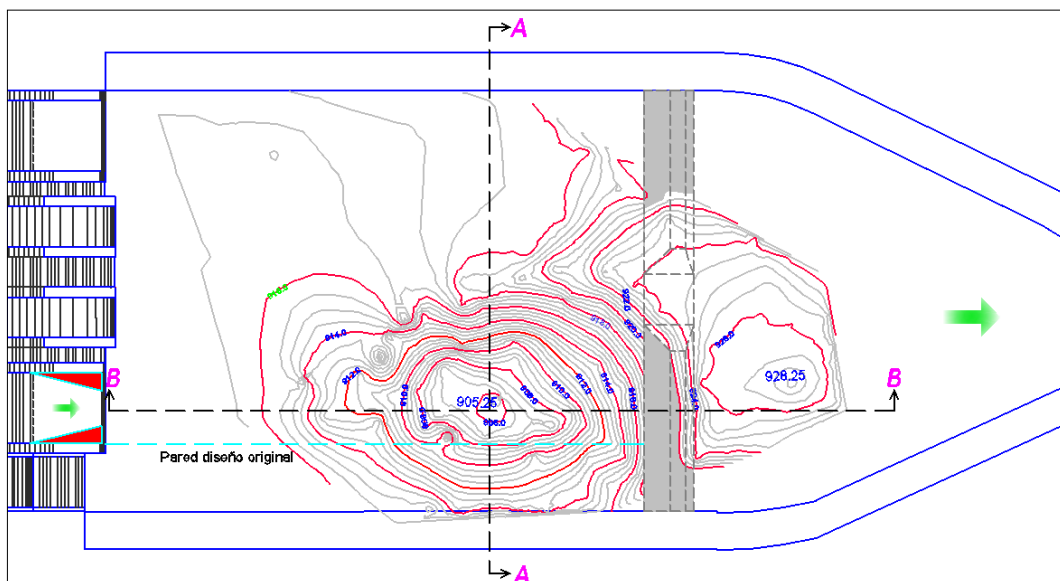
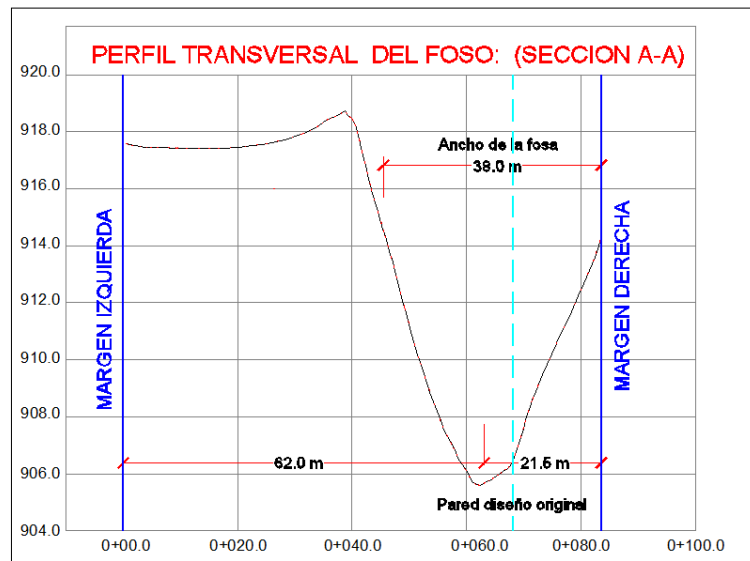
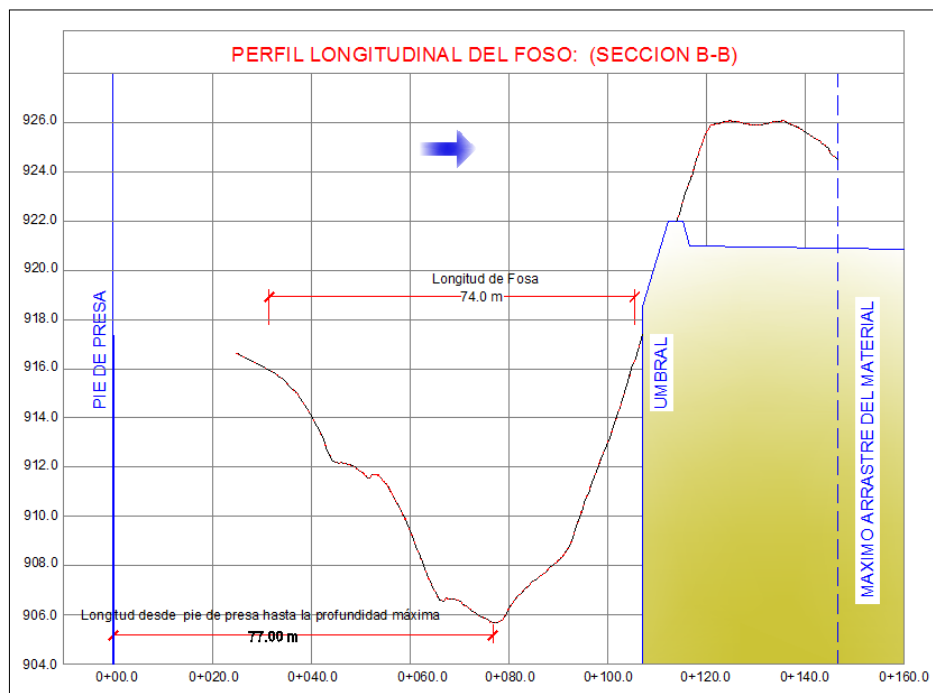


Figura No 5.8: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.7 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



(b)

La figura No 5.7 es el resultado del levantamiento del foso de allí se obtiene los perfiles de la socavación que se presentan en la figura No 5.8, se observa que el umbral se descubre e impide el desarrollo longitudinal del foso socavado. El foso se forma a una distancia desde el pie de la presa de 77.0 m. y el material es arrastrado 41.50 m desde el inicio del mismo. Las dimensiones del foso son 74 m de largo y 38 m de ancho. La cota de la profundidad del foso es 905.25 msnm.

5.1.3 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON LA PARED EN LA MARGEN DERECHA DEL SALTO EN ESQUÍ. (ALTERNATIVA “A-1”).

Para la prueba con caudal de $606.10 \text{ m}^3/\text{s}$ la socavación resultante se presenta en la fotografía No 5.5, además en la zona de impacto existe pequeños flujo de recirculación que se dirige en la dirección a las márgenes de cuenco amortiguador.

Fotografía No 5.5: Deflector, pared en la parte derecha del esquí, prueba con caudal de $606.10 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.

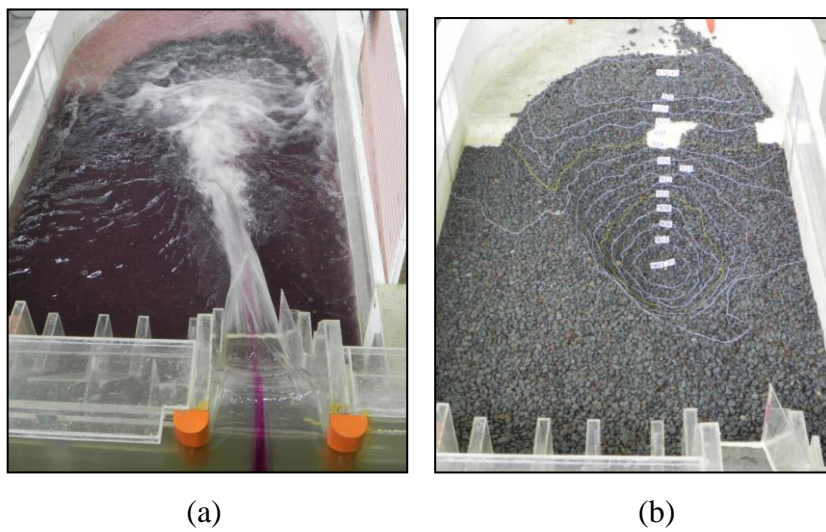


Figura No 5.9: Socavación al pie de la presa, alternativa “A-1.” $Q = 606.10 \text{ m}^3/\text{s}$

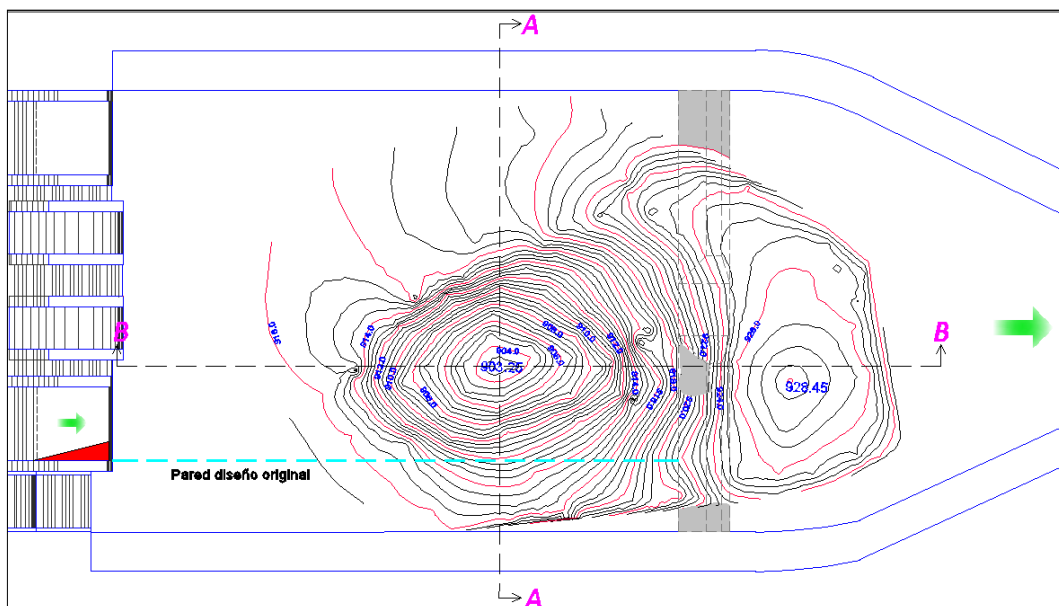
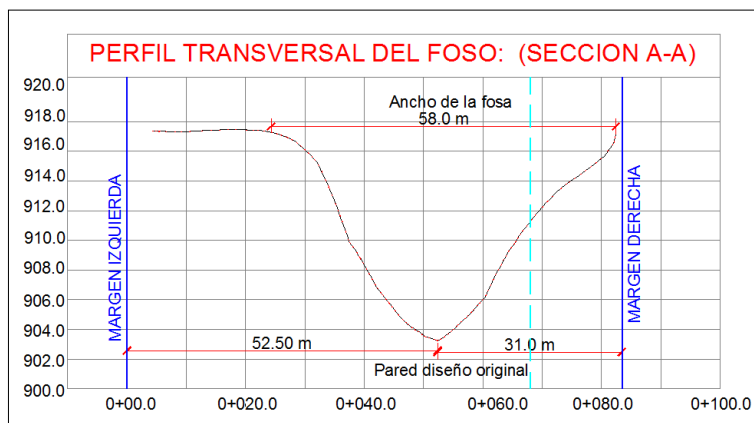
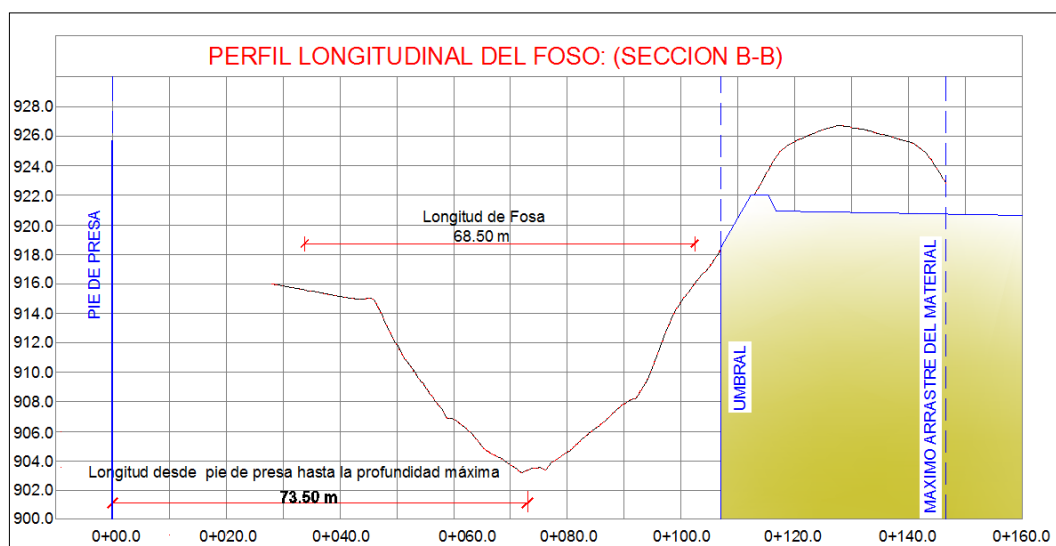


Figura No 5.10: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.9 (a) Perfil transversal
(b) Perfil longitudinal.



(a)



(b)

No se consigue la ubicación del foso socavado al centro del cuenco con el tipo de deflector ensayado esto se observa en la figura No 5.9. Los bordes del foso de socavación llegan hasta el talud derecho del cuenco, la profundidad máxima del foso llega hasta la cota 903.25 msnm ubicado a 73.50 m desde el pie del vertedero de excesos derecho, esta profundidad es la mayor de entre todas las alternativas realizadas, esto se debe a que en el esquí no se tiene deflectores que disipen energía y generen aireación en el chorro de descarga. El umbral queda casi totalmente cubierto por el material arrastrado, la configuración del cono es casi simétrica. El ancho de la fosa de socavación es de 58.0 m y el largo es 68.5 m.

5.1.4 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR DE ALTURA VARIABLE. (ALTERNATIVA “B”)

Las dimensiones de los deflectores de altura variable se presentan en el numeral 4.3.4, el chorro de descarga tiene una ligera tendencia a impactarse en el centro del cuenco amortiguador como se ve en la fotografía No 5.6, además se observa la socavación resultante para la descarga de $403.30 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fotografía No 5.6: Deflector de altura variable, prueba con caudal de $403.30 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.

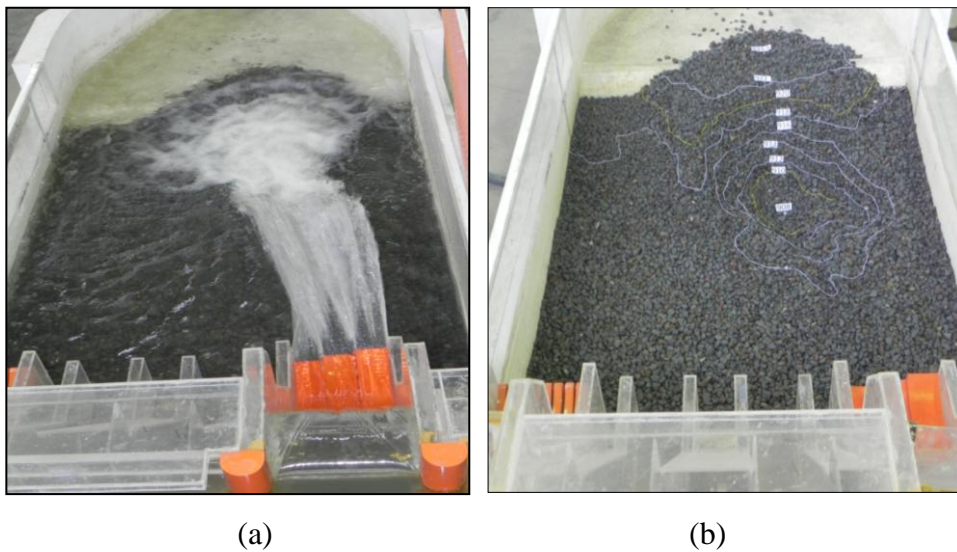


Figura No 5.11: Socavación al pie de la presa, alternativa “B.” $Q = 403.30 \text{ m}^3/\text{s}$

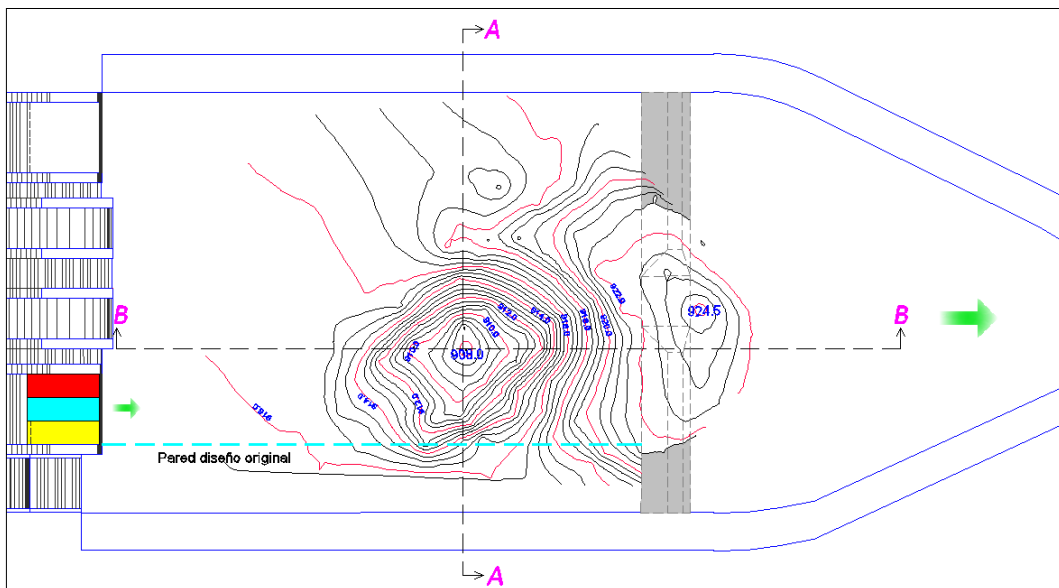
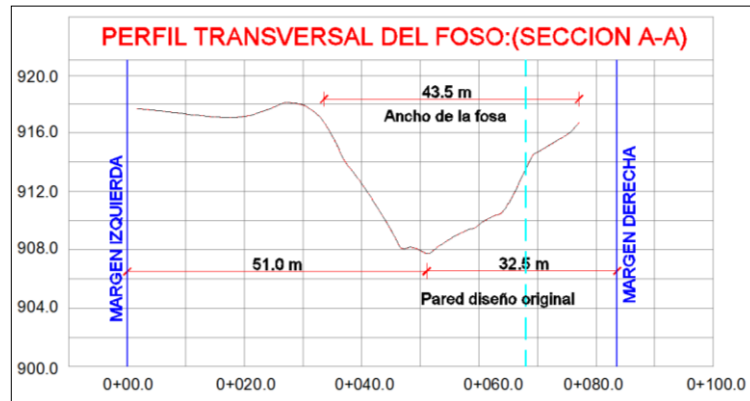
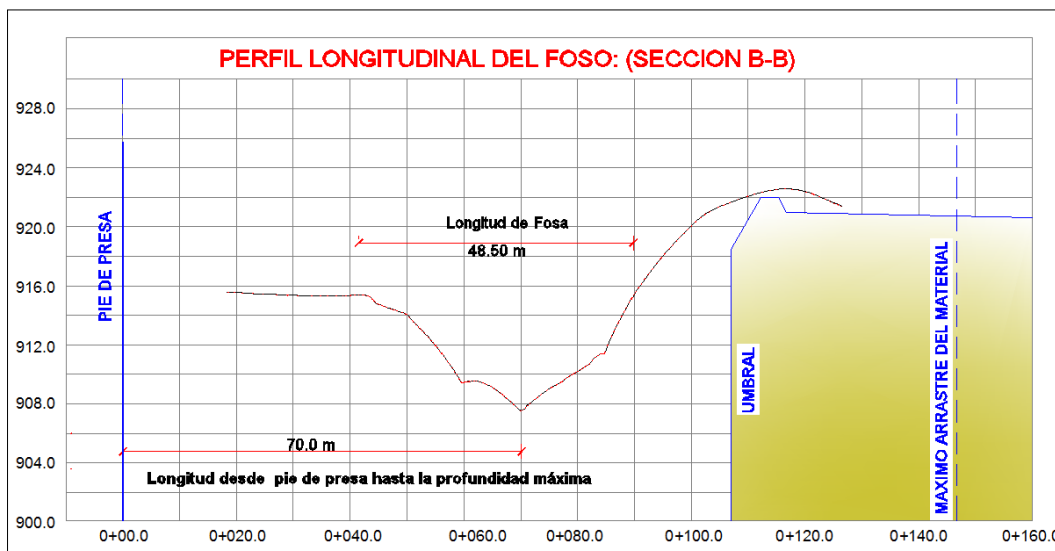


Figura No 5.12: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.11 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



(b)

Existe presencia de pequeñas ondas superficiales que avanzan desde la zona de impacto del chorro hasta la pared izquierda del cuenco amortiguador, choca en la margen izquierda y sigue hacia aguas arriba. El material es arrastrado 21.5 m medido desde la estructura de control que es el umbral, el largo del foso es 48.5 m y el ancho es 43.5 m, como se observa en la figura N° 5.12, la formación del foso no afecta la margen derecha del cuenco amortiguador, además en el perfil transversal hay una línea entrecortada que representa el ancho del cuenco con diseño original, se observa como la socavación afecta poco a la margen derecha. La profundidad máxima del foso se ubica a 70.0 m del pie de la presa y avanza hasta la cota 908 msnm.

Para el caudal de $606.12 \text{ m}^3/\text{s}$, el chorro que tiene una ligera tendencia a desviarse hacia la zona central del cuenco, por esta razón la socavación se desarrolla casi en el centro del cuenco disipador de energía.

Fotografía No 5.7: Deflector de altura variable, prueba con caudal de $606.12 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.

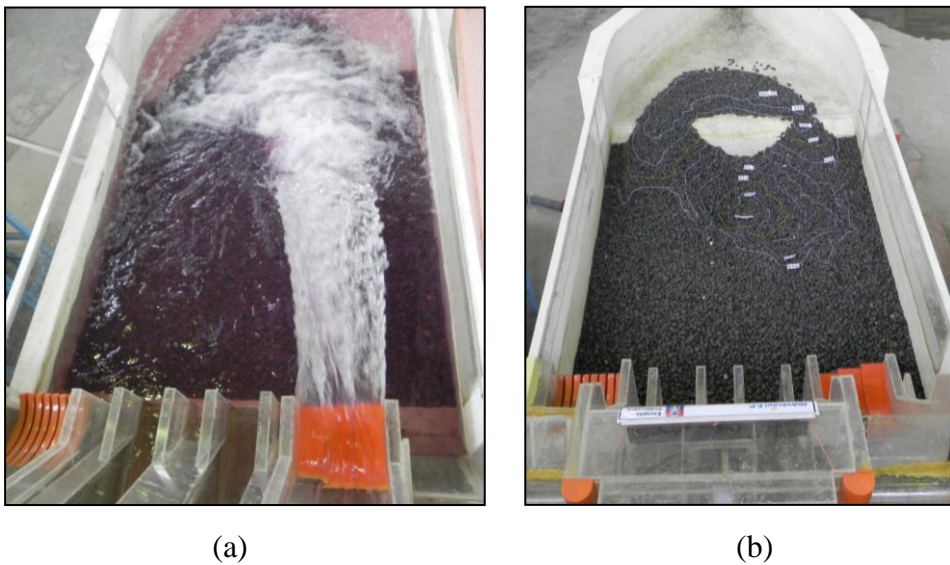


Figura No 5.13: Socavación al pie de la presa, alternativa “B.” $Q = 606.12 \text{ m}^3/\text{s}$

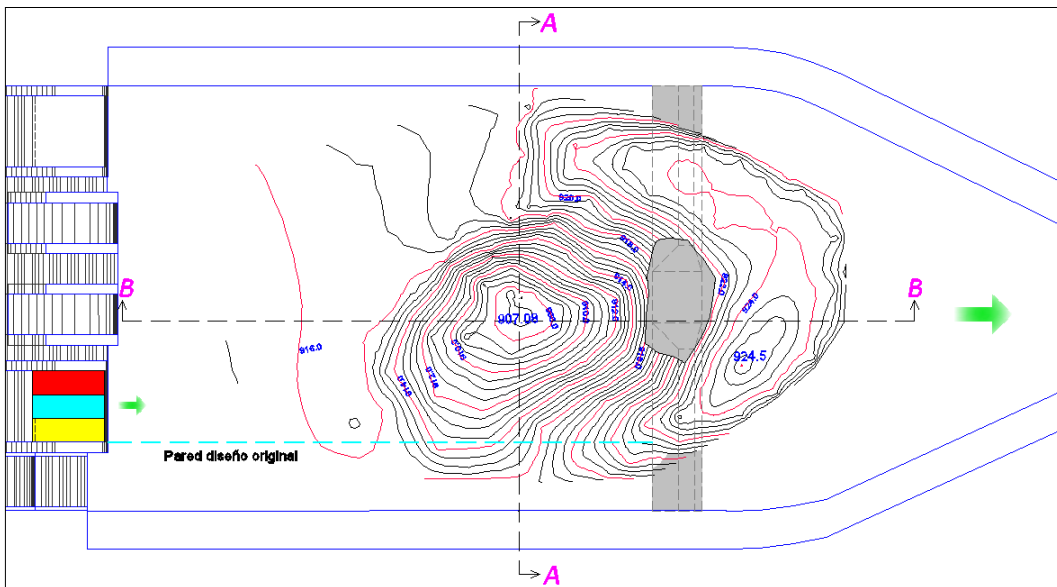
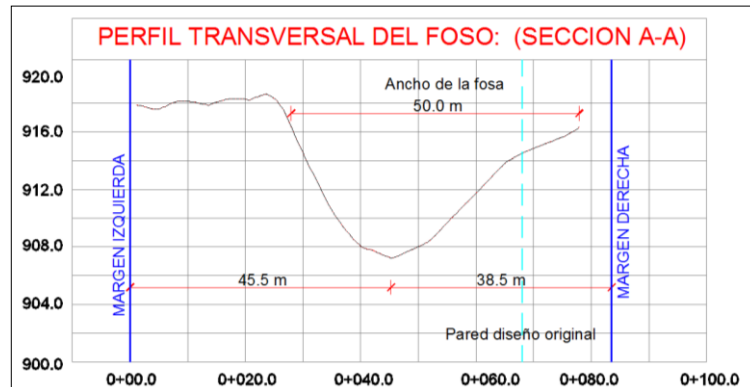
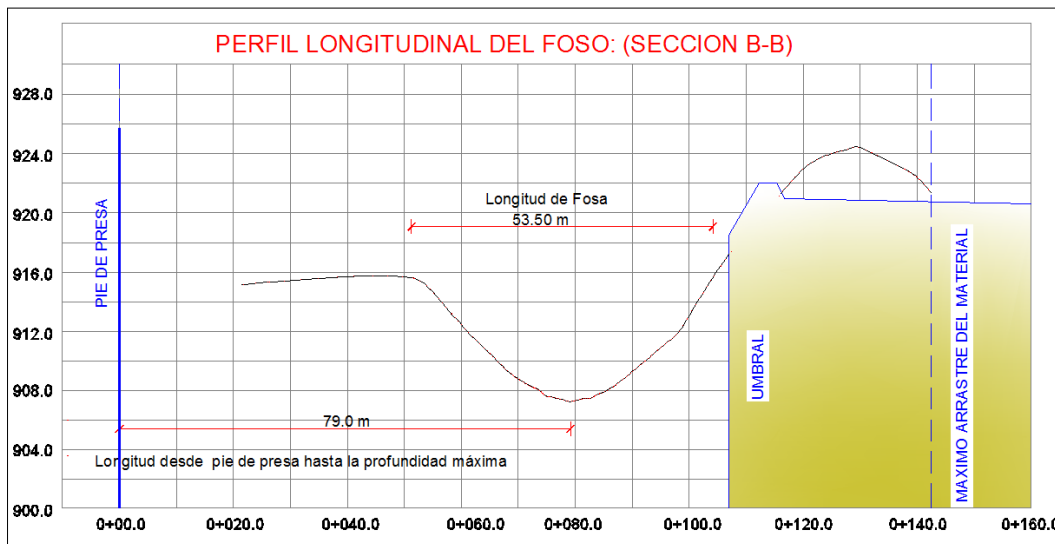


Figura No 5.14: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.13 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



(b)

Se puede notar que el incremento del caudal produce una mayor velocidad de despeje del chorro, por lo cual el alcance del mismo es mayor que con el caudal de $403.30 \text{ m}^3/\text{s}$, es así que la zona de impacto cae cerca del umbral lo cual interfiere en el desarrollo longitudinal del foso. Las dimensiones del foso se determina del perfil transversal y longitudinal de la figura No 5.14, el punto más profundo del foso se encuentra a 79 m desde el pie del vertedero de excesos derecho, el largo del foso es 53.5 m y el ancho es 50.0 m, la configuración del foso socavado no llega hasta la margen derecha del cuenco amortiguador favoreciendo la estabilidad de la misma. El umbral en la parte central queda descubierto y existe material acumulado fuera del cuenco amortiguador, llega hasta la zona de transición a una distancia de 37.5 m medido desde el inicio de la estructura de control. La profundidad máxima del foso socavado llega hasta la cota 907.08 msnm

5.1.5 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR PERALTADO (ALTERNATIVA “C”)

La forma tanto del chorro descargado como del foso generado, para el caudal de operación de $402.77 \text{ m}^3/\text{s}$, se presenta la fotografía No 5.8

Fotografía No 5.8: Deflector peraltado, prueba con caudal de $402.77 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.

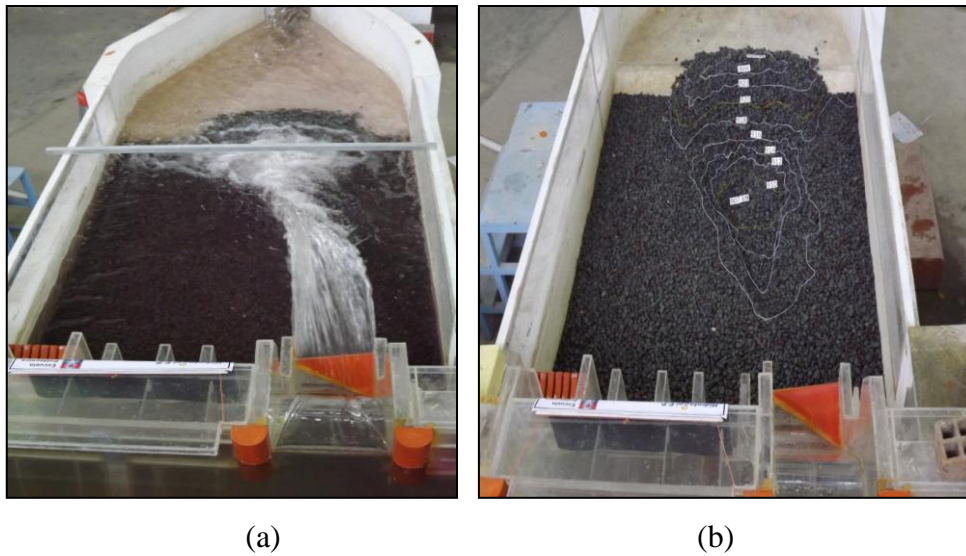


Figura No 5.15: Socavación al pie de la presa, alternativa “C.” $Q = 402.77 \text{ m}^3/\text{s}$

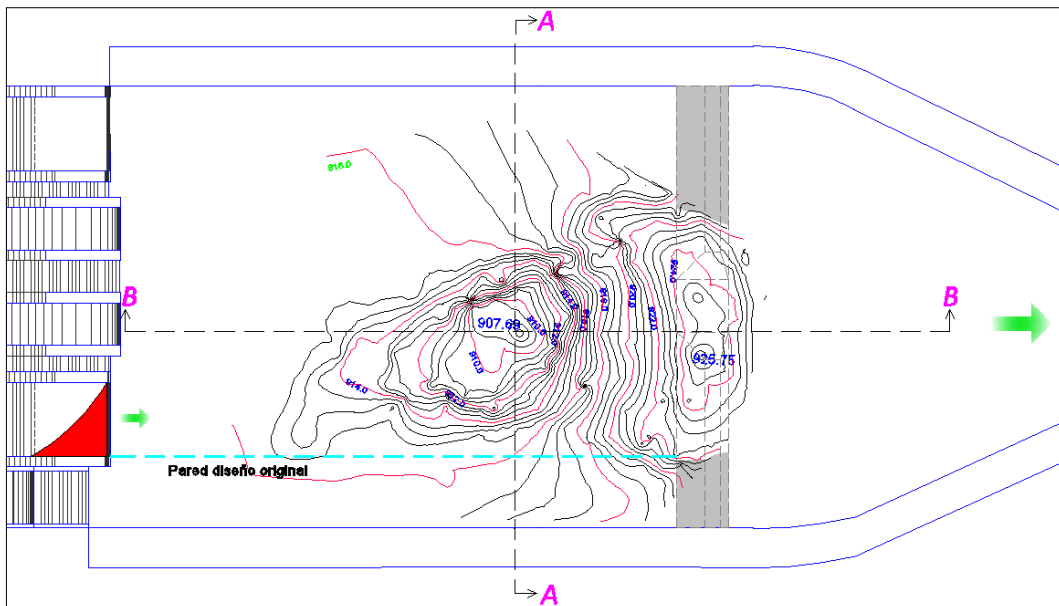
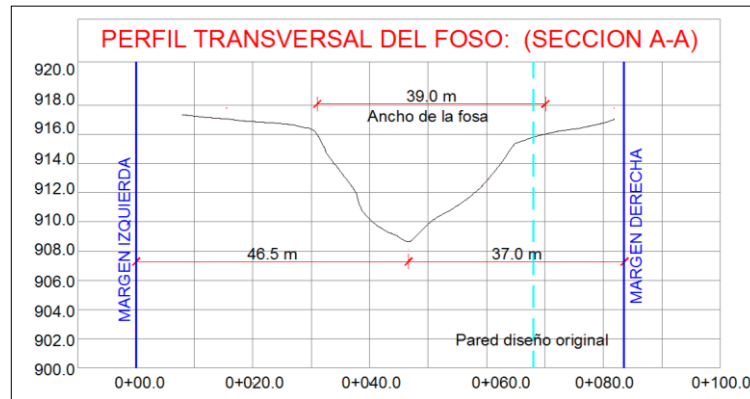
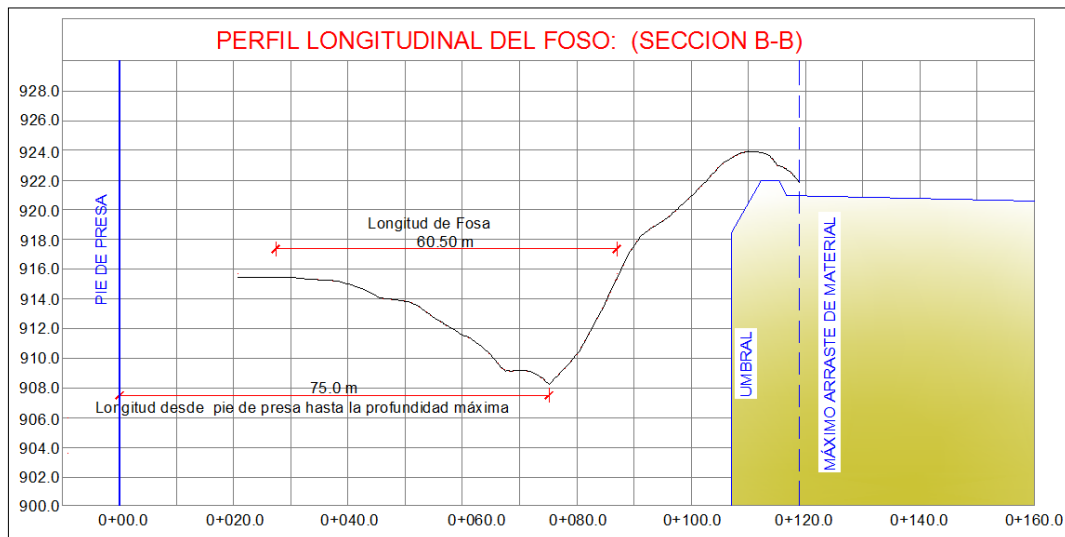


Figura No 5.16: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.15 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



(b)

La trayectoria del chorro tiende a dirigirse hacia el centro del cuenco, por ello la configuración del foso tiene tal dirección y por la forma del chorro el foso es alargado y el arraste de material casi no llega hasta la transición. La profundidad máxima del foso avanza hasta la cota 907.69 msnm y desde el pie de la presa se encuentra a 75.0 m, el largo del foso socavado es de 60.5 m y el ancho de 39.0 m, se observa que no afecta el talud del cuenco dissipador de energía, el material arrastrado cubre el umbral y parte se acumula en la transición hacia el río, desde el inicio del umbral el material es transportado 14 m. La determinación de los valores presentados se observa en la figura No 5.16.

Para el caudal de $600.77 \text{ m}^3/\text{s}$, se acumula mayor cantidad de material sobre el umbral que con el primer caudal ensayado. En la fotografía No 5.9 se tiene el chorro que conforma el foso y que a su vez se colocó curvas de nivel con el fin de identificar su forma.

Fotografía No 5.9: Deflector peraltado, prueba con caudal de $600.77 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.

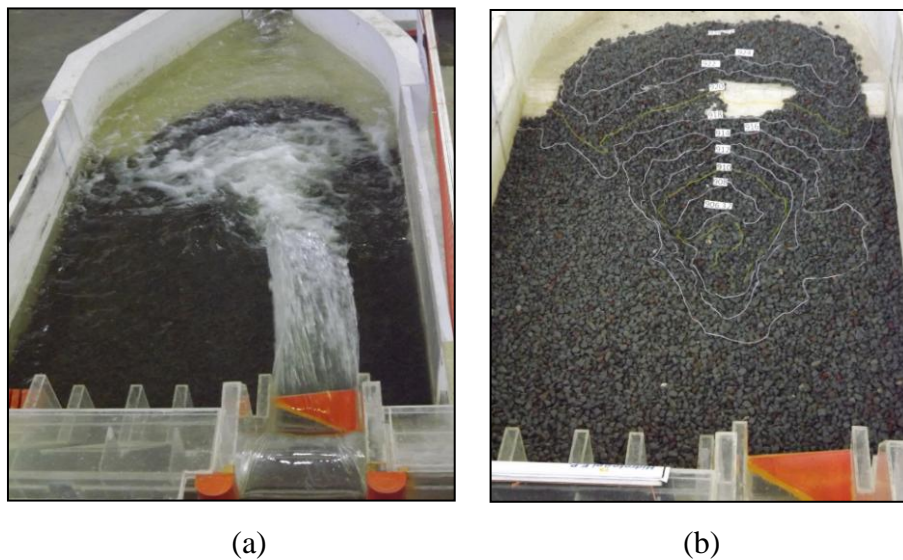


Figura No 5.17: Socavación al pie de la presa, alternativa “C.” $Q = 600.77 \text{ m}^3/\text{s}$

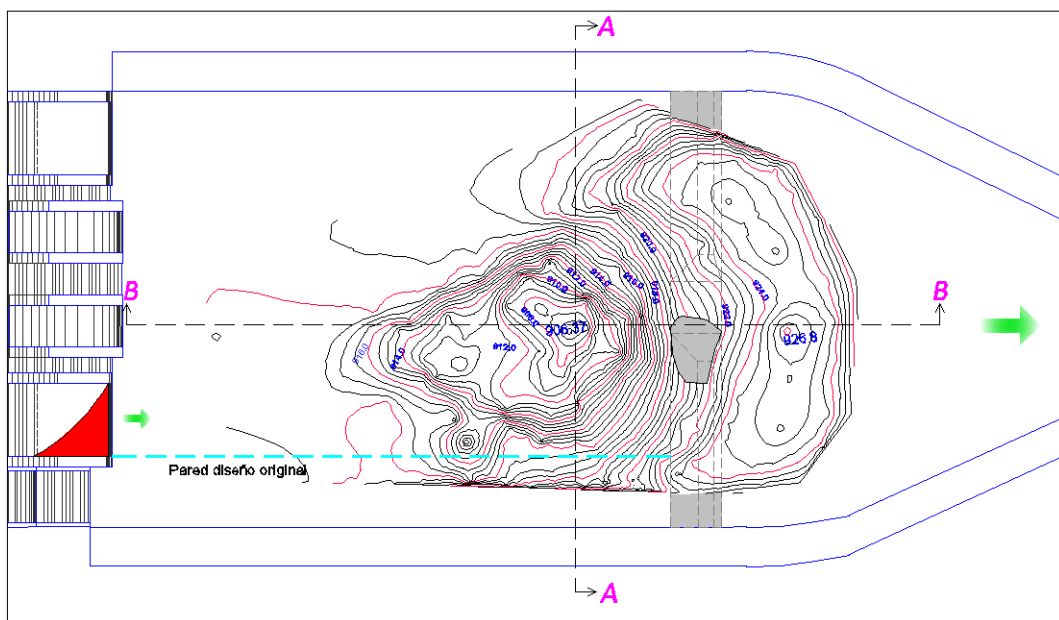
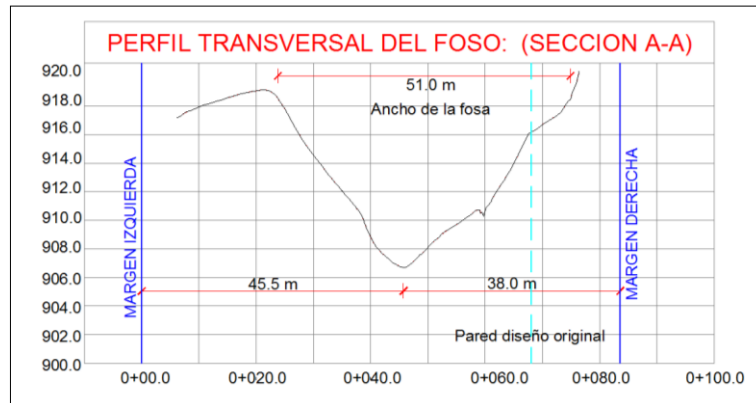
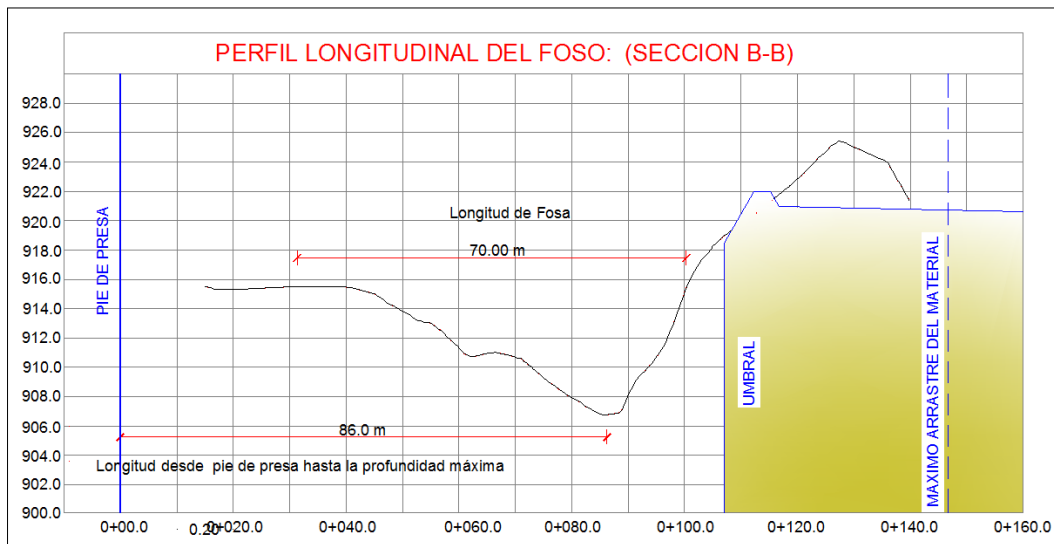


Figura No 5.18: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.17 (a) Perfil transversal.

(b) Perfil longitudinal



(a)



(b)

Con el perfil longitudinal y trasversal de la figura No 5.18 determinamos las dimensiones y ubicación del foso socavado. Se tiene que desde el pie de los vertederos de excesos hasta la profundidad del punto más bajo del foso se ubica a 86.0 m, en la zona del impacto se genera turbulencia por el reacomodo del material pétreo que es socavado por el chorro sumergido. La profundidad máxima de socavación llega hasta la cota 906.37 msnm, las dimensiones del foso es de 70.0 m, 51.0 m de largo y ancho respectivamente. Una parte del umbral se descubre y el material es arrastrado 35 m desde el inicio del umbral, la fosa socavada no afecta la margen derecha del cuenco disipador de energía.

5.1.6 FOSO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL DEFLECTOR DISCONTINUO Y CONTRACCIÓN A LA DERECHA DEL SALTO EN ESQUÍ (ALTERNATIVA “D”)

Para el caudal de $398.10 \text{ m}^3/\text{s}$, la descarga del chorro tiene una dirección rectilínea, por lo tanto la contracción existen en la parte derecha del esquí no influye en el cambio de dirección para la cual fue diseñada, por lo que claramente se puede evidenciar que la socavación no se desplaza al centro del cuenco.

Fotografía No 5.10: Deflector discontinuo y contracción, prueba con caudal de $398.10 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.



(a)

(b)

Figura No 5.19: Socavación al pie de la presa, alternativa “D.” $Q = 398.10 \text{ m}^3/\text{s}$

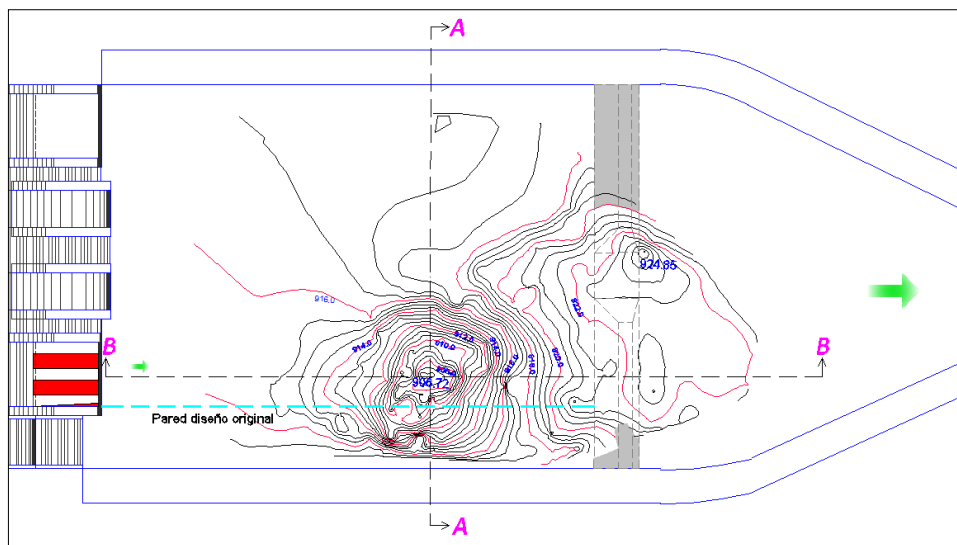
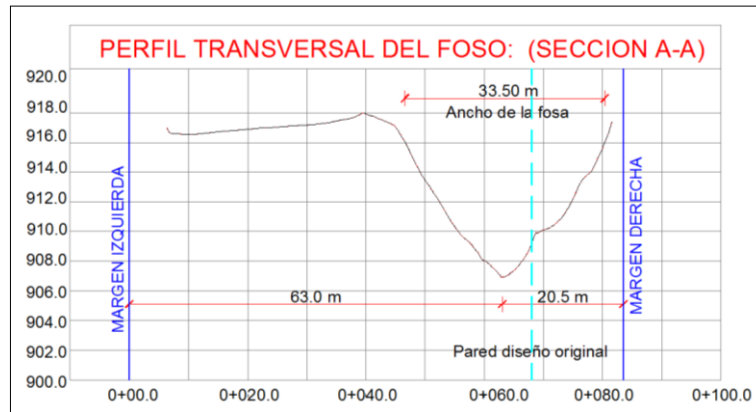
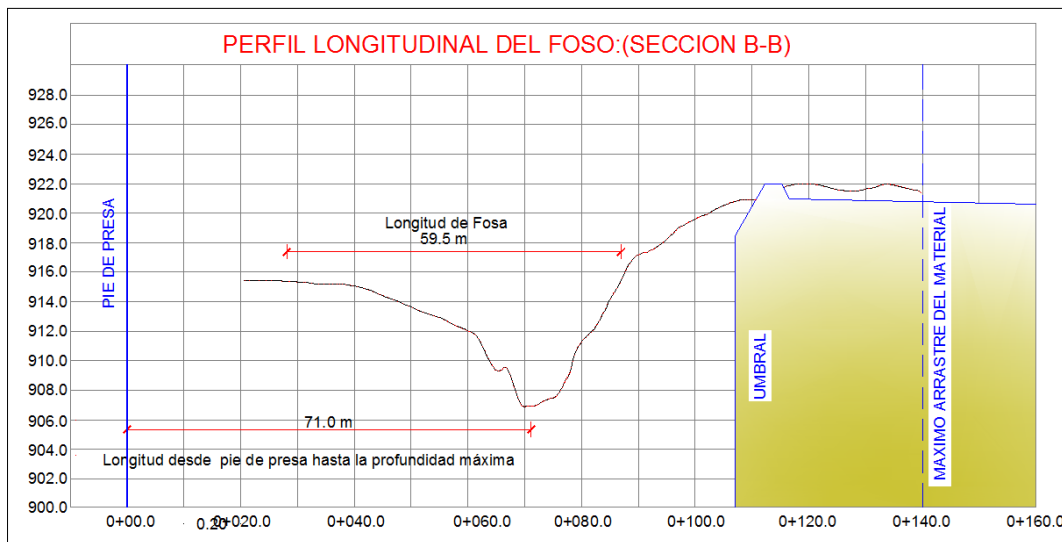


Figura No 5.20: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.19 (a) Perfil transversal
(b) Perfil longitudinal



(a)

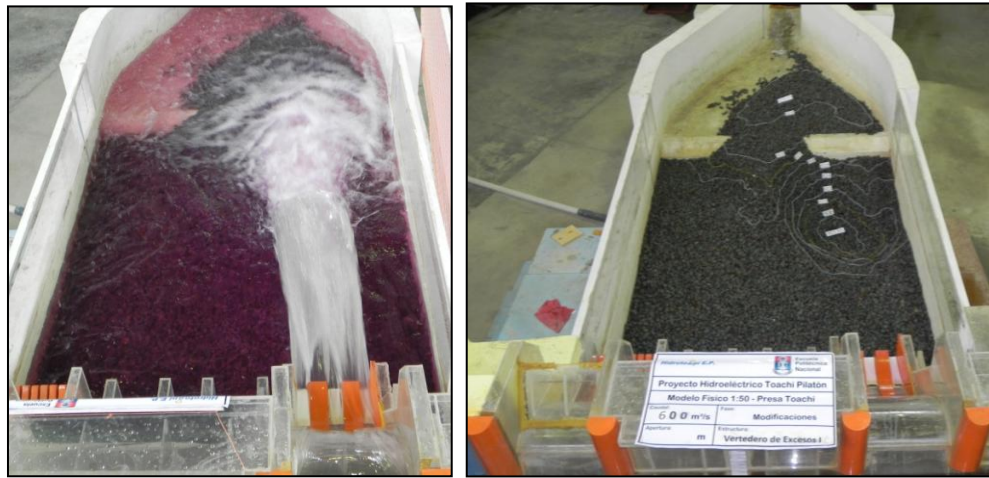


(b)

La profundidad máxima del foso llega hasta la cota 906.72 msnm y se encuentra ubicada a 71.0 m medido desde el pie de los vertederos de excesos de la presa Toachi, En la parte central del umbral se encuentra una escotadura de 9.60 m de ancho y esta queda totalmente cubierta por el material transportado, el material es arrastrado hasta una distancia de 35 m medido desde el inicio del umbral, el ancho del foso es de 33.5 m y de largo tiene 59.5 m, el foso tiene una forma irregular.

Para el caudal de $598.77 \text{ m}^3/\text{s}$, la forma del foso es irregular como se puede ver en la fotografía No 5.11, además del levantamiento se presenta la figura No 5.21, donde se obtuvieron el corte transversal y longitud de la socavación, las mismas se determina las dimensiones y ubicación del foso socavado.

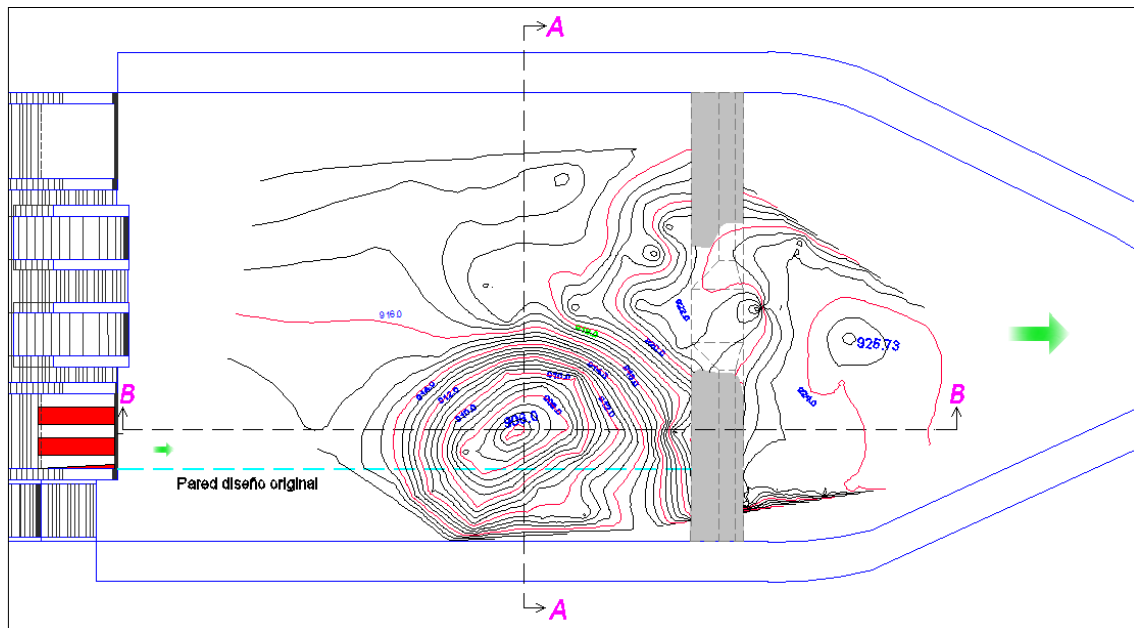
Fotografía No 5.11: Deflector discontinuo y contracción, prueba con caudal de 598.77 m³/s. (a).- Descarga del vertedero. (b).- Foso socavado.



(a)

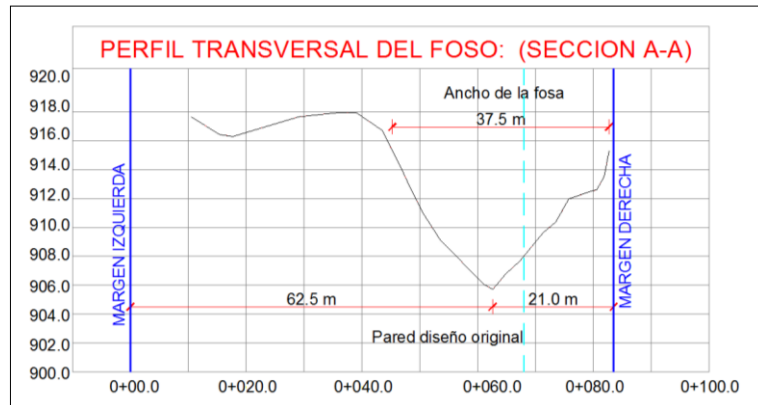
(b)

Figura No 5.21: Socavación al pie de la presa, alternativa “D.” $Q = 598.77 \text{ m}^3/\text{s}$.

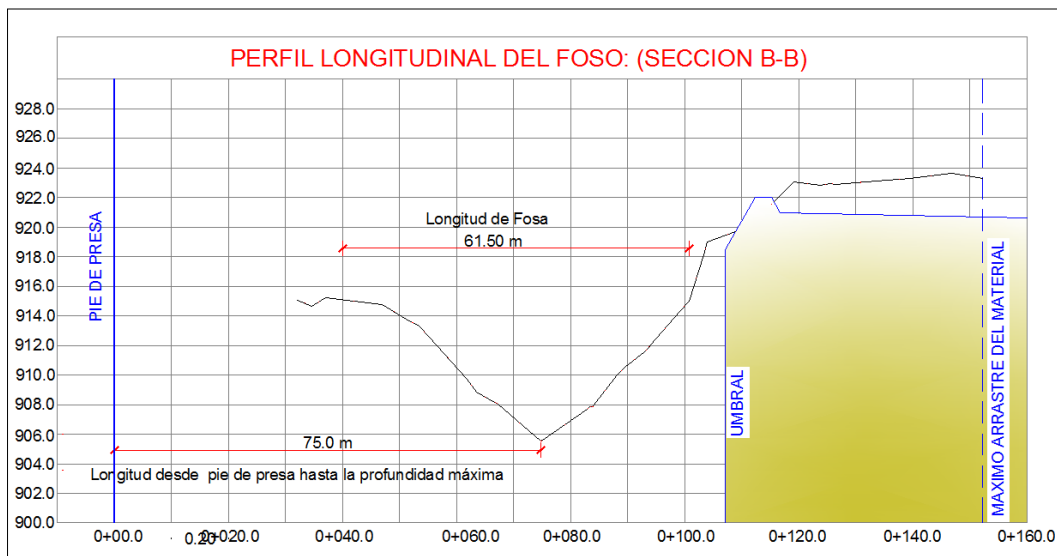


En cuanto al desarrollo longitudinal del cono socavado se observa que es interrumpido por el umbral que se encuentra a 105 m desde el pie de la presa, el ancho del foso es de 37.5 m y se encuentra cerca de la margen derecha del cuenco amortiguador, la profundidad máxima del foso avanza hasta la cota 905.75 msnm y se ubica a 75 m desde el pie del vertedero de excesos derecho. El material rocoso es arrastrado 48 m medido desde el inicio del umbral.

Figura No 5.22: Cortes de la socavación que indica la figura No 5.21 (a) Perfil transversal
 (b) Perfil longitudinal



(a)

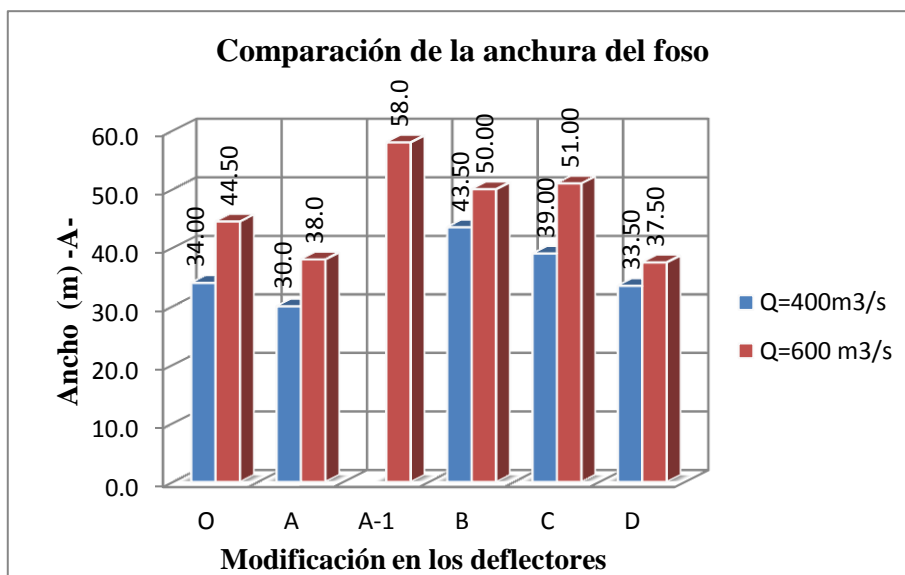


(b)

5.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS DIFERENCIAS EN LA GEOMETRÍA DEL FOSO SOCAVADO SEGÚN LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS.

En las pruebas realizadas en este estudio, se ha podido comprobar que la estructura del flujo está íntimamente relacionada con la geometría del lecho por la que discurre, es decir, con la geometría del foso de socavación que se va formando. Como la forma de este foso y su posición relativa respecto a los contornos del depósito de material erosionable va variando con el tiempo, es razonable pensar que las características del flujo serán diferentes según el estado de desarrollo del lecho socavado. Analizando directamente los datos obtenidos en las pruebas podemos obtener resultados cualitativos de las diferencias que presentan los fosos socavados según las modificaciones que se realizaron en los deflectores del esquí. En el gráfico No 5.1, podemos observar las anchuras del foso de socavación, el mayor ancho de foso se tiene con la alternativa “A-1,” además se puede ver que a medida que el caudal de ensayo aumenta, la anchura del foso de socavación aumenta, sea cual sea el tipo de estructura que genera la caída de agua desde el esquí.

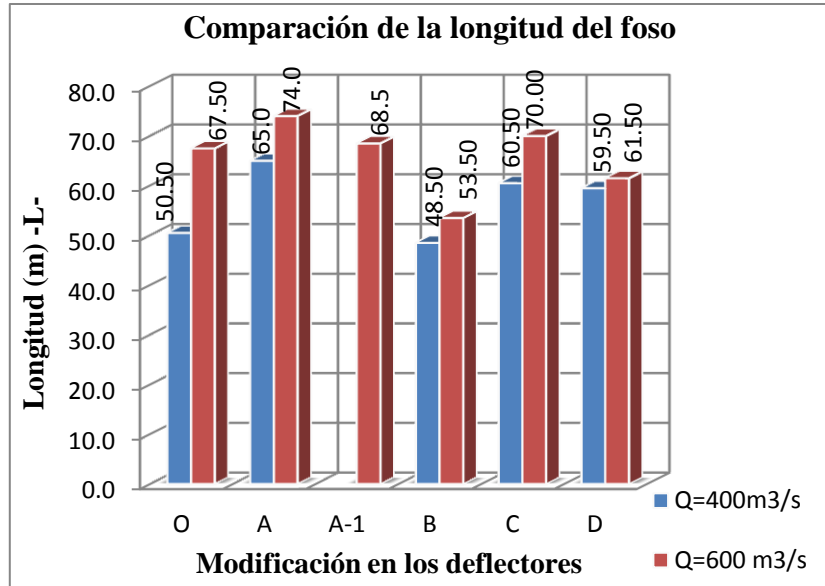
Gráfico No 5.1: Anchuras del foso según las alternativas propuestas.



En el gráfico 5.2 podemos observar la longitud del foso para las modificaciones en las estructuras a la salida del esquí, se tiene que para la alternativa “A” se produce la mayor longitud del foso, esto se debe a la forma aplanada que presenta el chorro. La menor longitud del foso es la producida por el deflector gradeado. También se puede notar que a

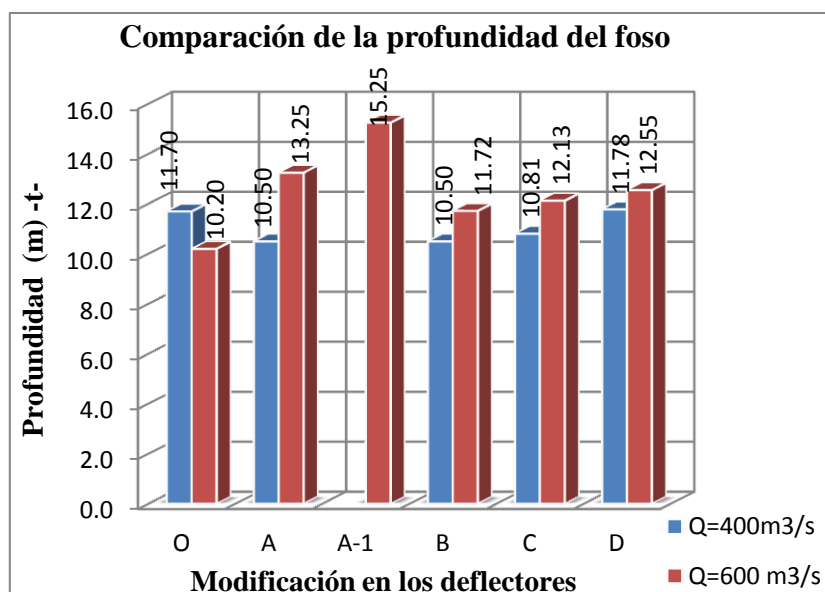
medida que el caudal de ensayo aumenta, la longitud del foso de socavación aumenta, sea cual sea el tipo de estructura que genera la caída de agua desde el salto en esquí.

Gráfico No 5.2: Longitudes del foso socavado según las alternativas propuestas.



En el gráfico No 5.3 se muestra la profundidad de socavación para cada alternativa y se observa que el foso socavado para las alternativas “O”, “B” son las que presentan la menor profundidad de socavación, además la alternativa “D” tiene casi la misma socavación que la del diseño original para el caudal cercano a 400 m³/s. Para el caudal de 600 m³/s la alternativa “A-1” es la que genera una mayor profundidad de socavación.

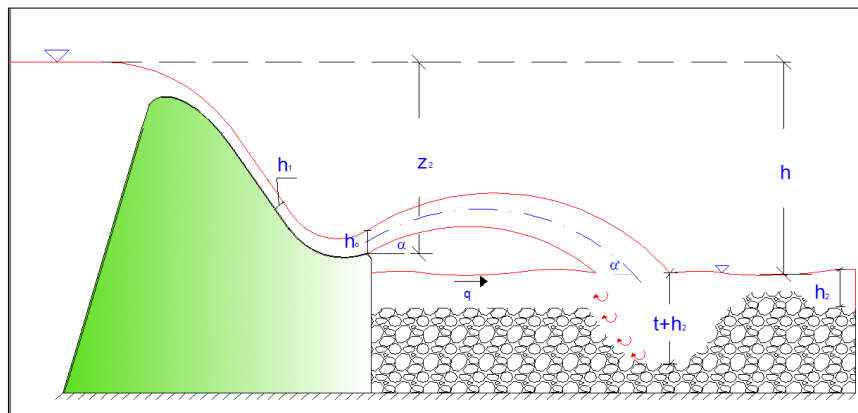
Gráfico No 5.3: Profundidades del foso socavado según las alternativas



5.3 DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. ESCENARIO N° 1

Se determina los valores teóricos de profundidades de socavación y los resultados experimentales de la profundidad del foso a continuación se lo comparan con valores teóricos determinados según las ecuaciones mencionadas en el capítulo 2.

Figura No 5.23: Parámetros que son utilizados para determinar la profundidad de socavación.



Ecuación de Damle:
$$t + h_2 = A \left(\frac{q z_2}{\sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (2.13)$$

Ecuación de Veronese Modificada:
$$t + h_2 = 1.90 q^{0.54} h^{0.225} \text{sen } \alpha' \quad (2.14)$$

Ecuación de Martins.
$$t + h_2 = 1.5 q^{0.6} z_2^{0.1} \quad (2.15)$$

Ecuación de Chian Min Wu:
$$t + h_2 = 1.18 h^{0.235} q^{0.51} \quad (2.16)$$

Ecuación de Mason:
$$t + h_2 = 3.27 \frac{q^{0.6} h^{0.05} h_2^{0.15}}{g^{0.3} d_m^{0.06}} \quad (2.17)$$

Ecuación de Soloveva:
$$t + h_2 = 0.45 h_o Fo^{1.5} \left(\frac{h_2}{d_m} \right)^{0.25} \quad (2.19)$$

No existen en la actualidad ningún método analítico o experimental, que permita una precisa predicción de la profundidad de socavación. Por lo tanto las ecuaciones presentadas dan una aproximación a la socavación, pero se debe tener en cuenta que la profundidad

con gran exactitud no es necesaria. Los datos experimentales para la aplicación de las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.19, se presentan en las siguientes tablas:

Tabla No 5.1: Parámetros usados para determinar la profundidad del foso $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$

Alternativa	Caudal	Ancho	Caudal unitario	Δ	Calado en cuenco	Δ
	Q	b	q	z_2	h_2	h
	m^3/s	m	$(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$	m	m	m
O _{Q400}	398.0	14.00	28.4	30.98	7.35	42.05
A _{Q400}	397.0	7.00	56.7	34.26	8.00	41.50
B _{Q400}	403.0	14.00	28.8	30.98	5.35	44.05
C _{Q400}	402.8	14.00	28.8	31.56	7.00	42.50
D _{Q400}	395.6	13.25	29.9	30.98	6.00	43.40

Tabla No 5.2: Parámetros usados para determinar la profundidad del foso $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$

Alternativa	Caudal	Ancho	Caudal unitario	Δ	Calado en cuenco	Δ
	Q	b	q	z_2	h_2	h
	m^3/s	m	$(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$	m	m	m
O _{Q600}	594.78	14.00	42.5	32.28	8.00	42.70
A _{Q600}	605.45	7.00	86.5	35.46	9.00	41.70
A-1 _{Q600}	606.10	10.50	57.7	35.46	9.00	41.70
B _{Q600}	606.12	14.00	43.3	32.28	7.40	43.30
C _{Q600}	600.77	14.00	42.9	33.06	8.00	43.00
D _{Q600}	598.77	13.25	45.2	32.58	8.00	43.00

En la tabla No 5.3 y 5.4 se muestran valores determinados con las respectivas ecuaciones, el cálculo de la profundidad de socavación difieren con el valor experimental, debido a que las ecuaciones fueron desarrolladas en base a experiencias en modelos hidráulicos y dependiendo cada uno de ellos de ciertos parámetros, como son: Variables características del fluido, del material componente del lecho, del escurrimiento en su conjunto y de la estructura de lanzamiento. Los resultados encontrados muestran algunas diferencias entre sí por lo que las ecuaciones tienen un carácter estimativo. Sin embargo para el caudal propuesto de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ la ecuación de Veronese se acerca a los valores observados en las alternativas “O” y “A”, la ecuación de Martins se acerca a “B” y la ecuación de Damle se acerca a las alternativas “C” y “D”.

Tabla No 5.3: Comparación de los resultados experimentales con los teóricos $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$

RESUMEN DE PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN EXPERIMENTALES Y CALCULADAS						
Alternativa		O_{Q400}	A_{Q400}	B_{Q400}	C_{Q400}	D_{Q400}
Caudal	(m^3/s)	398.0	397.0	403.3	402.8	398.1
Profundidad Experimental (t+h₂)	(m)	19.05	18.5	15.85	17.81	17.78
Damle (t+h₂)	Calculada	17.65	24.22	17.74	17.87	18.00
	Diferencia Porcentual (%)	7.34	30.94	11.92	0.33	1.24
Veronese (t+h₂)	Calculada	19.56	17.83	19.53	19.66	20.50
	Diferencia Porcentual (%)	2.66	3.64	23.24	10.40	15.31
Martins (t+h₂)	Calculada	15.76	24.09	15.87	15.90	16.23
	Diferencia Porcentual (%)	17.29	30.20	0.16	10.73	8.74
Chian Min Wu (t+h₂)	Calculada	15.66	22.21	15.94	15.80	16.18
	Diferencia Porcentual (%)	17.78	20.04	0.54	11.29	9.00
Mason (t+h₂)	Calculada	20.24	31.01	19.49	20.25	20.25
	Diferencia Porcentual (%)	6.26	67.60	22.97	13.70	13.91
Soloveva (t+h₂)	Calculada	12.91	22.38	13.01	12.98	12.28
	Diferencia Porcentual (%)	32.25	20.95	17.94	27.12	30.96

Para el caudal propuesto de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ la ecuación de Chian Min Wu se acerca al valores observados en las alternativas “O” y “B”, la diferencia está alrededor del 6.01 % y 2.22 % respectivamente. La ecuación de Veronese se acerca al valor observado en la alternativa “A” con una diferencia porcentual del 5.13 %, mientras que las profundidades determinadas con la ecuación de Martins se acercan a los valores observados en las alternativas “A-1”, “C” y “D”, la diferencia está alrededor del 0.73 %, 0.86 % y 1.77 % respectivamente.

Tabla No 5.4: Comparación de los resultados experimentales con los teóricos $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$

RESUMEN DE PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN EXPERIMENTALES Y CALCULADAS							
ALTERNATIVA		O_{Q600}	A_{Q600}	$A-1Q_{600}$	BQ_{600}	CQ_{600}	D_{Q600}
Caudal	(m^3/s)	594.8	605.5	606.10	606.12	600.8	598.77
Profundidad Experimental (t+h2)	(m)	18.2	22.25	24.25	19.12	20.13	20.55
Damle (t+h2)	Calculada	21.07	29.08	24.73	21.23	21.36	21.68
	Diferencia Porcentual (%)	15.78	30.68	1.99	11.04	6.11	5.49
Veronese (t+h2)	Calculada	24.10	21.11	16.97	23.55	24.07	24.93
	Diferencia Porcentual (%)	32.39	5.13	30.03	23.17	19.58	21.29
Martins (t+h2)	Calculada	20.13	31.14	24.43	20.36	20.30	20.91
	Diferencia Porcentual (%)	10.62	39.93	0.73	6.50	0.86	1.77
Chian Min Wu (t+h2)	Calculada	19.29	27.57	22.43	19.55	19.43	19.94
	Diferencia Porcentual (%)	6.01	23.92	7.49	2.22	3.50	2.95
Mason (t+h2)	Calculada	26.11	40.66	31.90	26.12	26.28	27.10
	Diferencia Porcentual (%)	43.45	82.75	31.55	36.60	30.53	31.89
Soloveva (t+h2)	Calculada	11.29	27.41	17.61	14.01	15.77	15.91
	Diferencia Porcentual (%)	37.98	23.18	27.39	26.72	21.65	22.56

5.4 CONCLUSIONES

- Se concluye que las variantes ensayadas en los deflectores del salto en esquí del vertedero de excesos del margen derecho y para el cuenco amortiguador modificado en la segunda fase ($L \times B = 2.1 \text{ m} \times 1.67 \text{ m}$), con el caudal de $Q \cong 400 \text{ m}^3/\text{s}$, el ancho de las fosas socavadas se desarrolla normalmente sin ninguna restricción y no afecta la pared derecha del cuenco amortiguador. En cuanto al arrastre del material en todas las variantes se observa la acumulación del material sobre el umbral.
- Las pruebas con caudal de $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{s}$ se observa que el umbral queda descubierto en la dirección longitudinal del foso, por lo tanto se puede decir que longitudinalmente el foso no se desarrolla normalmente debido a la presencia del

umbral ubicado a 2.10 m del pie de la presa, para las alternativas “B” y “C” la configuración del foso tiene una ligera tendencia a ubicarse en el centro del cuenco amortiguador.

- La socavación en el cuenco amortiguador producto de la descarga con el deflector del diseño original se genera cerca de la margen derecha del cuenco, mientras que con la alternativa que se logró el mayor desplazamiento del foso de la margen derecha hacia la parte central del cuenco es la descargada con el deflector peraltado.
- La operación del vertedero de excesos derecho produce recirculación de agua hacia la pared izquierda del cuenco amortiguador luego se dirige hacia aguas arriba de la zona de impacto del chorro y aguas abajo del material acumulado (duna) se produce un flujo con ondas superficiales en toda la transición.
- Las alternativas “O” “B” “C” “D” despegan un chorro que no es compacto sino aireado en su trayectoria de vuelo, siendo esta condición favorable cuando el chorro impacta el cuenco amortiguador, porque de esta manera la potencia del chorro disminuye, produciendo menor socavación.
- El material acumulado en una parte de la transición no retorna al cuenco amortiguador durante el proceso de excavado del chorro sumergido, debido a la presencia de la estructura de control (umbral).

5.5 RECOMENDACIONES

- Tomar varios registros de mediciones de niveles de agua, profundidades del foso, etc., con el objeto de analizar los resultados con valores más confiables ya que así se puede reducir los errores.
- Realizar un análisis de sensibilidades con los datos registrados en los ensayos, con el fin de corregir en algo los efectos no considerados o la apreciación de la instrumentación utilizada, etc.
- Realizar estudios experimentales con diferentes tamaños del material pétreo y así establecer la influencia que representa el material en la profundidad del foso.

CAPITULO 6

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS EN LA PRESA TOACHI. DISEÑO DEFINITIVO EN EL SALTO EN ESQUÍ Y SUS DEFLECTORES.

6.1 ANTECEDENTES.

En el análisis experimental realizado en la Fase II de la investigación para las estructuras de evacuación de caudales de la presa Toachi, se recomendó incrementar el ancho y la longitud del cuenco previsto aguas abajo de la Presa Toachi para garantizar la disipación de energía en todo el rango de caudales de operación previstos para los vertederos de excesos, desagües de fondo y vertedero de descarga del caudal turbinado en la Central Sarapullo. Sin embargo, las condiciones geológicas de la margen derecha no permiten el ensanchamiento mínimo recomendado, por lo que los diseñadores modificaron la geométrica en los deflectores de los saltos en esquí que aseguren la ubicación de las fosas de socavación alejadas de las márgenes.²¹

La modificación que se realizó al esquí y a los deflectores, es la mencionada alternativa “D” donde ya se efectuaron pruebas con solo el vertedero de excesos derecho y que de acuerdo con los ensayos realizados en el escenario No 1 y los resultados obtenidos estas modificaciones cumplen satisfactoriamente una buena disipación de energía.

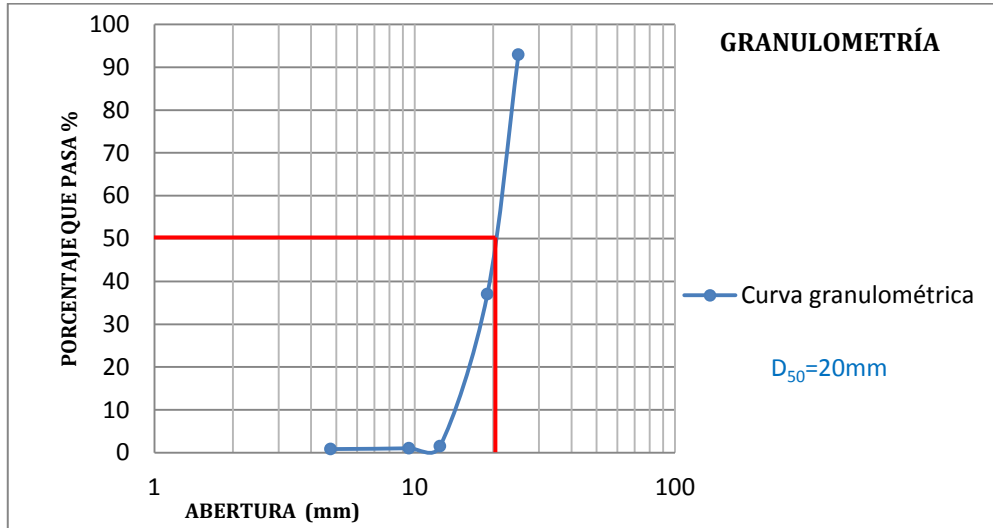
6.2 PLAN DE PRUEBAS DEL ESCENARIO N° 2

En esta etapa de pruebas se operan los dos vertederos de excesos de la Presa Toachi, consiste en abrir las clapetas simultáneamente cuando se tenga en el embalse el nivel máximo de operación 1.73 m (970 msnm), se procede a analizar y evaluar la erosión producida en el cuenco de disipación de energía que contiene material suelto, con los deflectores de la modificación de la alternativa “D”, el cuenco de disipación de energía tiene las dimensiones del diseño original, igualmente se colmata de material suelto hasta la cota 0.70 m (918.5 msnm). Realizada la prueba de granulometría de la grava que se

²¹ MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI. “Análisis experimental de la modificación en los deflectores del salto en esquí, Informe técnico fase III”. EPN. julio 2012. 38 p.

utilizará para estas pruebas obtenemos que $d_{50} = 20\text{mm}$, teniendo así un material homogéneo, a continuación se presenta la curva granulométrica correspondiente.

Gráfico No 6.1: Granulometría del material utilizado en las pruebas del escenario N° 2



Los caudales para la ejecución de las pruebas del escenario N° 2, se seleccionó en función de la tabla No 6.1, donde se presenta los caudales de crecida registrados en el estudio hidrológico.

Tabla No 6.1: Caudales de crecida en el sitio de la presa Toachi

Tiempo de Retorno (años)	Caudal Crecida (m^3/s)
2	381
5	485
10	555
25	640
50	703
100	763
500	904
1000	965
10000	1196

Fuente: 6256.0-R-18 Presa Toachi – Hidráulica – Memoria de cálculo, HIDROTOAPI E.P., 2010

La nomenclatura de las pruebas consta de una letra y un subíndice. La letra indica al deflector a utilizar, siendo en este escenario la alternativa “D” y el subíndice es un número que identifica el caudal de ensayo, como se indica en la tabla No 6.2.

Tabla No 6.2: Plan de pruebas del escenario N° 2.

Vertederos de excesos	Prueba	Q _m	Q _p	Objetivos
		l/s	m ³ /s	
Deflector discontinuo y contracción lateral	D ₁	67.882	1200	- Se registra los calados sobre el vertedero y en el cuenco de disipación de energía. -Se analiza las características del chorro descargado - Se identifica el desarrollo, profundidad y configuración del foso socavado y se procede a su levantamiento con estación total.
	D ₂	56.569	1000	
	D ₃	39.598	700	
	D ₄	28.284	500	
	D ₅	11.314	200	

6.2.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL ESCENARIO N°2

La desviación máxima entre el caudal propuesto y el caudal ensayado es del 1.1%, porcentaje que es tolerable dentro del estudio experimental.

Tabla No 6.3: Tabla de comparación de caudal ensayado vs caudal propuesto

RESULTADOS DEL ESCENARIO N° 2				
Prueba	Q _m	Q _p	Q _{p(Propuesto)}	Diferencia Porcentual
	l/s	m ³ /s	m ³ /s	%
D1	68.06	1203.12	1200	0.3
D2	56.71	1002.57	1000	0.3
D3	39.67	701.32	700	0.2
D4	28.26	499.57	500	0.1
D5	11.19	197.89	200	1.1

En la tabla 6.4 se presentan los valores de profundidad de agua en: el cuenco amortiguador, sobre la cresta del vertedero, además alturas y alcances del chorro de descarga tanto para la descarga derecha como izquierda. Se puede apreciar que para un aumento del caudal se incrementan los alcances y alturas del chorro, para el caudal más bajo de 197.89 m³/s el

alcance es de 44.50 m, es decir el chorro cae lejos de las estructuras de descarga y por lo tanto no afectaría la estabilidad de la misma.

Tabla No 6.4: Tabla con datos experimentales del chorro descargado.

PRUEBAS	Q	Vertedero	Calado sobre vertedero	Calado en el cuenco amortiguador	Altura máxima del Chorro	Alcance máximo del Chorro
	m ³ /s		m	m	m	m
D₁	1203.12	Izquierda	4.50	12.50	10.60	67.50
		Derecha	4.50		11.20	67.50
		Promedio	4.50		10.90	67.50
D₂	1002.57	Izquierda	4.50	11.50	9.50	63.50
		Derecha	4.50		10.20	63.50
		Promedio	4.50		9.85	63.50
D₃	701.32	Izquierda	3.90	8.75	9.75	61.00
		Derecha	3,9		9.20	62.00
		Promedio	3.90		9.48	61.50
D₄	499.57	Izquierda	3.20	7.60	9.40	56.75
		Derecha	2.90		7.60	57.30
		Promedio	3.05		8.50	57.03
D₅	197.89	Izquierda	1.95	5.00	7.10	45.00
		Derecha	1.55		6.15	44.00
		Promedio	1.75		6.63	44.50

Los valores transformados a prototipo de la altura del chorro son medidos desde el salto en esquí hasta el punto más elevado del chorro.

En la tabla No 6.5 se indican las características geométricas del foso para la descarga del vertedero derecho e izquierdo. Se observa que los valores del foso formado en la parte izquierda del cuenco amortiguador son ligeramente superiores en cuanto a la profundidad de socavación, longitud y ancho del foso, las razones de esta variación puede ser causado por: la dirección que tiene la presa respecto al cuenco amortiguador, los efectos de escala, errores sistemáticos y accidentales cometidos en los ensayos, etc.

Tabla No 6.5: Resultados experimentales de la geometría y ubicación del foso socavado, pruebas del escenario N° 2

PRUEBAS DIMENSIONES	m ³ /s	D ₁		D ₂		D ₃		D ₄		D ₅	
		1203.12		1002.57		701.32		499.57		197.89	
		Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha
Nivel máximo de socavación	msnm	913.07	913.39	911.71	912.41	910.57	911.57	911.66	912.75	914.77	911.77
Nivel máximo de acumulación	msnm	925.55	922.50	926.35	924.00	925.05	924.50	924.80	923.00	923.50	923.50
Profundidad del foso de Socavación (t ₀ =t+h ₂)	m	17.93	17.61	18.29	17.59	16.68	15.68	14.44	13.35	8.73	11.73
Longitud del foso.	m	43.00	32.50	47.00	41.50	33.50	35.00	31.00	34.00	37.50	18.00
Ancho del foso.	m	19.00	9.00	16.50	15.00	18.00	18.00	17.00	21.00	15.00	13.50
Distancia: Desde la presa hasta el foso.	m	70.50	70.50	75.00	70.50	63.50	64.00	62.00	56.50	60.00	65.00
Distancia: Desde la presa hasta el arraste máximo.	m	120.00	112.00	117.00	109.50	104.00	100.50	100.00	99.00	100.50	90.50
Distancia: Desde la margen derecha hasta el foso.	m	65.00	1.00	67.00	2.00	67.00	1.00	66.50	1.00	67.00	1.00
Distancia: Desde la margen izquierda hasta el foso.	m	3.00	67.00	1.00	66.00	1.00	67.00	1.50	67.00	1.00	67.00

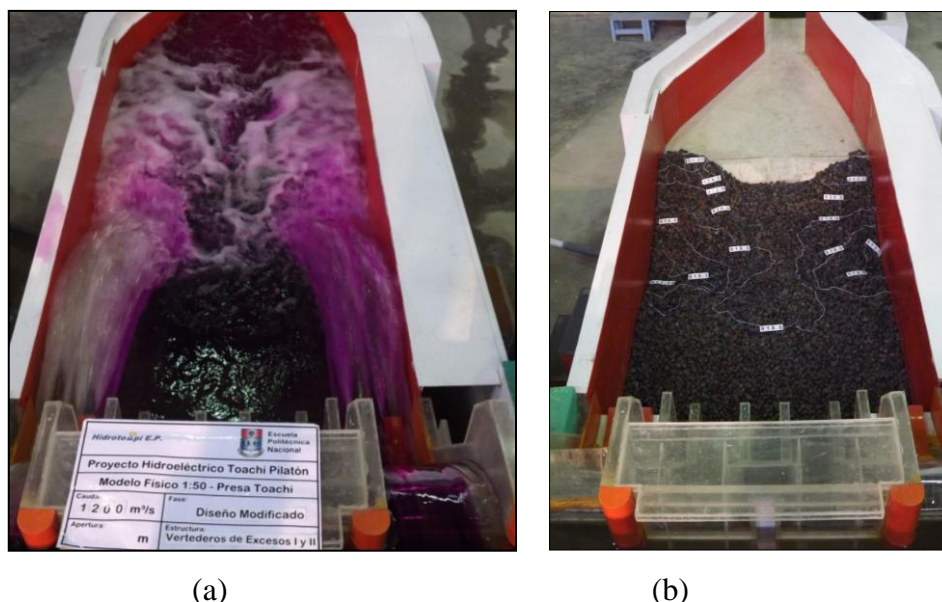
6.3 SOCAVACIÓN EN EL CUENCO DE FONDO MOVIL DISPUESTO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR EFECTO DE LA DESCARGA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI. ESCENARIO N° 2.

En esta fase al cuenco amortiguador se le reduce el ancho, quedando el ancho del diseño original ya que debido a las condiciones geológicas de las márgenes del río no se puede incrementar la misma. A continuación se analiza la configuración del foso socavado por la operación de los dos vertederos de excesos.

6.3.1 PRUEBA D1: $Q=1203.12 \text{ m}^3/\text{s}$

La operación en los vertederos empiezan cuando se abren las clapetas en el nivel máximo de operación, cuando el flujo se estabiliza se tiene en el cuenco amortiguador una profundidad de agua de 12.50 m, los chorros tienen una trayectoria paralela a las márgenes del cuenco amortiguador. En la fotografía No 5.12 se muestra la fosa de socavación producido por la descarga de los vertederos de excesos.

Fotografía No 6.1: Deflectores del diseño modificado, prueba con $1203.12 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.



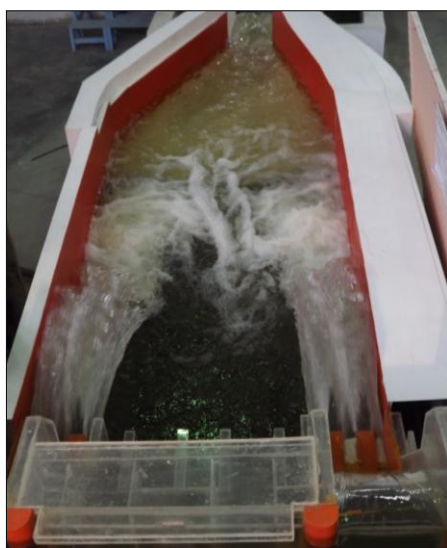
Se observa que los conos de socavación se desarrollan en las márgenes del cuenco amortiguador tanto izquierdo como derecho, por lo que pueden afectar la estabilidad de la misma. La profundidad máxima de socavación registrada avanza hasta la cota 913.07

msnm y 913.39 msnm para la fosa izquierda y derecha respectivamente. En la margen izquierda existe 15.0 m de arrastre del material suelto medido desde el inicio del umbral lo que cubre parte del mismo. Se puede observar que la fosa izquierda tiene una mayor configuración que la fosa ubicada en la margen derecha, los cono de socavación se forma a 51.5 m desde el pie de la presa y la máxima profundidad del foso se encuentra ubicada a 70.5 m del pie de la presa.

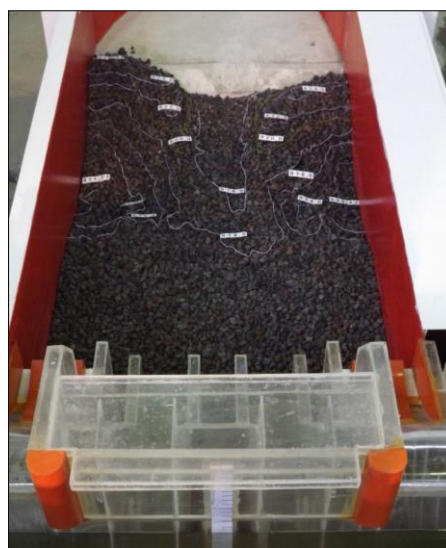
6.3.2 PRUEBA D2: $Q=1002.57 \text{ m}^3/\text{s}$

La zona de impacto de los chorros se produce cerca de las paredes del cuenco amortiguador, La disipación de energía se produce cuando el flujo turbulento en la zona de impacto entra en contacto con las paredes del cuenco. El chorro sumergido excava el material rocoso y eleva el calado hacia aguas abajo hasta formar un colchón de aguas de 11.50 m,

Fotografía No 6.2: Deflectores del diseño modificado, prueba con $1002.57 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.



(a)



(b)

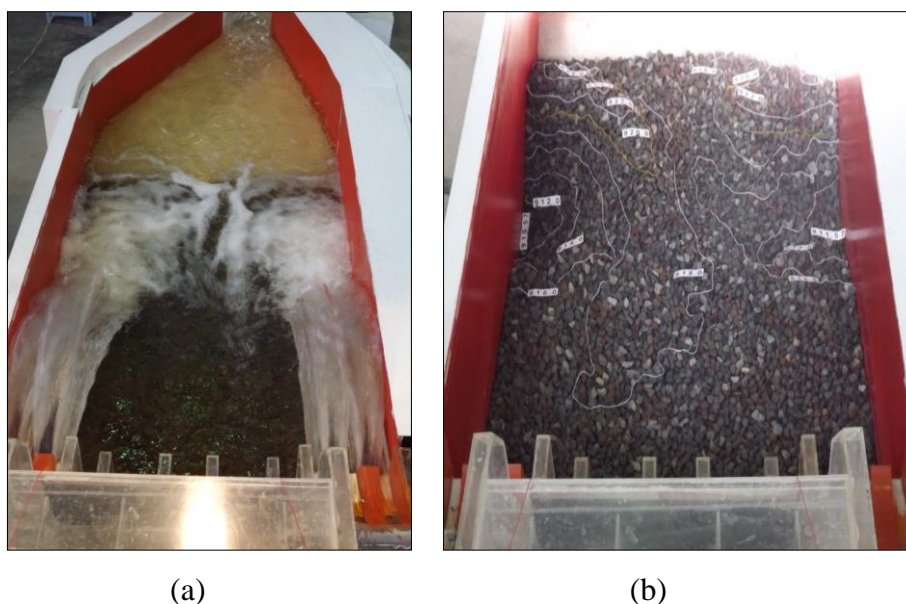
La profundidad del foso llega hasta la cota 911.71 msnm para el foso izquierdo y de 912.41 msnm para el foso derecho, la conformación de los conos se inicia aproximadamente a unos 48.0 m medido desde las obras de excedencias. Se observa que en la parte izquierda del cuenco amortiguador, el material es arrastrado unos 12 m desde el

inicio del umbral, lo cual cubre el mismo. La ubicación de los conos de socavación comprometen mucho la estabilidad de las margenes del cuenco disipador de energía.

6.3.3 PRUEBA D3: $Q=701.32 \text{ m}^3/\text{s}$

El colchón de agua en el cuenco amortiguador es 8.75 m , la forma irregular del hueco socavado genera remolinos de agua y a su vez turbulencia, el flujo de recirculación se observa en la parte central del cuenco amortiguador que luego sigue en menor cantidad hacia aguas arriba.

Fotografía No 6.3 Deflectores del diseño modificado, prueba con $701.32 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.



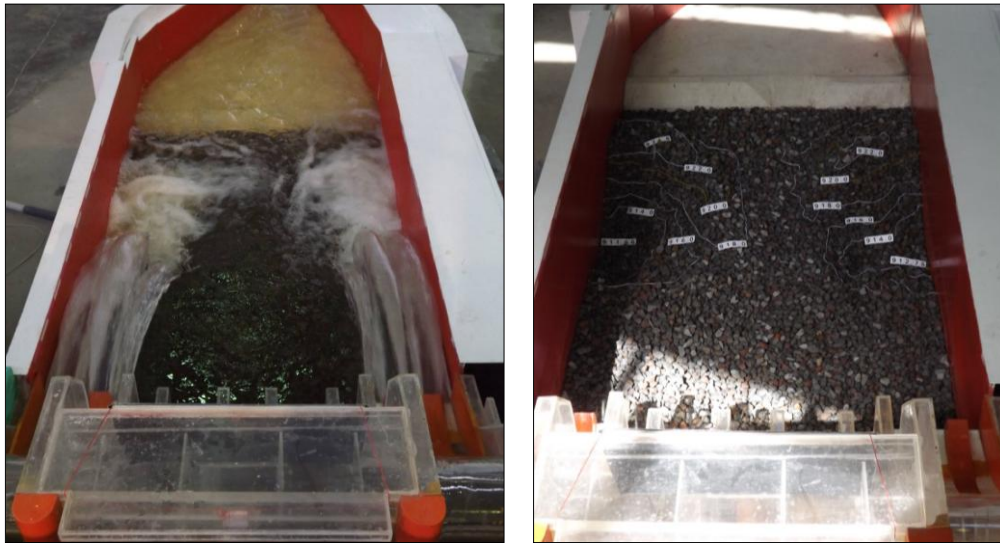
No se tiene material arrastrado fuera del cuenco de disipación de energía, en cuanto al ancho del cono de socavación se observa que no se desarrolla completamente, la profundidad del foso que se ha registrado llega hasta la cota 910.57 msnm para el cono socavado izquierdo y 911.57 msnm para el foso derecho. El punto mas profundo del foso se encuentra a 64 m medido desde el pie de la presa.

6.3.4 PRUEBA D4: $Q=499.57 \text{ m}^3/\text{s}$

La prueba inicia cuando las descargas de los vertederos impacta en el cuenco amortiguador que se encuentra seco o sea sin colchón de agua, una vez estabilizado el flujo el colchón de agua se eleva 7.60 m. medido desde el lecho original.

Fotografía No 6.4: Deflectores del diseño modificado, prueba con $499.57 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).-

Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.



(a)

(b)

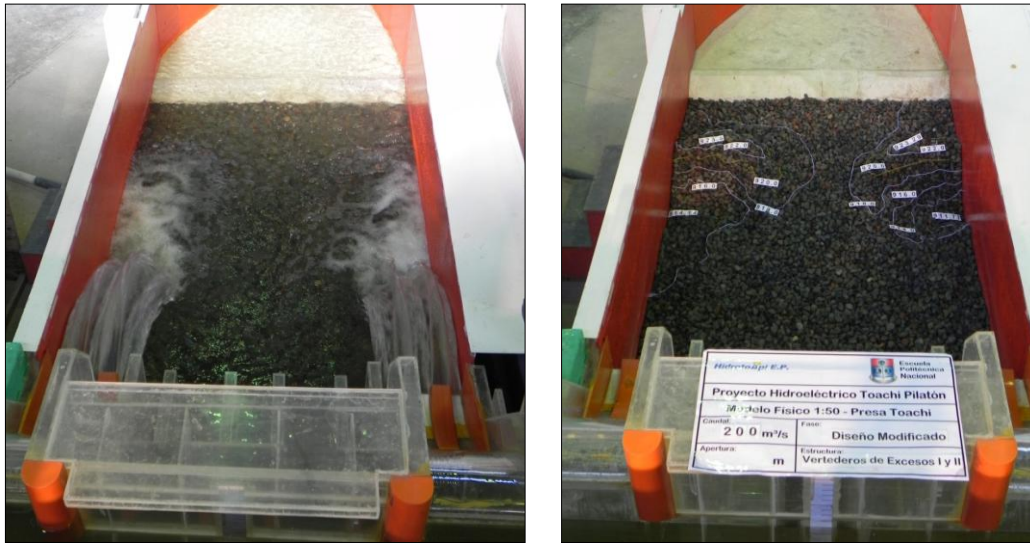
La profundidad máxima del foso avanza hasta la cota 911.66 msnm y se encuentra a una distancia de 62 m del pie de la presa, el cono socavado no se forma completamente ya que se interrumpe su desarrollo por las paredes del cuenco.

6.3.5 PRUEBA D5: $Q = 197.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

El flujo de recirculación se produce hacia el centro del cuenco amortiguador, luego de cierto tiempo la profundidad de agua en el estanque es de 5.0 m, Los puntos más profundos de los fosos se encuentran en las márgenes del estanque, por lo tanto se insiste que estos afectarían la estabilidad de los taludes, además sabiendo que en prototipo las condiciones geológicas no son aceptables.

La profundidad máxima del foso se encuentra a 65 m del pie de la presa, además el foso inicia su formación a 45.5 m del pie de las estructuras de descarga, La profundidad máxima del foso avanza hasta la cota 911.77 msnm que corresponde a la fosa derecha. En cuanto a longitud del cono este se desarrolla dentro del estanque dissipador de energía y no llegan hasta el umbral.

Fotografía No 6.5: Deflectores del diseño modificado, prueba con $197.89 \text{ m}^3/\text{s}$. (a).- Descarga de los vertederos. (b).- Fosos socavados.



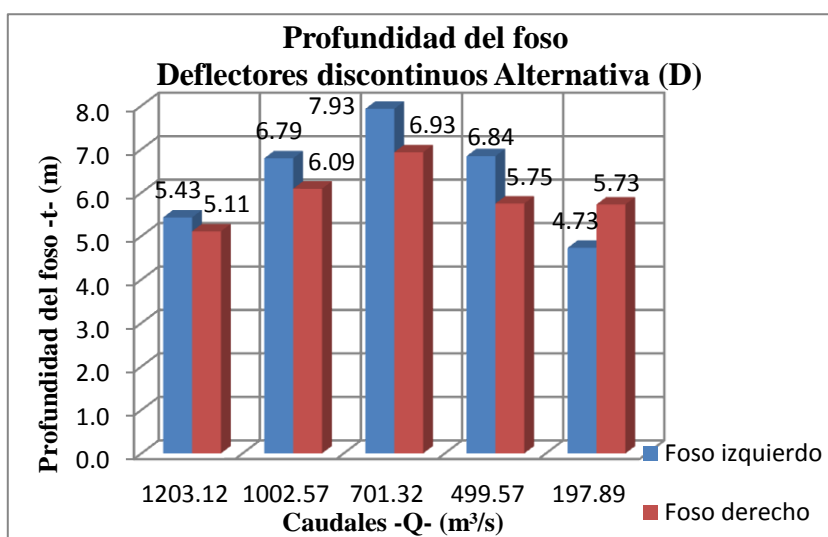
(a)

(b)

6.4 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS RESULTADOS.

En las pruebas del escenario No 2 en donde se operan los dos vertederos de excesos y se redujo el ancho del cuenco amortiguador la conformación de los conos de socavación se interrumpe por la presencia de las paredes laterales que representan los taludes naturales del cuenco de disipación, es por ello que la longitud y el ancho del foso son inciertos, pero en forma referencial se indica en la tabla No 6.5 valores de longitud y ancho medidos en los perfiles longitudinales y transversales realizados con los datos del levantamiento de los fosos para cada uno de los caudales indicados. En la gráfica No 6.2 se muestra las profundidades de socavación, cabe señalar que estas se produjeron junto a las paredes del cuenco amortiguador, como estas pruebas se realizaron en las mismas condiciones o sea se realizó la apertura de las clapetas en la cota 970 msnm, entonces los chorros caen en la zona de impacto con una similar potencia hasta equilibrarse con el caudal del ensayo, es por ello que en los primeros minutos la socavación queda definida por la condición del ensayo y la variación de profundidad de socavación que se observa para los diferentes caudales de prueba es debido al colchón de agua que se genera y la potencia del chorro.

Gráfico No 6.2: Profundidades experimentales del foso socavado, escenario N° 2.



6.5 DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. ESCENARIO N° 2

Los datos necesarios para el cálculo de las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.19 se indican en la tabla No 6.6.

Tabla No 6.6: Parámetros para el cálculo de la profundidad del foso.

Alternativa	Caudal	Ancho	Caudal unitario	Δ	Calado en cuenco	Δ
	Q	b	q	z_2	h_2	h
	m³/s	m	(m³/s)/m	m	m	m
D ₁	601.56	13.25	45.4	32.78	12.50	38.70
D ₂	501.29	13.25	37.8	32.08	11.50	39.00
D ₃	350.66	13.25	26.5	30.78	8.75	40.45
D ₄	249.79	13.25	18.9	29.58	7.60	40.40
D ₅	98.95	13.25	7.5	28.08	5.00	41.50

La operación de los dos vertederos de excesos muestra una disminución en la profundidad de socavación respecto a la operación de solo el vertedero derecho, esto se debe a que el colchón de agua se incrementa, además el chorro cae cerca de las paredes del cuenco amortiguador por ello parte de la energía se disipa en estas paredes.

Para el caudal de 1203.01 m³/s la ecuación de Soloveva se acerca al valor observado, la diferencia está alrededor del 2.48 %, Para el caudal de 1002.60 m³/s la ecuación de Chian Min Wu se acerca al valor observado, la diferencia está alrededor del 0.76 %, finalmente para los caudales de 701.3 m³/s, 499.6 m³/s y 197.9 m³/s la ecuación que más se acerca a los valores observados es la de Damle con una diferencia porcentual del 5.74 %, 5.77 %, 2.82 % respectivamente.

Tabla No 6.7: Comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

RESUMEN DE PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN EXPERIMENTALES Y CALCULADAS						
ALTERNATIVA		D1	D2	D3	D4	D5
Caudal	(m ³ /s)	1203.1	1002.6	701.3	499.6	197.9
Profundidad Experimental	(m)	17.77	17.94	16.18	13.9	10.23
Damle (t+h2)	Calculada	21.77	20.07	17.11	14.70	9.94
	Diferencia Porcentual (%)	22.52	11.86	5.74	5.77	2.82
Veronese (t+h2)	Calculada	23.02	21.25	18.38	15.57	9.81
	Diferencia Porcentual (%)	29.53	18.43	13.59	12.00	4.11
Martins (t+h2)	Calculada	20.98	18.77	15.08	12.26	7.00
	Diferencia Porcentual (%)	18.09	4.62	6.77	11.82	31.61
Chian Min Wu (t+h2)	Calculada	19.50	17.80	14.96	12.58	7.90
	Diferencia Porcentual (%)	9.75	0.76	7.51	9.47	22.81
Mason (t+h2)	Calculada	28.52	25.26	19.60	15.66	8.45
	Diferencia Porcentual (%)	60.52	40.80	21.15	12.64	17.43
Soloveva (t+h2)	Calculada	17.33	16.23	13.56	11.92	6.54
	Diferencia Porcentual (%)	2.48	9.51	16.17	14.24	36.08

Las formulaciones consideradas evalúan la profundidad de erosión relativa a condiciones estacionarias, es decir referente a un caudal de descarga constante a lo largo de un intervalo de tiempo bastante amplio para que el fenómeno erosivo, pueda alcanzar el estado de equilibrio. Sin embargo, con respecto al tiempo total de operación de la obra, las obras de descarga son solicitadas por crecidas extremas sólo por intervalos de tiempo limitados, durante los cuales el fenómeno erosivo no tiene la posibilidad de desarrollarse

completamente y alcanzar la situación de equilibrio para la profundidad de erosión calculada con las fórmulas empíricas antedichas.

6.6 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES ADIMENSIONALES.

En el desarrollo de la investigación, y sobre la base del análisis dimensional ejecutado para alcanzar el objetivo del estudio experimental, la verificación cualitativa y relativa de la eficiencia de los deflectores discontinuos se lleva a cabo mediante la comparación de la forma y del desarrollo del foso socavado que se origina al pie de la presa Toachi.

Por lo tanto se analiza que variables caracterizan la profundidad del foso socavado, donde se establece la correlación que existe entre las variables.

6.6.1 PROFUNDIDAD ADIMENSIONAL DEL FOSO.

La variable de estudio es la profundidad del foso, por tanto, una de las variables adimensionales tendrá que ser el cociente entre la profundidad del foso (t) y una variable o combinación de variables que tenga unidades de longitud. En las pruebas realizadas se ha tomado mediciones, de calado en el cuenco amortiguador (h_2), altura desde el nivel de carga del embalse hasta el nivel de restitución (h) además que se conoce el diámetro medio del material pétreo (D_{50}), estas son variables que podemos utilizar para realizar la adimensionalización de la profundidad del foso. A esta variable se denominará profundidad adimensional del foso y la representaremos como se indica a continuación.

$$t_1 = \frac{t_n}{h_2} \quad (6.1)$$

$$t_2 = \frac{t_n}{D_{50}} \quad (6.2)$$

La otra variable adimensional que produce el mejor ajuste es el caudal unitario adimensional q^* , que se calcula según la ecuación 5.3, donde q es el caudal unitario a la salida de la estructura de caída, g es la aceleración de la gravedad y h es una variable que presenta unidades de longitud. La utilización del caudal unitario como variable frente el caudal total del ensayo se debe a que se puede utilizar para otras estructuras con diferentes dimensiones a las ensayadas en el laboratorio, siempre manteniendo la tipología de estructura que genera la caída de agua, haciendo que la expresión sea más general.

$$q^* = \frac{q}{g^{0.5} h^{1.5}} \quad (6.3)$$

La variable h corresponde a calados medidos, diferencias de cotas, fuerzas y energías específicas expresadas en unidades de longitud.

$$h = \Delta z + h_o + \frac{V^2}{2g} \quad (6.4)$$

En donde, Δz es la diferencia de cota entre la superficie del colchón de agua y el borde de salida del deflector, h_o es el calado sobre el deflector, g es la gravedad y V es la velocidad del agua a salida del deflector. Aprovechando las pruebas que hemos realizado en el cuenco amortiguador con material no cohesivo, obtendremos las fórmulas que nos aproximen a la profundidad de nuestro foso para la salida en esquí con deflectores discontinuos y contracción lateral.

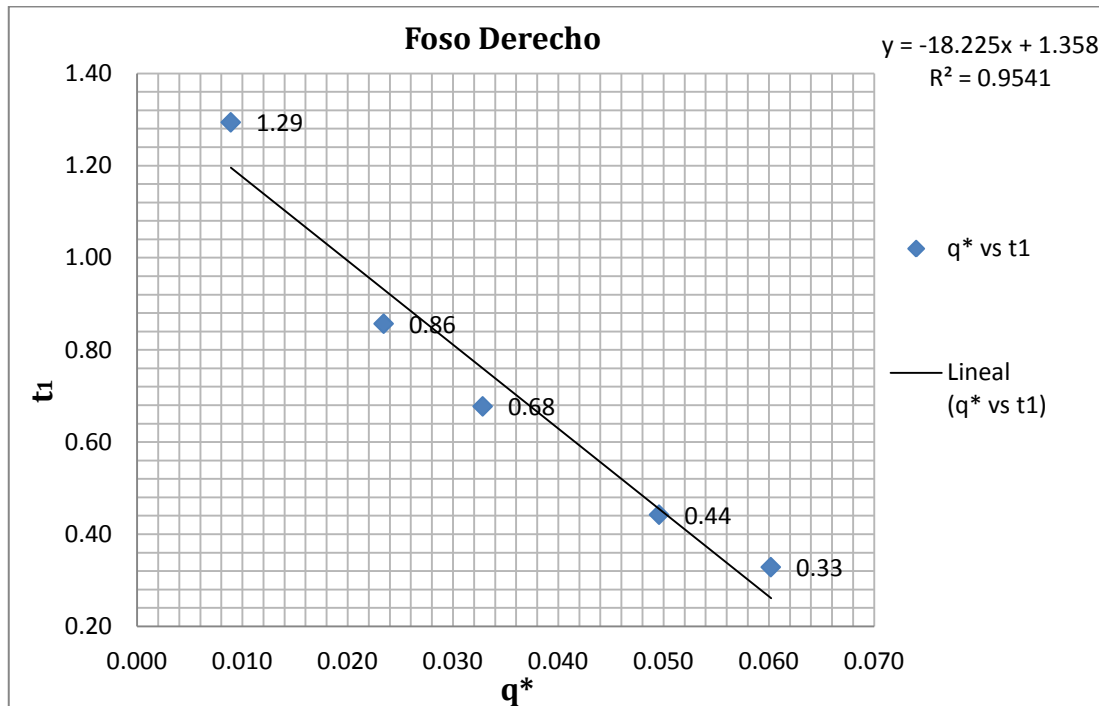
En el gráfico No 6.3 podemos ver el ajuste con las variables adimensionales descritas para el foso socavado derecho. Vemos en la figura como el caudal unitario adimensional y la profundidad adimensional se relacionan de forma lineal, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.95, lo que indica un buen ajuste. La ecuación 5.5 muestra la expresión del ajuste lineal realizado.

$$t_1 = -18.225 q^* + 1.358 \quad (6.5)$$

Sustituyendo las variables adimensionales de la ecuación 5.5 por sus respectivas expresiones tenemos.

$$\frac{t_d}{h_2} = -18.225 \frac{q}{g^{0.5} h^{1.5}} + 1.358 \quad (6.6)$$

Gráfico No 6.3: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso derecho adimensional (t_d/h_2)



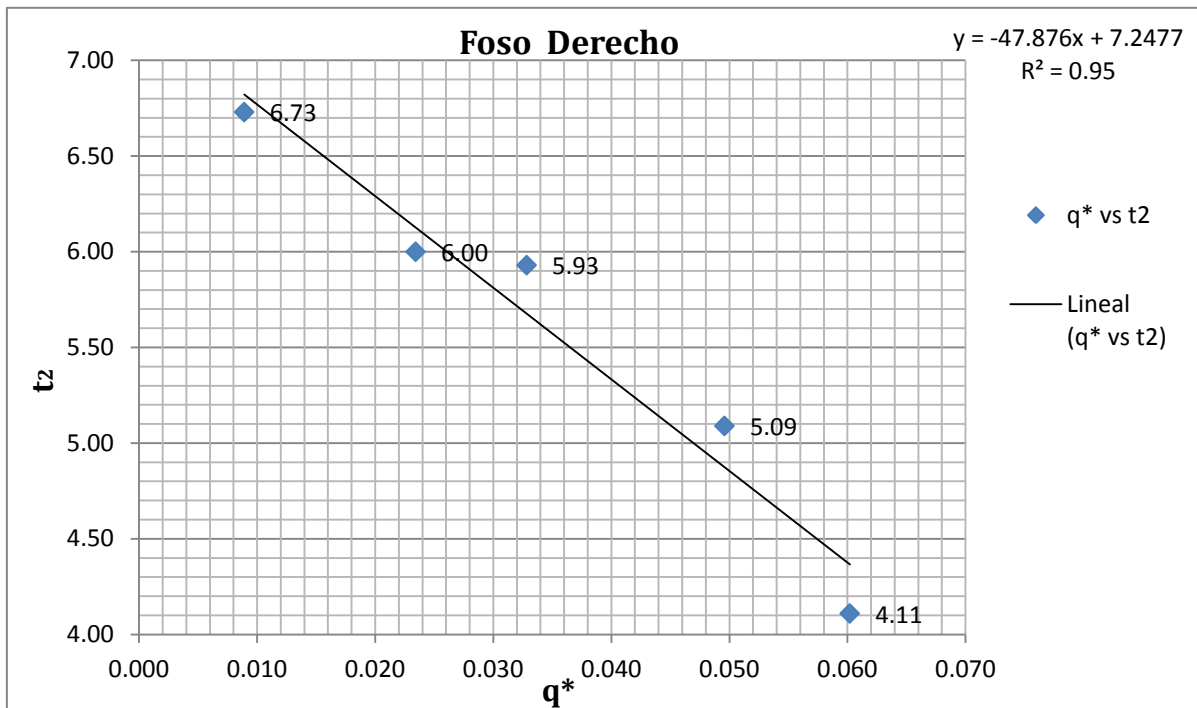
En el gráfico No 6.4 se realiza la adimensionalización descrita de la profundidad del foso derecho con el diámetro medio del material pétreo. Vemos en la figura como el caudal unitario adimensional y la profundidad adimensional se relacionan de forma lineal, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.95, lo que indica un buen ajuste. La ecuación 5.7 muestra la expresión del ajuste lineal realizado.

$$t_2 = -47.876 q^* + 7.2477 \quad (6.7)$$

Sustituyendo las variables adimensionales de la ecuación 5.7 por sus respectivas expresiones tenemos.

$$\frac{t_d}{D_{50}} = -47.876 \frac{q}{g^{0.5} h^{1.5}} + 7.2477 \quad (6.8)$$

Gráfico No 6.4: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso derecho adimensional (t_d/D_{50}).



En las ecuaciones 5.6 y 5.8, que son una función racional que nos determina la relación que existe entre la altura desde el nivel del embalse hasta la restitución en el río y la profundidad del foso. En estas ecuaciones vemos como la profundidad del foso es inversamente proporcional a la altura desde el nivel de carga del embalse hasta el nivel de restitución.

Cualquiera de las dos variables adimensionales utilizadas nos proporcionan buenos ajustes, pudiendo utilizar cualquiera de las dos para el diseño.

En el gráfico No 6.5 podemos ver el ajuste con las variables adimensionales descritas para el foso de socavación izquierdo. La relación entre las variables es lineal, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.96, La ecuación 5.9 muestra la expresión del ajuste lineal realizado.

$$t_1 = -5.216 q^* + 0.8772 \quad (6.9)$$

Sustituyendo las variables adimensionales de la ecuación 5.9 por sus respectivas expresiones tenemos.

$$\frac{t_i}{h_2} = -5.216 \frac{q}{g^{0.5} h^{1.5}} + 0.8772 \quad (6.10)$$

En el gráfico No 6.6 se realiza la adimensionalización de la profundidad del foso derecho con el diámetro medio del material pétreo. Vemos en la figura como el caudal unitario adimensional y la profundidad adimensional se relacionan de forma logarítmica, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.91. La ecuación 5.11 muestra la expresión del ajuste logarítmico realizado.

$$t_2 = 1.7313 \ln(q^*) + 12.106 \quad (6.11)$$

Sustituyendo las variables adimensionales de la ecuación 5.11 por sus respectivas expresiones tenemos.

$$\frac{t_i}{D_{50}} = 1.7313 \ln\left(\frac{q}{g^{0.5} h^{1.5}}\right) + 12.106 \quad (6.12)$$

Gráfico No 6.5: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso izquierdo adimensional (t_i/h_2)

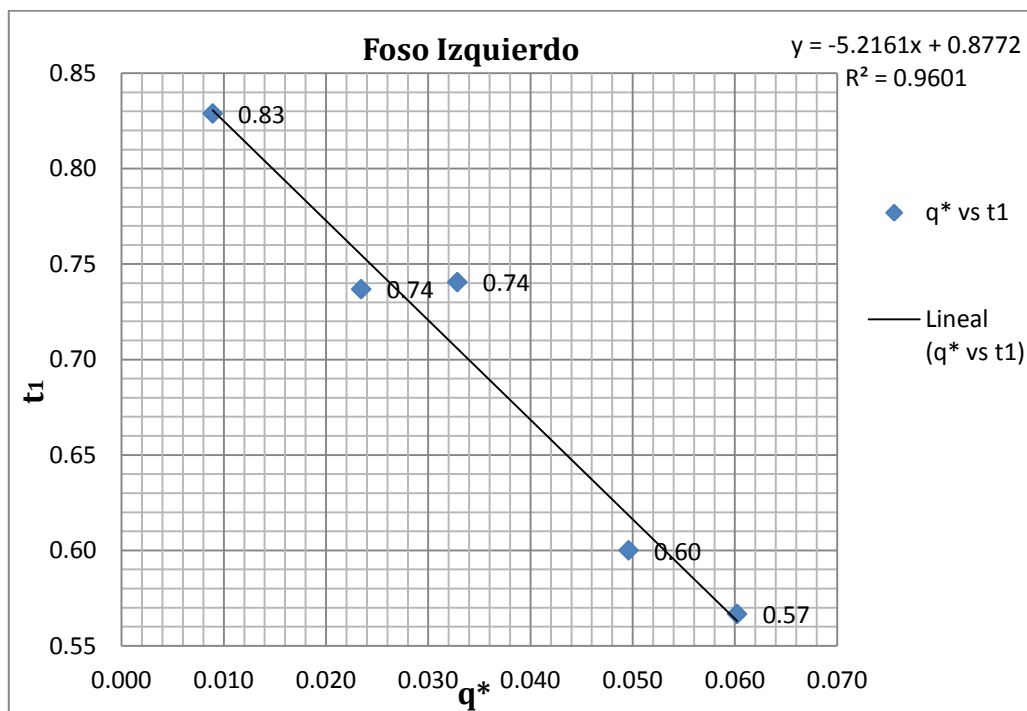
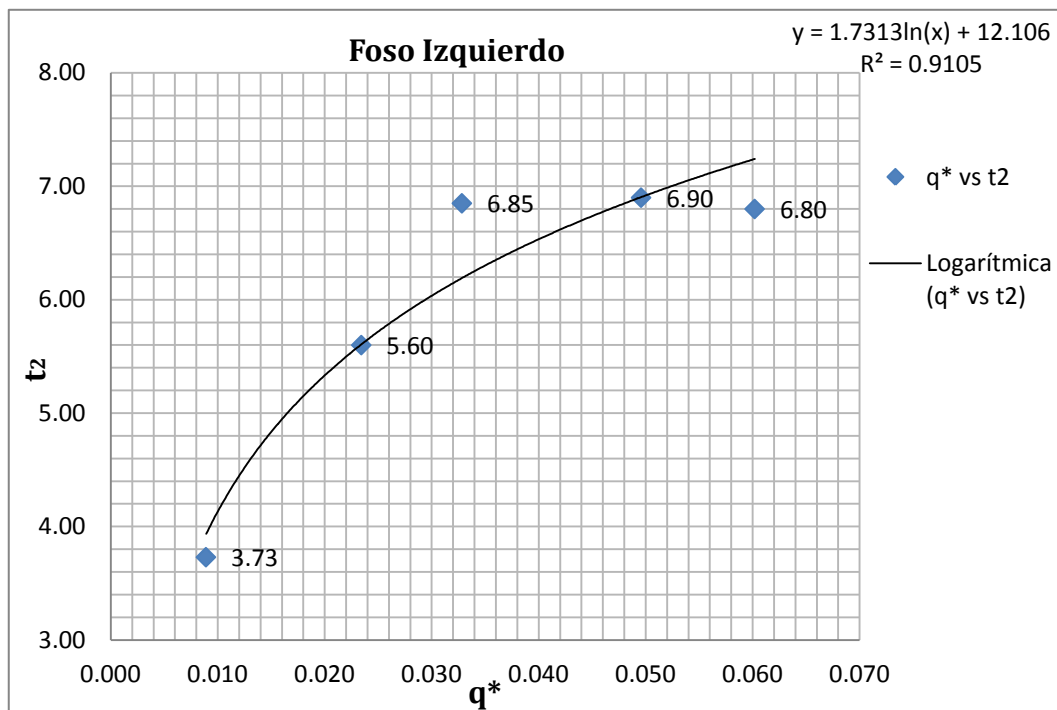


Gráfico No 6.6: Caudal unitario adimensional (q^*) vs profundidad del foso izquierdo adimensional (t_i/D_{50})



De esta manera se analiza y se ajusta los resultados experimentales a una función, la misma que es propuesta como representativa del fenómeno físico.

Las curvas realizadas en los gráficos No 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 se efectuaron con valores obtenidos mediante un análisis de sensibilidad en donde se varió algunos valores de las variables dentro de un rango, teniendo en consideración que se pudo haber cometido errores durante las mediciones. En cuanto al valor de la profundidad de socavación experimental se admite un error de $\pm 2\text{cm}$ ya que este es el diámetro medio del material en el modelo de investigación.

6.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEFINITIVO DEL CUENCO.

6.7.1 CONCLUSIONES

- Se concluye que se tiene una mayor profundidad del foso socavado cuando se opera con un solo vertedero, esto se debe a que existe una menor profundidad del colchón de agua, mientras que si se opera con los dos vertederos de excesos, el caudal que entra al cuenco es mayor por ello se obtiene un mayor colchón de agua que disipa mayor energía, produciendo una menor socavación.
- Cualitativamente se analizó el foso socavado y resulta que la forma y ubicación del mismo se aleja del pie de la presa lo que no afectaría la estabilidad de esta estructura.
- El chorro impacta muy cerca de las márgenes del cuenco amortiguador, estas márgenes impiden el normal desarrollo del foso, en las pruebas realizadas en el modelo se observa que la mayor profundidad del foso se desarrolla cerca de las márgenes del cuenco, por lo tanto el proceso de socavación afectaría la estabilidad de las márgenes.
- Para caudales semejantes a $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ el umbral queda cubierto en un 30%, mientras que para caudales menores el foso longitudinalmente se desarrolla dentro del estanque disipador de energía.
- Los parámetros adimensionales son útiles desde el punto de vista del diseño de la estructura hidráulica, ya que nos permite conocer la tendencia que tiene la profundidad del foso para diferentes caudales, obteniendo así una primera idea de la intensidad de las zonas locales de socavación.
- El estudio experimental nos proporciona un análisis cuantitativo del foso socavado generado por efecto de los chorros descargados desde el salto en esquí con deflectores, y con esta información se puede alcanzar bases que nos permitan realizar un diseño hidráulico óptimo, logrando conseguir una adecuada restitución del agua al río sin tener riesgos de erosión en las márgenes del río ni en las obras complementarias de la presa.

6.7.2 RECOMENDACIONES

- En vista que los fosos socavados se desarrollan dentro del cuenco amortiguador pero afectan las márgenes del cuenco y, sabiendo que no se puede aumentar el ancho del cuenco por la mala condición geológica de los taludes, se recomienda reubicar los vertederos de excesos agrupándolos hacia el eje central de la presa Toachi, con el fin de tener los fosos producto de las descargas de las obras de excedencias en el centro de cuenco amortiguador y con ello garantizar la estabilidad de los taludes.
- Para caudales de máxima crecida ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1200 \text{ m}^3/\text{s}$) descargados desde los vertederos, el umbral ubicado al final del cuenco preexcavado queda cubierto de material que es arrastrado durante el proceso de socavación pudiendo esto afectar su estabilidad, es por ello que se recomienda incrementar la longitud del cuenco amortiguador al menos 20 m adicionales a la definida en la segunda fase de investigación.
- El deflector de la alternativa “D” que reemplazó al deflector del diseño original es recomendable emplearlo en los vertederos de excesos ya que estos cumplen satisfactoriamente la condición de chorro aireado que es primordial para conseguir que la socavación produzca menor efecto al cuenco preexcavado con fondo móvil.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS ALTERNATIVAS.

- Para los cinco tipos de deflectores se observa que la socavación en el cuenco amortiguador está alejada de la presa Toachi garantizando así su estabilidad.
- La forma del chorro para cada uno de los cinco deflectores dan una configuración particular al foso socavado en el cuenco amortiguador.
- Los deflectores dentados (diseño original), produce un chorro que al impactar en el cuenco amortiguador produce un foso menos profundo que con las demás alternativas, pero si trazamos una línea imaginaria por el ancho del diseño original del cuenco amortiguador la socavación afecta la margen derecha del cuenco.
- Las paredes convergentes sobre el esquí (alternativa “A” y “A-1”), provocan una gran socavación afectando la margen derecha del cuenco además arrastra el material y lo deposita sobre el umbral y parte de la transición, estas alternativas no dispone de una estructura que desintegre al chorro en la salida del esquí.
- De la descarga por el deflector de altura variable (alternativa “B”), se observa que la socavación se forma cerca del centro del cuenco amortiguador, y al trazando una línea imaginaria por el ancho del diseño original del cuenco amortiguador demuestra que la configuración del foso afectaría muy poco a las márgenes del mismo.
- El deflector peraltado (alternativa “C”) genera la socavación muy cerca del centro del cuenco, además la configuración del foso no afecta a la margen derecha del cuenco amortiguador y teniendo en cuenta el ancho original del cuenco, la socavación afecta muy poco la margen, pero se tiene acumulación de material sobre el umbral y en la parte de la transición.
- El deflector discontinuo y contracción (alternativa “D”) acumula el material sobre el umbral. Con la contracción que presenta en el esquí no se logra ubicar el foso

socavado al centro del cuenco, porque la contracción es muy reducida, por esta razón la socavación afecta la margen derecha del cuenco disipador de energía.

- Se ha podido comprobar que la estructura del flujo está íntimamente relacionada con la geometría del foso de socavación que se va formando, o sea las características del flujo serán diferentes según el estado de desarrollo del cuenco socavado.

7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO DE TITULACIÓN.

- El desarrollo longitudinal de la socavación del foso se encuentra controlado por la presencia del umbral, el mismo que puede incrementar las fluctuaciones de presión y puede concentrar energía turbulenta alrededor de las estructuras cercanas, tendiendo a desplazar las rocas de su emplazamiento original, sin posibilidad de que regresen a su sitio y avancen hasta el estrechamiento previsto en la zona de aguas abajo del cuenco amortiguador.
- La zona más profunda de los fosos socavados producto de las descargas de los vertederos de excesos se producen muy cerca de las márgenes del cuenco previsto como disipador de energía, esto confirma que el proceso de socavación afecta la estabilidad de las márgenes.
- En el cuenco amortiguador no se tiene recirculaciones fuertes de flujo debido a que al tener un cuenco estrecho este produce un colchón de aguas lo suficiente y esta condición garantiza una buena restitución del flujo al cauce natural.
- Se concluye que la longitud del cuenco disipador de energía es insuficiente debido a que el foso socavado se desarrolla hasta cubrir parte del umbral esto se observa para la descarga de caudales mayores a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La ubicación de los fosos socavados se encuentra muy alejado de la presa Toachi, por ello no causa ninguna afectación a la estabilidad de las estructuras de descarga que componen la presa.
- La disposición asimétrica de la presa respecto al cuenco amortiguador produce socavaciones más profundas en la margen izquierda que en la derecha del cuenco, sin dejar de insistir que los fosos afectan los taludes del cuenco.

7.3 RECOMENDACIONES.

- Se debe operar simultáneamente los dos vertederos de excesos ya que con la operación de un sólo vertedero se produce mayor profundidad de socavación.
- Se recomienda incrementar por lo menos 20 m la longitud del cuenco amortiguador con el fin de evitar la acumulación del material sobre el umbral porque puede causar daños.
- Debido a que no se puede ensanchar el cuenco amortiguador se recomienda ubicar las estructuras de descarga junto al eje de la presa para que las socavaciones se produzcan dentro del cuenco sin afectar los taludes laterales.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

$r_{\text{mín}}$ = Radio mínimo de curvatura del esquí.

ρ = Densidad del agua.

V_1 = Velocidad del flujo.

h_1 = Profundidad de circulación a la entrada del salto en esquí (final de la rápida)

P_T = Unidad de carga específica en la solera del esquí.

γ = Peso específico del agua.

γ_s = Peso específico del material pétreo (ripió)

$h_{\text{mín}}$ = Altura mínima de la cresta del esquí.

s = Pendiente de la rápida del vertedero.

α = Ángulo de despegue del chorro a la salida del esquí o deflector.

α' = Ángulo con que impacta en el colchón de agua.

h_e = Altura de velocidad en el labio del esquí.

z_3 = Es el desnivel que existe desde la cresta del esquí hasta el nivel aguas abajo del impacto del chorro.

x = Alcance experimental del chorro descarga.

V_o = Velocidad de despegue del chorro en la salida en el esquí.

h_M = Altura máxima de elevación del chorro.

F_o = Número de froude

h_o = Profundidad de agua en el esquí o deflector.

g = Aceleración de la gravedad.

L_o = Alcance máximo teórico del chorro de descarga.

L_1 = Alcance máximo teórico del chorro considerando la resistencia del aire.

T_0 = Profundidad de disturbio del chorro.

q = Caudal unitario.

V = Velocidad del chorro en punto de impacto.

b_0 = Espesor teórico del chorro.

b_1 = Espesor del chorro incluye la aireación.

J = Coeficiente de Reynolds.

Re = Número de Reynolds en el esquí.

We = Número de Weber.

t = Profundidad del foso.

h_2 = Profundidad de agua en el cuenco amortiguador.

z_2 = Altura desde el nivel del embalse hasta el nivel labio del esquí.

h = Altura desde el nivel de carga del embalse hasta el nivel de restitución.

β = Volumen de aire con relación al agua.

d_m = Diámetro del tamaño medio del material pétreo no cohesivo.

L_{vc} = Distancia horizontal desde la presa (salto en esquí) hasta que se produce la mayor profundidad de la fosa de socavación.

L_v = Distancia horizontal desde la presa (salto en esquí) hasta el impacto de chorro en la superficie de agua en el cuenco amortiguador.

$t_0 = t + h_2$ = Profundidad de socavación del chorro.

P = Altura medida desde la salida del salto en esquí hasta la superficie de agua aguas abajo en el cuenco amortiguador.

m_s = Valores de talud de reposo en el foso.

m_c = Línea de recta de pendientes del foso.

e_v = Escala de velocidad.

e_L = Escala de longitud.

e_T = Escala de tiempo.

L_p = Longitud en prototipo.

L_m = Longitud en modelo.

Q_p = Caudal en prototipo.

Q_m = Caudal en modelo.

I = Pendiente hidráulica.

f = Coeficiente de fricción.

V = Velocidad del flujo.

g = Aceleración de la gravedad.

D = Longitud característica.

e_I = Escala de pendiente hidráulica.

e_f = Escala de coeficiente de fricción.

Fo_p = Número de froude en prototipo.

Fo_m = Número de froude en modelo.

b = Ancho del descarga desde el vertedero.

$t_1; t_2$ = Profundidad adimensional del foso.

q^* = Caudal unitario adimensional.

L = Longitud del foso.

A = Ancho del foso.

BIBLIOGRAFÍA

1. ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. “Informe técnico fase I”, EPN. Quito, Noviembre 2011. 98 p.
2. ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. “Informe técnico fase II”, EPN. Quito, Enero 2012. 62 p.
3. MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI. “Análisis experimental de la modificación en los deflectores del salto en esquí, Informe técnico fase III”. EPN. julio 2012. 38 p.
4. VISCHER, D.L., HAGER, W.H., “Dam hydraulics”. Switzerland. John Wiley & Sons. 1998. 304 p.
5. BERKER YALIN, Imamoglu. “Scour at downstream of flip buckets and roller bucket type energy dissipators”. CE 573 Fundamentals of River Engineering Spring Term. 2008. 37 p.
6. HELLER Valentin, HAGER William H., F.ASCE, and HANS-ERWIN Minor. “Ski Jump Hydraulics.” Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 5. 2005. 347-355 p.
7. ELEVATORSKI, E.A. “Hydraulic, Energy dissipators.” 1959.
8. CASTRO, D., Marco “Introducción a la Hidráulica de ríos” 199 p
9. CASTILLO, L, PUERTAS, J., DOLZ, J., “Análisis conjunto de las formulaciones de socavación y presión dinámica media al pie de presas.” 12 p.
10. KHATSURIA, R., M. “Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators.” New York. Marcel Dekker. 2005. 629 p.
11. PARDO-GÓMEZ, R. “Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo”. Ingeniería hidráulica en México. Abril-Junio de 2008. 111-121 p
12. WHITTAKER, J. “Scour Related to Energy Dissipators for Head Structures.” Zurich. 1984. 73 p.
13. VELASCO, C., VERA, P. “Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón”. Tesis de grado. Quito. Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 2012. 172 p.

14. ARGÜELLO, W. “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.” Tesis de Grado. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 1991. 111 p.
15. CID SOLÉ, Jordi. “Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por jet en salto de esquí” Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Tesis. 2004. 153 p.
16. CELEC EP HIDROTOAPI, Informe 6256.0-R-18 Presa Toachi – Hidráulica – Memoria de cálculo. 2010. 28 p.
17. CELEC EP HIDROTOAPI, Documentos de licitación-Información técnica general, Proyecto Hidroeléctrico Toachi- Pilatón. 2010. 36 p.
18. CELEC HIDROTOAPI, Informe 6526.0-R-16 Transporte sólido en el río Toachi y sedimentología. Diciembre 2009. 27 p.
19. HIDALGO, Marcelo. “Introducción a la teoría de los Modelos Hidráulicos y Aplicaciones básicas”. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 2007. 62 p.
20. CASTRO, Marco. “Análisis Dimensional y Modelación física en Hidráulica”. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 50 p.

ANEXOS

**ANEXOS N° 1.- CONSTRUCCIÓN DE LOS DEFLECTORES
DEL SALTO EN ESQUÍ.**

Alternativa “A”: Paredes convergentes en el esquí

Fotografía No. 1: Elaboración de la pared en acrílico, realizamos las plantillas del deflector en cartulina, para luego moldear en acrílico y obtener las paredes convergentes



Fotografía No. 2: Colocación del deflector, una vez retirados los deflectores dentados del vertedero de excesos derecho se procede a colocar las paredes sobre el esquí pegándolas con silicón.



Fotografía No. 3: Implantación de la alternativa “A” en el modelo, se colocó también una cinta métrica para medir el calado que se produce sobre el esquí.



Alternativa “A – 1”: Pared convergente en la derecha del esquí.

Fotografía No. 4: Desmontaje de la pared izquierda, de la alternativa A se procede a retirar la pared izquierda.



Fotografía No. 5: Implantación de la modificación A-1, como resultado tenemos solo la contracción en la pared derecha como se observa en la fotografía.



Alternativa “B”: Deflectores de altura variable.

Fotografía No. 6: Elaboración de los deflectores, una vez obtenidos las plantillas de los 3 deflectores, estos los pegamos en un bloque de madera, luego procedemos a cortar en la máquina cada uno de ellos.



Fotografía No. 7: Pintado de los deflectores con laca color anaranjado de secado rápido, con el fin de obtener la superficie de sus caras lisas, para un buena circulación del flujo.



Fotografía No. 8: Montaje de los tres deflectores sobre el esquí del vertedero de excesos derecho.



Alternativa “C”: Deflector peraltado.

Fotografía No. 9: La plantilla en cartulina del deflector se pega en un paralelepípedo de madera, para cortar y tener el molde en madera.



Fotografía No. 10: Para obtener unas superficies lisas en el deflector se coloca macilla para su posterior lijado luego pintamos el deflector con laca color anaranjado de secado rápido.



Fotografía No. 11: Implantación del deflector peraltado colocado sobre el esquí.



Alternativa “D”: Deflector discontinuo y contracción lateral.

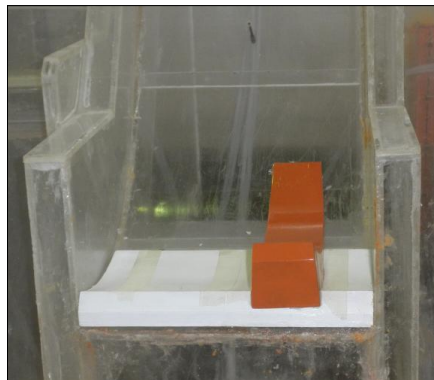
Fotografía No. 12: Elaboración en madera del esquí, en esta modificación se construye un esquí falso de $R=0.24\text{ m}$ ($R=12\text{m}$) de madera.



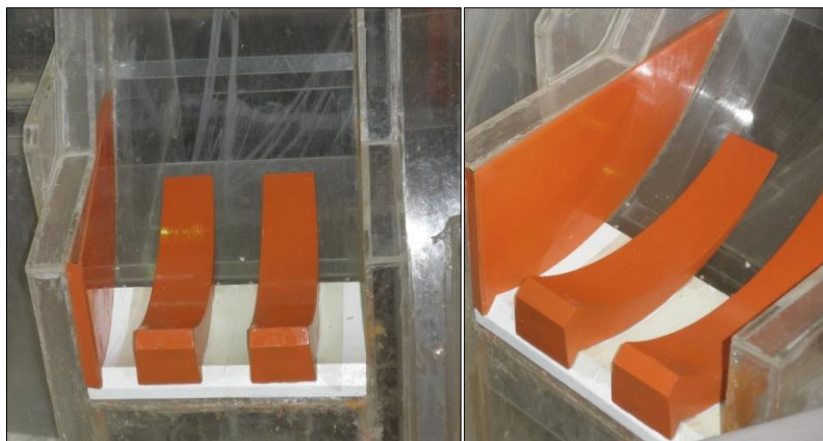
Fotografía No. 13: Colocación de las plantillas de los deflectores en la madera para su posterior recorte, para obtener unas superficies lisas en las paredes del deflector y en el esquí falso se coloca macilla para su posterior lijado, luego pintamos el deflector con laca color anaranjado de secado rápido.



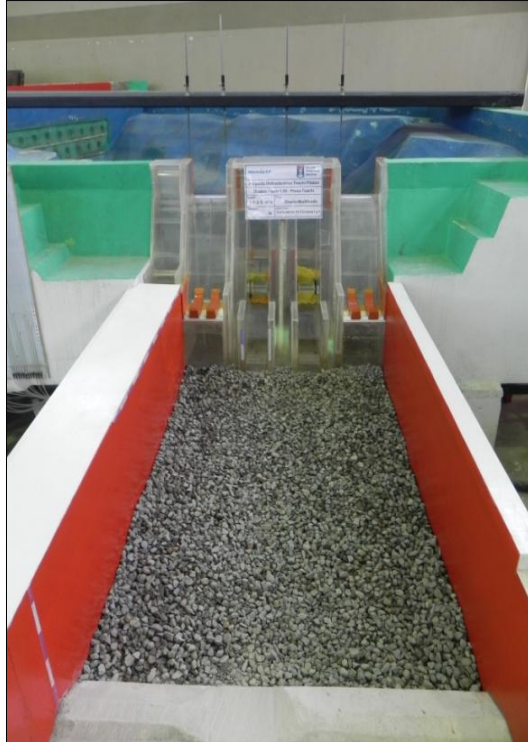
Fotografía No. 14: La pared de contracción se la elabora en acrílico de 4mm, se instala con precisión los deflectores y la contracción lateral.



Fotografía No. 15: Implantación de la modificación “D” en el vertedero de excesos derecho.



Fotografía No. 16: Se instaló la pared falsa, que se utiliza para representar el contorno del estanque disipador de energía con su geometría inicial en la primera fase de la investigación. Esta geometría del cuenco permanece invariable durante todas las pruebas que se reportan en el escenario N° 2.



**ANEXOS N° 2.- REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS
PRUEBAS DEL ESCENARIO 1 Y ESCENARIO 2.**

ESCENARIO 1

DEFLECTORES DENTADOS (Alternativa "O")

Las pruebas en el vertedero de excesos derecho con deflectores del diseño original se indican a continuación.

Fotografía No. 1: Vista desde aguas abajo de la descarga del chorro en el cuenco amortiguador y la zona de recirculación

(a) Caudal 398.0 m³/s

(b) Caudal 594.78 m³/s



Fotografía No. 2: Vista lateral de la trayectoria del chorro y su impacto en el colchón de agua del cuenco disipador de energía.

(a) Caudal 398.0 m³/s

(b) Caudal 594.78 m³/s



Fotografía No. 3: Vista superior de la descarga del vertedero y la forma del chorro que se genera.

(a) Caudal 398.0 m³/s



(b) Caudal 594.78 m³/s



PAREDES CONVERGENTES EN EL ESQUÍ (Alternativa “A”)

Las pruebas en el vertedero de excesos derecho con esta modificación, se indican a continuación.

Fotografía No. 4: Vista desde aguas abajo de la descarga del chorro en el cuenco amortiguador y la zona de recirculación

(a) Caudal 397.0 m³/s



(b) Caudal 605.4 m³/s

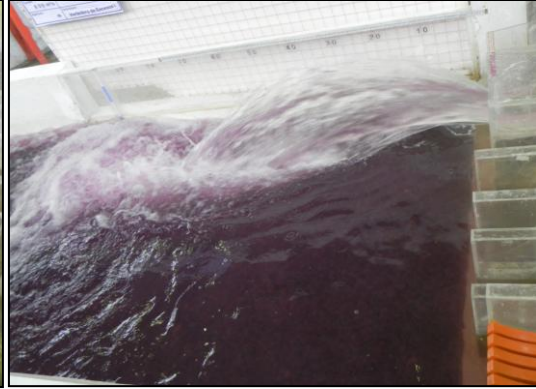


Fotografía No. 5: Vista lateral de la trayectoria del chorro y su impacto en el colchón de agua del cuenco disipador de energía.

(a) Caudal $397.0 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Caudal $605.4 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía No. 6: Vista superior de la descarga del vertedero y la forma del chorro que se genera.

(a) Caudal $397.0 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Caudal $605.4 \text{ m}^3/\text{s}$



CONTRACCIÓN A LA DERECHA EN EL ESQUÍ (Alternativa “A-1”)

Las pruebas en el vertedero de excesos derecho, para el caudal de $606.1 \text{ m}^3/\text{s}$, se indican a continuación.

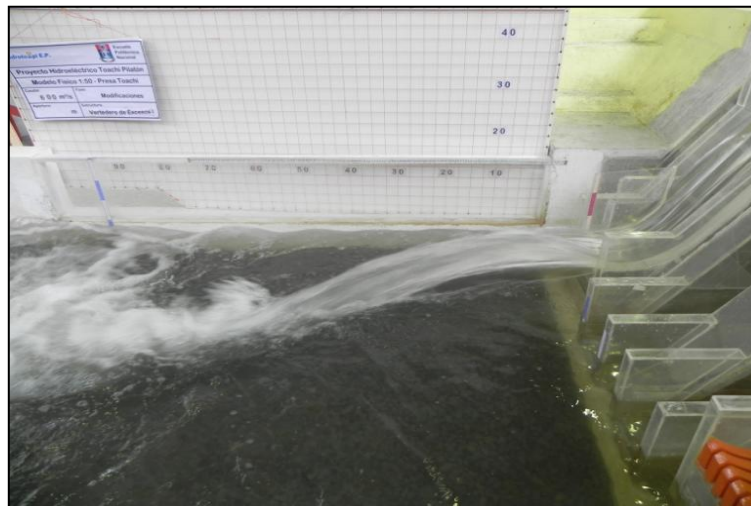
Fotografía No. 7: Vista desde aguas abajo de la descarga del chorro en el cuenco amortiguador y la zona de recirculación

(a) Caudal $606.1 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía No. 8: Vista lateral de la trayectoria del chorro y su impacto en el colchón de agua del cuenco dissipador de energía.

(a) Caudal $606.1 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía No. 9: Vista superior de la descarga del vertedero y la forma del chorro que se genera.

(a) Caudal $606.1 \text{ m}^3/\text{s}$



DEFLECTORES DE ALTURA VARIABLE EN EL ESQUÍ (Alternativa “B”)

En las siguientes fotografías se indica la forma del chorro descargado.

Fotografía No. 10: Vista desde aguas abajo de la descarga del chorro en el cuenco amortiguador y la zona de recirculación

(a) Caudal $403.3 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Caudal $606.0 \text{ m}^3/\text{s}$

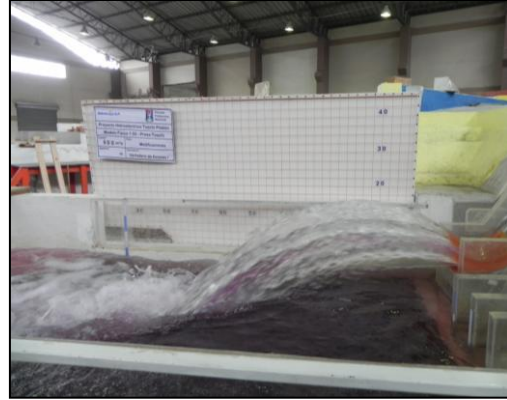


Fotografía No. 11: Vista lateral de la trayectoria del chorro y su impacto en el colchón de agua del cuenco disipador de energía.

(a) Caudal $403.3 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Caudal $606.0 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía No. 12: Vista superior de la descarga del vertedero y la forma del chorro que se genera.

(a) Caudal $403.3 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Caudal $606.0 \text{ m}^3/\text{s}$



DEFLECTOR PERALTADO (Alternativa "C")

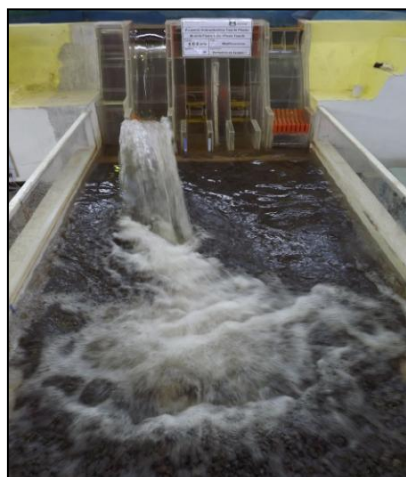
Las pruebas en el vertedero de excesos derecho con esta modificación, se indican a continuación.

Fotografía No. 13: Vista desde aguas abajo de la descarga del chorro en el cuenco amortiguador y la zona de recirculación

(a) Caudal 402.8 m³/s



(b) Caudal 600.8 m³/s



Fotografía No. 14: Vista lateral de la trayectoria del chorro y su impacto en el colchón de agua del cuenco disipador de energía.

(a) Caudal 402.8 m³/s



(b) Caudal 600.8 m³/s

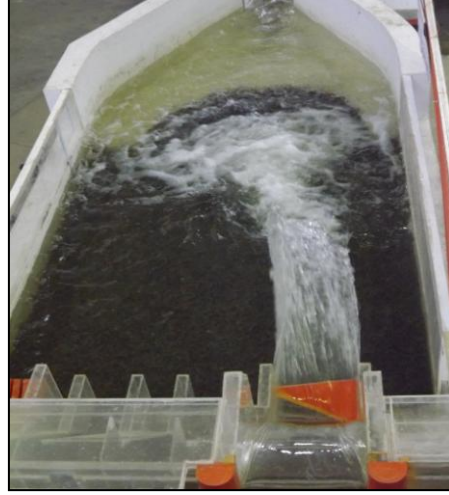


Fotografía No. 15: Vista superior de la descarga del vertedero y la forma del chorro que se genera.

(a) Caudal 402.8 m³/s



(b) Caudal 600.8 m³/s



DEFLECTOR DISCONTINUO Y CONTRACCIÓN (Alternativa “D”)

Este tipo de deflectores son los que remplazaron a los deflectores ranurados del diseño original en el proyecto de investigación, las pruebas se indican a continuación:

Fotografía No. 16: Vista desde aguas abajo de la descarga del chorro en el cuenco amortiguador y la zona de recirculación

(a) Caudal 395.9 m³/s



(b) Caudal 598.8 m³/s



Fotografía No. 17: Vista lateral de la trayectoria del chorro y su impacto en el colchón de agua del cuenco disipador de energía.

(a) Caudal $395.9 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Caudal $598.8 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía No. 18: Vista superior de la descarga del vertedero y la forma del chorro que se genera.

(a) Caudal $395.9 \text{ m}^3/\text{s}$



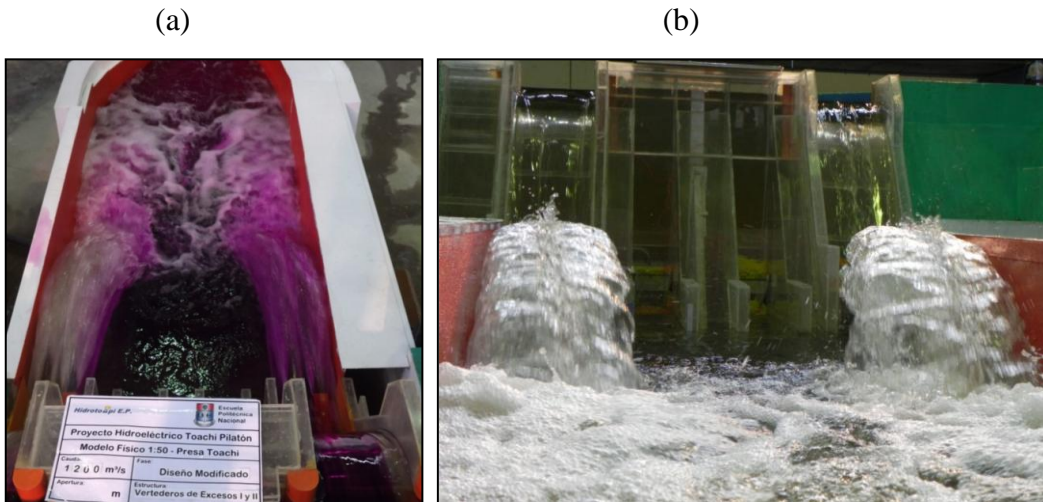
(b) Caudal $598.8 \text{ m}^3/\text{s}$



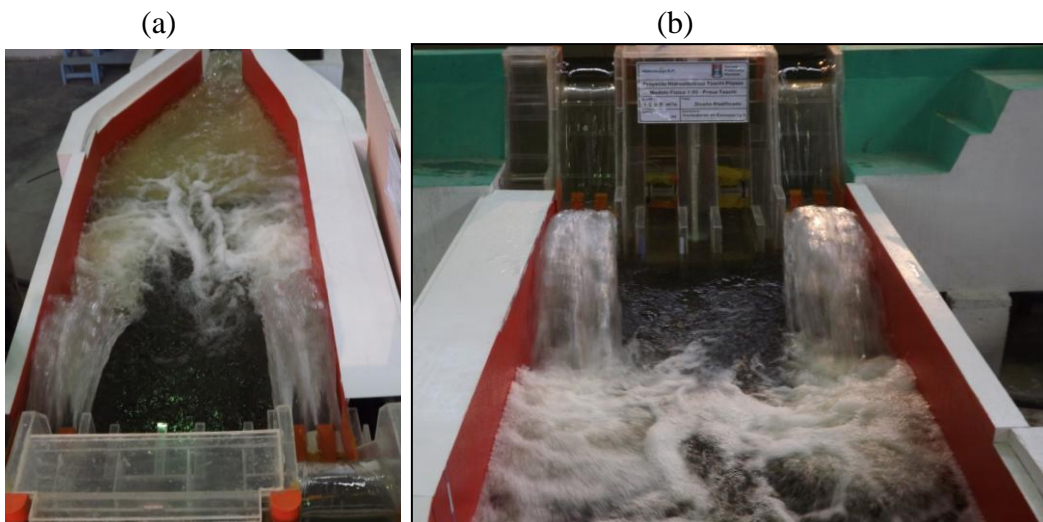
ESCENARIO 2

Operación simultánea de los vertederos de excesos de la presa Toachi con el deflector discontinuo y contracción lateral.

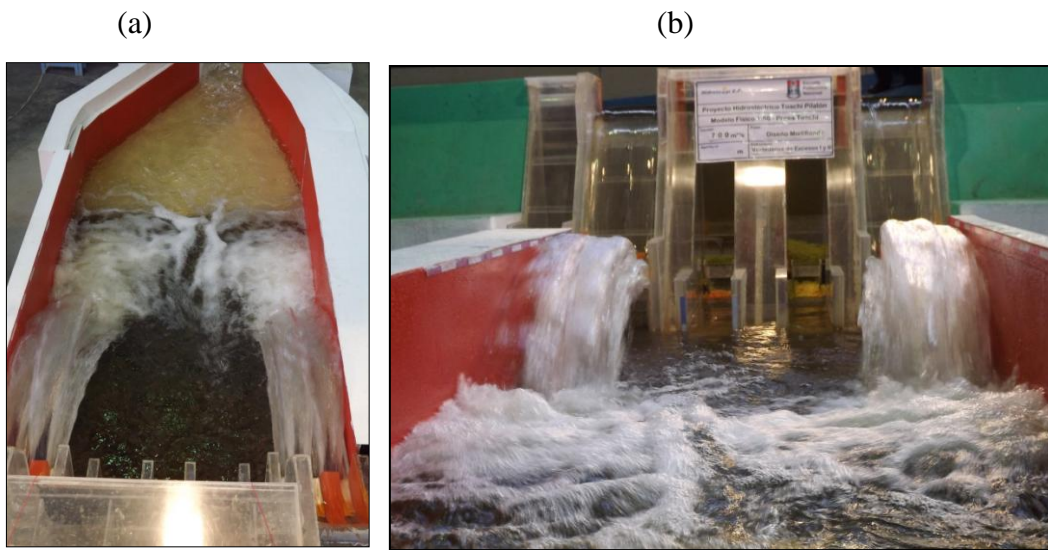
Fotografía No. 19: Ensayo con caudal de $1203.12 \text{ m}^3/\text{s}$. (a) Vista superior de las descargas (b) Vista frontal de las descargas del vertedero de excesos derecho e izquierdo



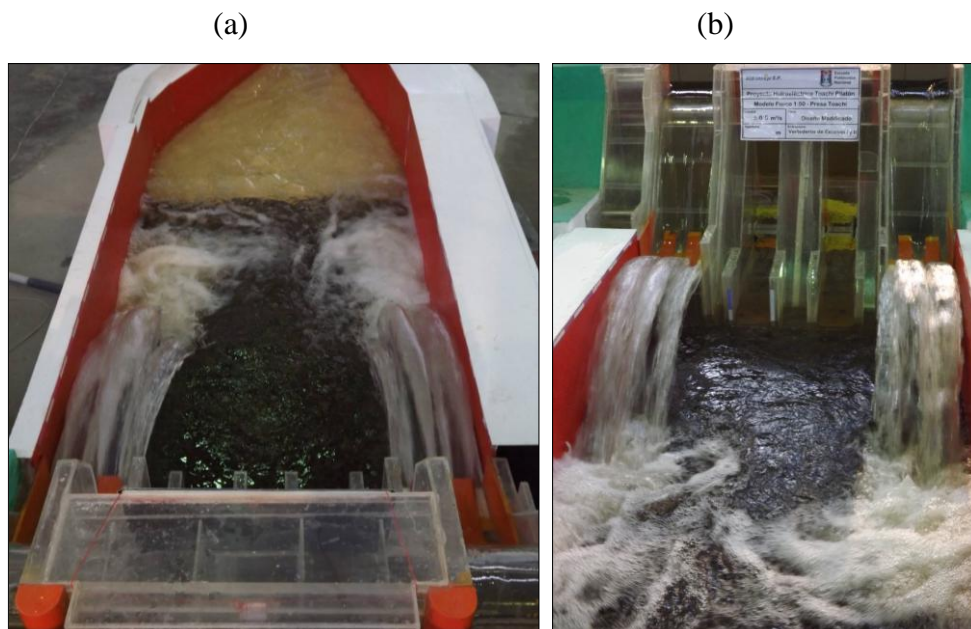
Fotografía No. 20: Ensayo con caudal de $1002.57 \text{ m}^3/\text{s}$. (a) Vista superior de las descargas (b) Vista frontal de las descargas del vertedero de excesos derecho e izquierdo



Fotografía No. 21: Ensayo con caudal de 701.32 m³/s. (a) Vista superior de las descargas
(b) Vista frontal de las descargas del vertedero de excesos derecho e izquierdo

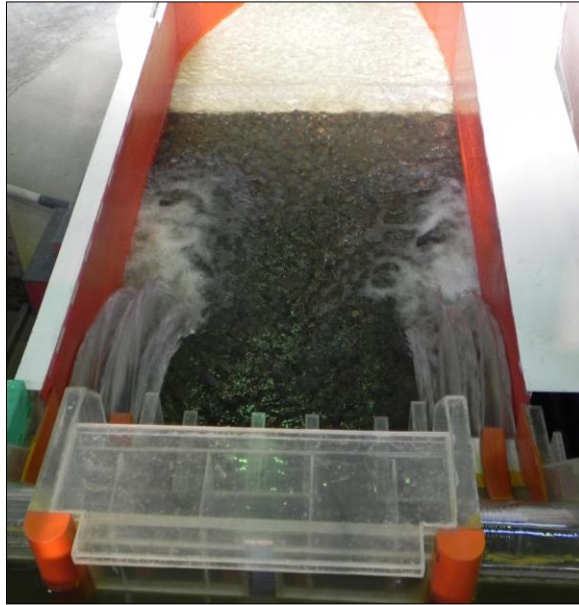


Fotografía No. 22: Ensayo con caudal de 499.57 m³/s. (a) Vista superior de las descargas
(b) Vista frontal de las descargas del vertedero de excesos derecho e izquierdo



Fotografía No. 23: Ensayo con caudal de 197.89 m³/s. (a) Vista superior de las descargas
(b) Vista frontal de las descargas del vertedero de excesos derecho e izquierdo

(a)



(b)



**ANEXOS N° 3.- REGISTRO DE DATOS
EXPERIMENTALES.**

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON DEFLECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL

Prueba:	O _{Q400}
Fecha:	22-feb-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.52	h(cm):	23.71

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.9

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	14.7

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.8
Carga sobre el perfil	cm	3.9

Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	20.02
Alcance máximo	cm	132
Alcance menor	cm	58.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON DEFLECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL

Prueba:	O _{Q600}
Fecha:	22-feb-12

Hora:	12:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	33.65	h(cm):	27.03

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	9.9
Carga sobre el perfil	cm	4.8
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	21.32
Alcance máximo	cm	135.5
Alcance menor	cm	67.0

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “A” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	A _{Q400}
Fecha:	01-mar-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.46	h(cm):	23.69

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	968

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.8
Carga sobre el perfil	cm	3.6
Esquí		
Calado esquí	cm	4.5
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	26.82
Alcance máximo	cm	133
Alcance menor	cm	54

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “A” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	A _{Q600}
Fecha:	01-mar-12

Hora:	12:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	34.25	h(cm):	27.19

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco.	cm	18

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.2
Carga sobre el perfil	cm	3.5
Esquí		
Calado esquí	cm	6.5
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	29.52
Alcance máximo	cm	138
Alcance menor	cm	52.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “A-1” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	A-1 _{Q600}
Fecha:	02-mar-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	36.21	h(cm):	27.7

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	18

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.7
Carga sobre el perfil	cm	3.8
Esquí		
Calado esquí	cm	5.7
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	9.52
Alcance máximo	cm	118
Alcance menor	cm	-

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “B” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	B _{Q400}
Fecha:	09-mar-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.81	h(cm):	23.81

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.9

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	10.7

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.7
Carga sobre el perfil	cm	3.5
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	2.5
Calado deflector (central)	cm	3.0
Calado deflector (izquierdo)	cm	3.0
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecho)	cm	12.98
Altura máxima (central)	cm	15.66
Altura máxima (izquierdo)	cm	16.34
Alcance máximo (derecho)	cm	110
Alcance máximo (central)	cm	124
Alcance máximo (izquierdo)	cm	138

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “B” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	B _{Q600}
Fecha:	09-mar-12

Hora:	11:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	34.29	h(cm):	27.2

EMBALSE			
Nivel máximo embalse :		msnm	970
Nivel en el embalse :		msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR			
Calado en el cuenco		cm	14.8

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.5
Carga sobre el perfil	cm	5
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	3.5
Calado deflector (central)	cm	5.5
Calado deflector (izquierdo)	cm	5
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecho)	cm	17.98
Altura máxima (central)	cm	18.71
Altura máxima (izquierdo)	cm	18.54
Alcance máximo (derecho)	cm	123
Alcance máximo (central)	cm	141
Alcance máximo (izquierdo)	cm	131

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “C” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	C _{Q400}
Fecha:	03-abr-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.78	h(cm):	23.8

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	968

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	14

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	8.00
Carga sobre el perfil	cm	3.30
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	2.50
Calado deflector (izquierdo)	cm	3.50
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecha)	cm	7.6
Altura máxima (izquierda)	cm	18.6
Alcance máximo	cm	138.00
Alcance menor	cm	104.00

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “C” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	C _{Q600}
Fecha:	02-abr-12

Hora:	11:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	33.98	h(cm):	27.12

EMBALSE			
Nivel máximo embalse :	msnm		970
Nivel en el embalse :	msnm		969.5

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.00
Carga sobre el perfil	cm	5.00
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	3.50
Calado deflector (izquierdo)	cm	5.00
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecha)	cm	11.1
Altura máxima (izquierda)	cm	23.1
Alcance máximo	cm	141.00
Alcance menor	cm	106.00

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “D” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	D _{Q400}
Fecha:	03-abr-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.52	h(cm):	23.71

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.9

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	12

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.50
Carga sobre el perfil	cm	3.60
Esquí		
Calado esquí contracción	cm	4.50
Calado deflector	cm	1.80
Calado esquí central	cm	4.30
Calado deflector	cm	1.80
Calado esquí	cm	3.50
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	22.0
Alcance máxima	cm	134.00

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA MODIFICACIÓN “D” EN LOS DEFLECTORES

Prueba:	D _{Q600}
Fecha:	02-abr-12

Hora:	11:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	33.87	h(cm):	27.09

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.5

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	9.50
Carga sobre el perfil	cm	5.50
Esquí		
Calado esquí contracción	cm	6.50
Calado deflector	cm	3.50
Calado esquí central	cm	5.00
Calado deflector	cm	3.50
Calado esquí	cm	4.00
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	23.00
Alcance máxima	cm	142.50
Alcance menor	cm	104.50

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA ESCENARIO N° 2

Prueba:	D1	Hora:	15:30
Fecha:	25-jun-12	B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	68.06	h(cm):	40.77

EMBALSE			
Nivel máximo embalse :	msnm		970
Nivel en el embalse :	msnm		969.7

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
	Lecturas limnímetros	
1.-Eje Sarapullo	cm	41.08
2.- Eje vertedero derecho	cm	43.07
3.- Eje Presa	cm	43.28
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	43.46

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	25

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	9.0	9.0
Carga sobre el perfil	cm	5.0	5.0
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	6.5	5.5
Calado deflector	cm	3.5	3.0
Calado esquí central	cm	5.4	5.2
Calado deflector	cm	3.0	3.0
Calado esquí	cm	4.6	4.5
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	22.4	21.2
Alcance máximo	cm	135	135
Alcance menor	cm	89	88
Ancho (h _{máx})	cm	30	32.5
Ancho (impacto)	cm	36	37.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN

MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50

PRUEBA ESCENARIO N° 2

Prueba:	D2	Hora:	10.49
Fecha:	25-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	56.71	h(cm):	38.66

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	39.39
2.- Eje vertedero derecho	cm	41.41
3.- Eje Presa	cm	41.59
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	41.6

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	23

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	9.0	9.0
Carga sobre el perfil	cm	4.5	4.3
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	4.5	5.0
Calado deflector	cm	2.8	2.4
Calado esquí central	cm	4.8	4.5
Calado deflector	cm	2.3	2.4
Calado esquí	cm	4.0	4.0
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	20.4	19.0
Alcance máximo	cm	127	127
Alcance menor	cm	88	88
Ancho (h _{máx})	cm	28	28
Ancho (impacto)	cm	35	35

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA ESCENARIO N° 2

Prueba:	D3	Hora:	13:00
Fecha:	25-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	39.67	h(cm):	34.96

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.7

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	36.83
2.- Eje vertedero derecho	cm	38.87
3.- Eje Presa	cm	39.12
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	39.25

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	17.5

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	7.8	7.8
Carga sobre el perfil	cm	2.8	3.4
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	3.5	3.6
Calado deflector	cm	1.8	1.5
Calado esquí central	cm	3.5	3.5
Calado deflector	cm	1.6	1.5
Calado esquí	cm	2.7	3.0
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	18.4	19.5
Alcance máximo	cm	124	122
Alcance menor	cm	99	97
Ancho (h _{máx})	cm	25.5	26
Ancho (impacto)	cm	26.5	26.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA ESCENARIO N° 2

Prueba:	D4	Hora:	10:00
Fecha:	27-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	28.26	h(cm):	31.92

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	966.5

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	34.83
2.- Eje vertedero derecho	cm	36.89
3.- Eje Presa	cm	37.09
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	37.28

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	15.2

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	5.8	6.4
Carga sobre el perfil	cm	1.7	2.1
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	2.5	2.5
Calado deflector	cm	0.9	1.1
Calado esquí central	cm	2.5	2.8
Calado deflector	cm	1.1	1.0
Calado esquí	cm	2.0	2.3
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	15.2	18.8
Alcance máximo	cm	114.6	113.5
Alcance menor	cm	92.7	90
Ancho (h _{máx})	cm	27	27
Ancho (impacto)	cm	25.5	26

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA ESCENARIO N° 2

Prueba:	D5	Hora:	15.35
Fecha:	27-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	11.19	h(cm):	25.5

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	965

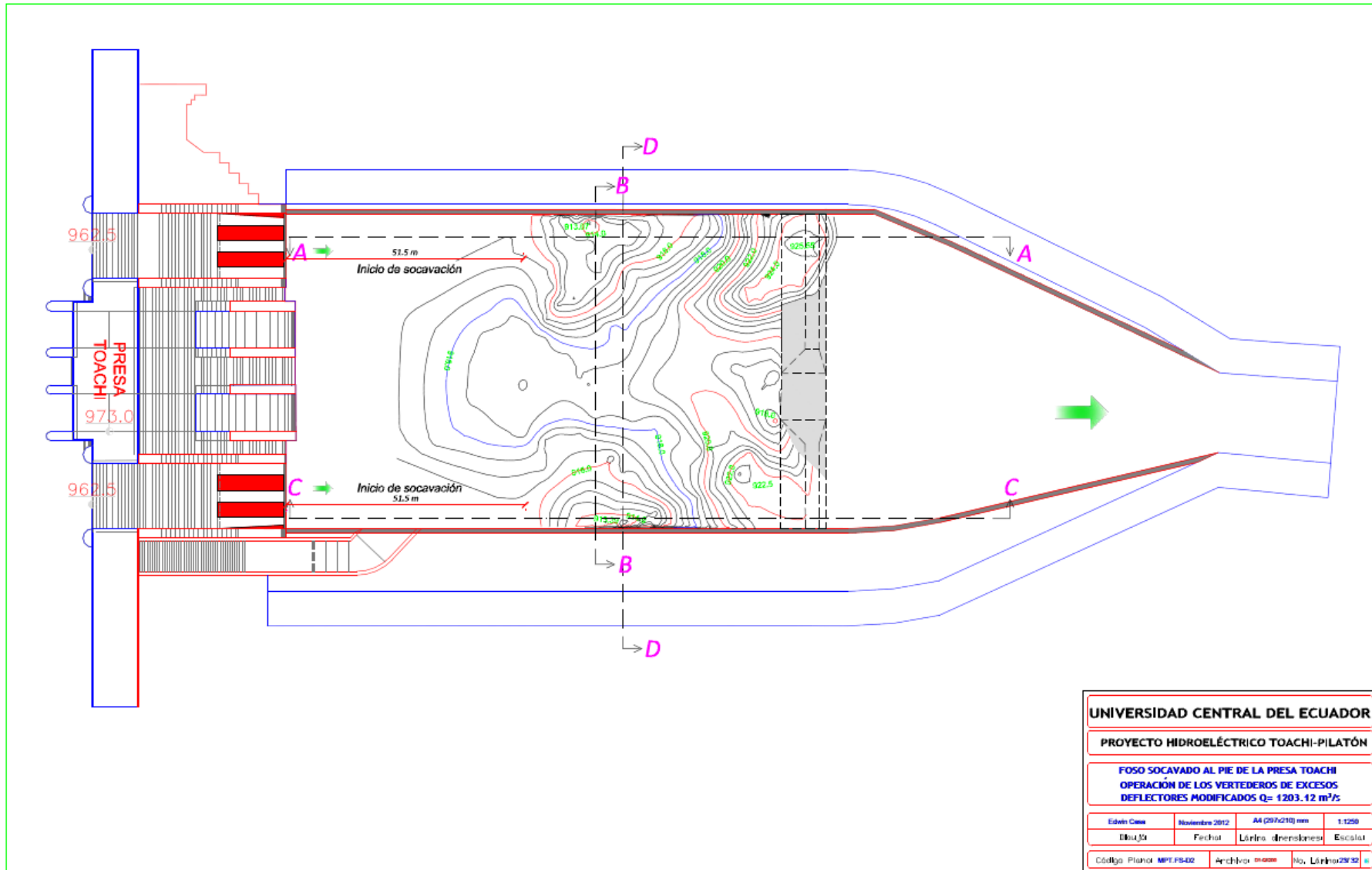
CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	31.33
2.- Eje vertedero derecho	cm	33.35
3.- Eje Presa	cm	33.58
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	33.66

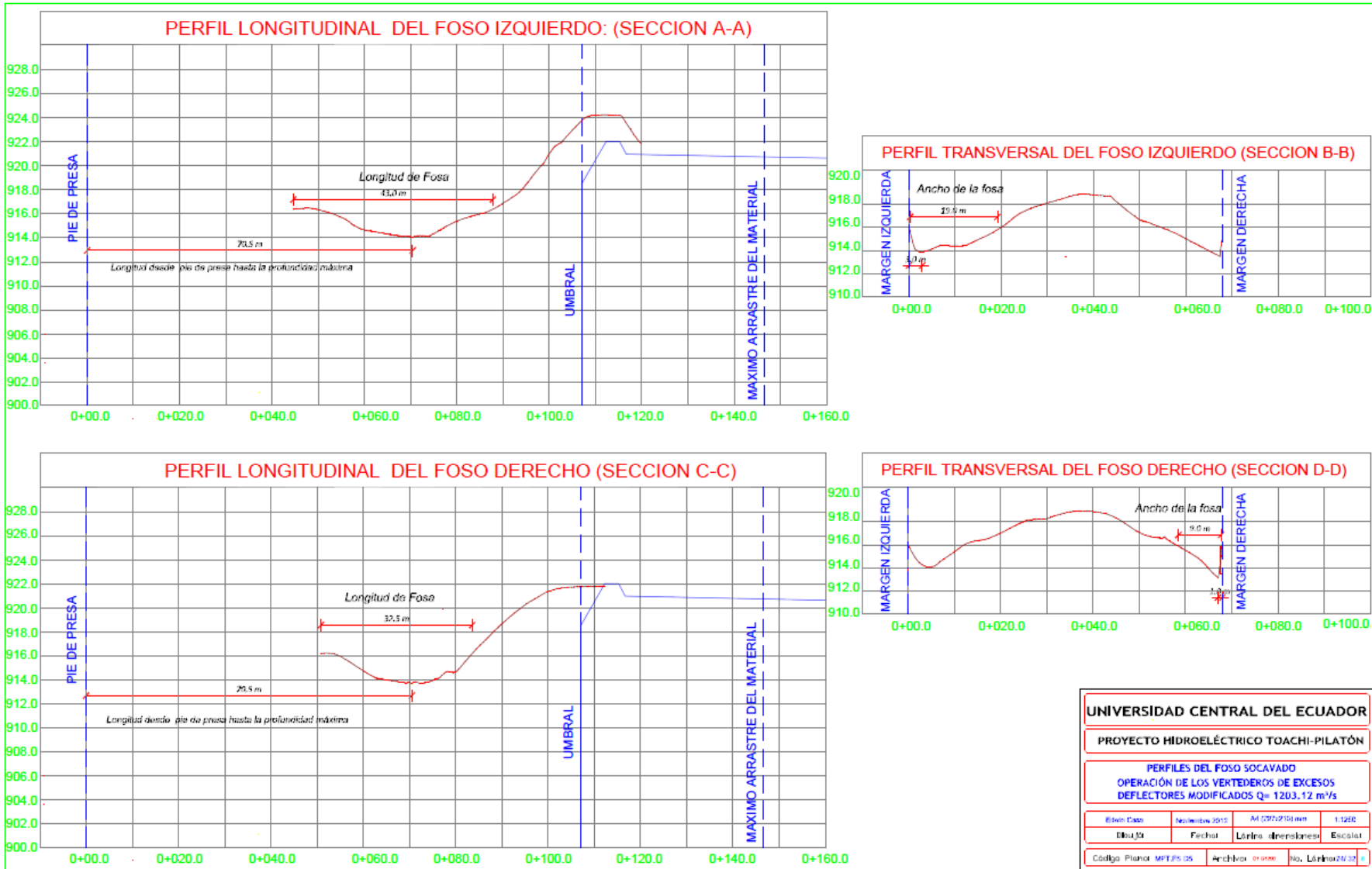
CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	10

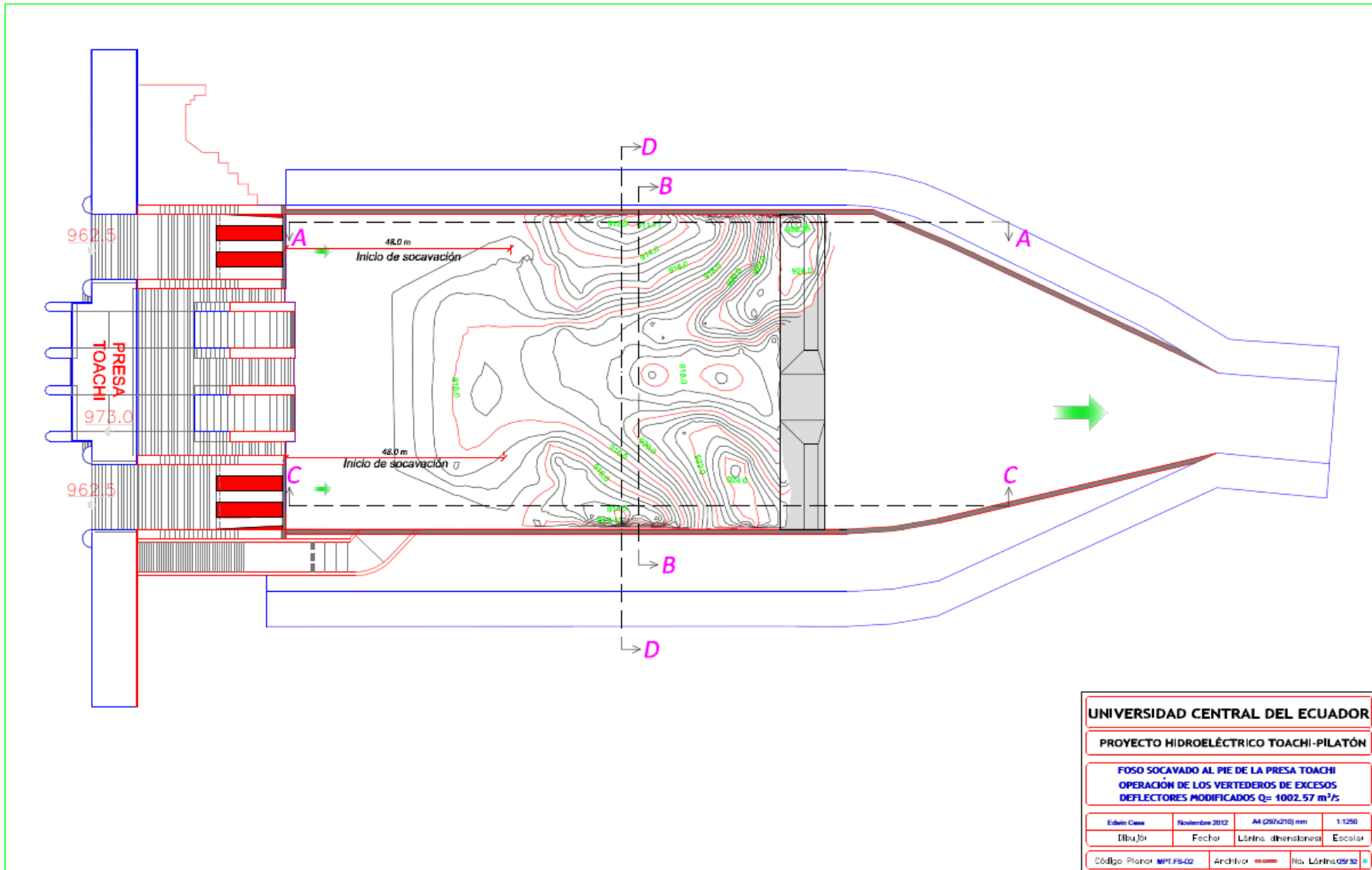
VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDA
Carga sobre la cresta	cm	3.1	3.9
Carga sobre el perfil	cm	0.9	1.1
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	1.2	1.1
Calado deflector	cm	0.5	0.5
Calado esquí central	cm	1.3	1.4
Calado deflector	cm	0.6	0.6
Calado esquí	cm	1.0	1.0
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	12.3	14.5
Alcance máximo	cm	88	90
Alcance menor	cm	74	75
Ancho (h _{máx})	cm	4.5	4.5
Ancho (impacto)	cm	28.5	29.5

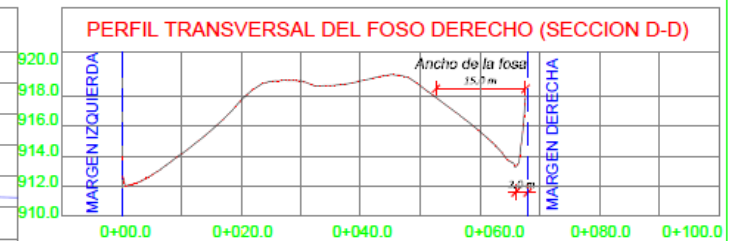
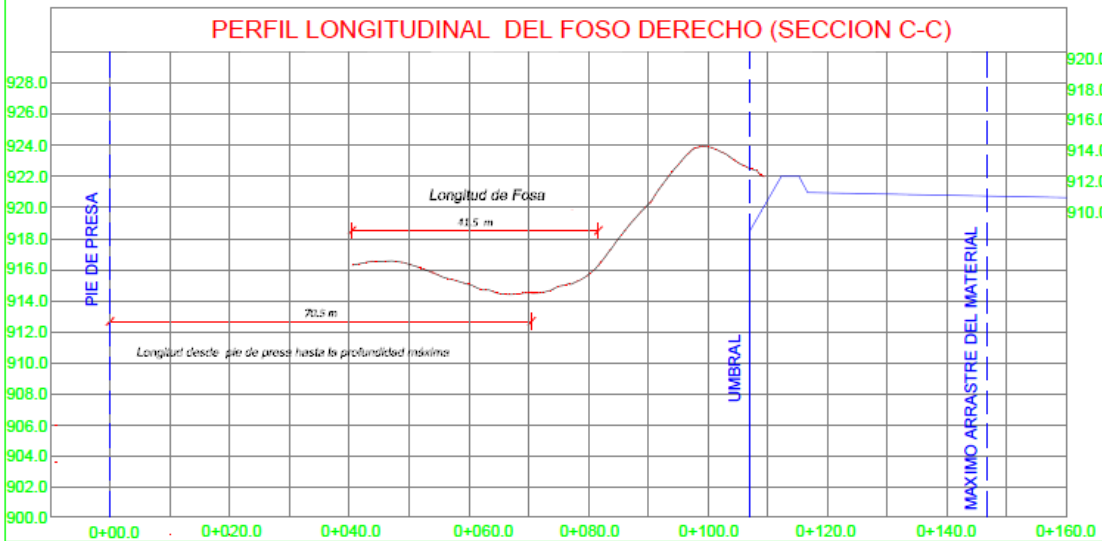
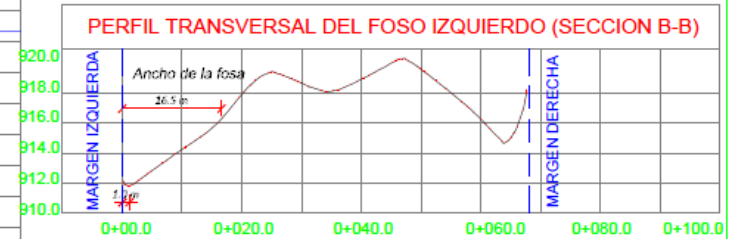
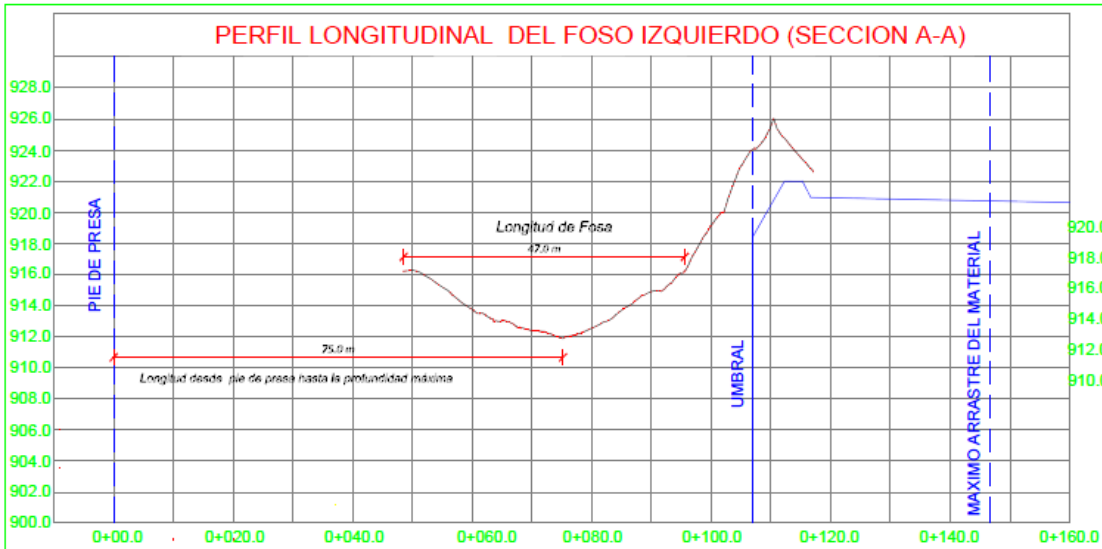
OBSERVACIONES:

ANEXOS N° 4.- PLANOS.

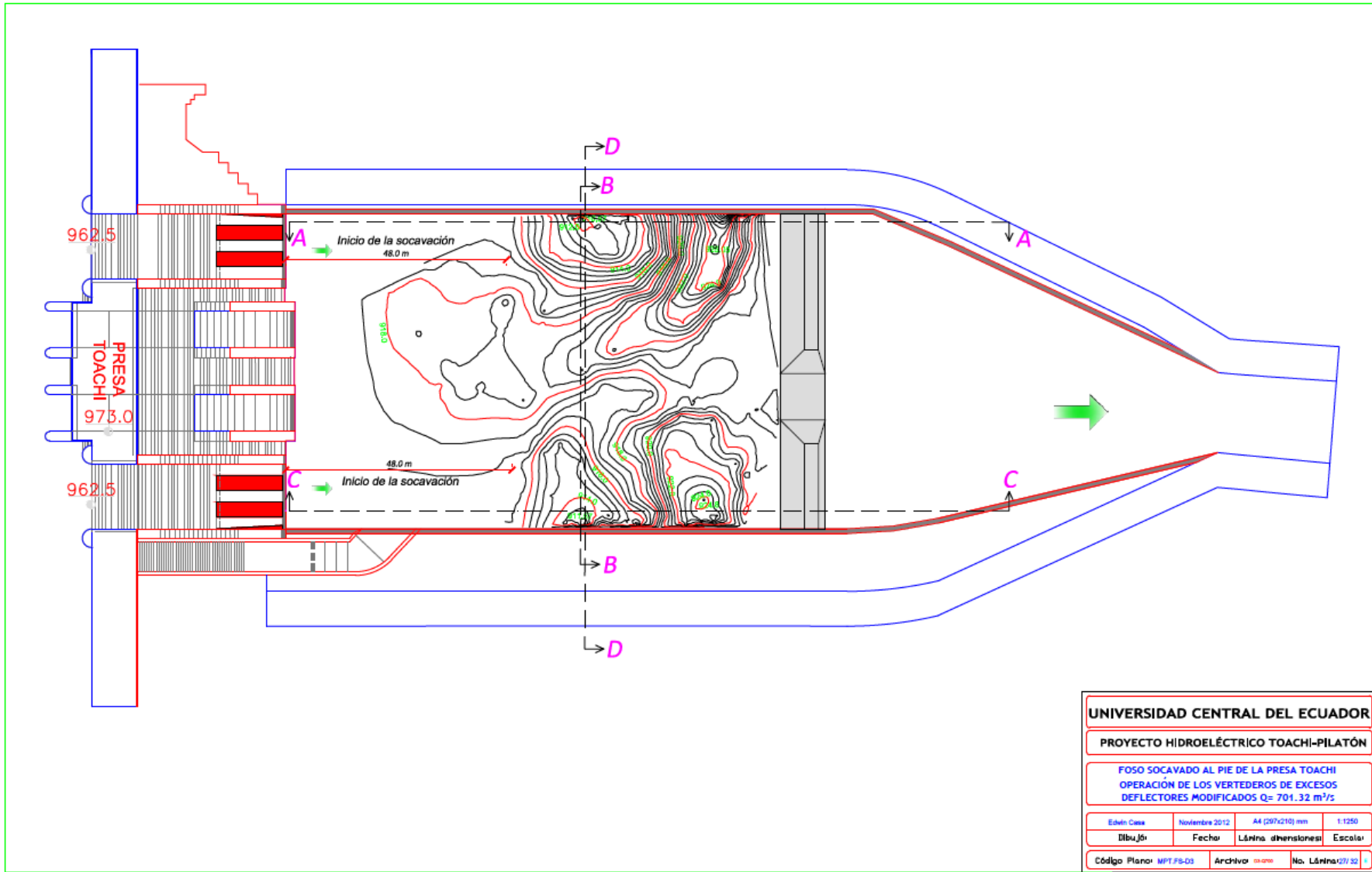


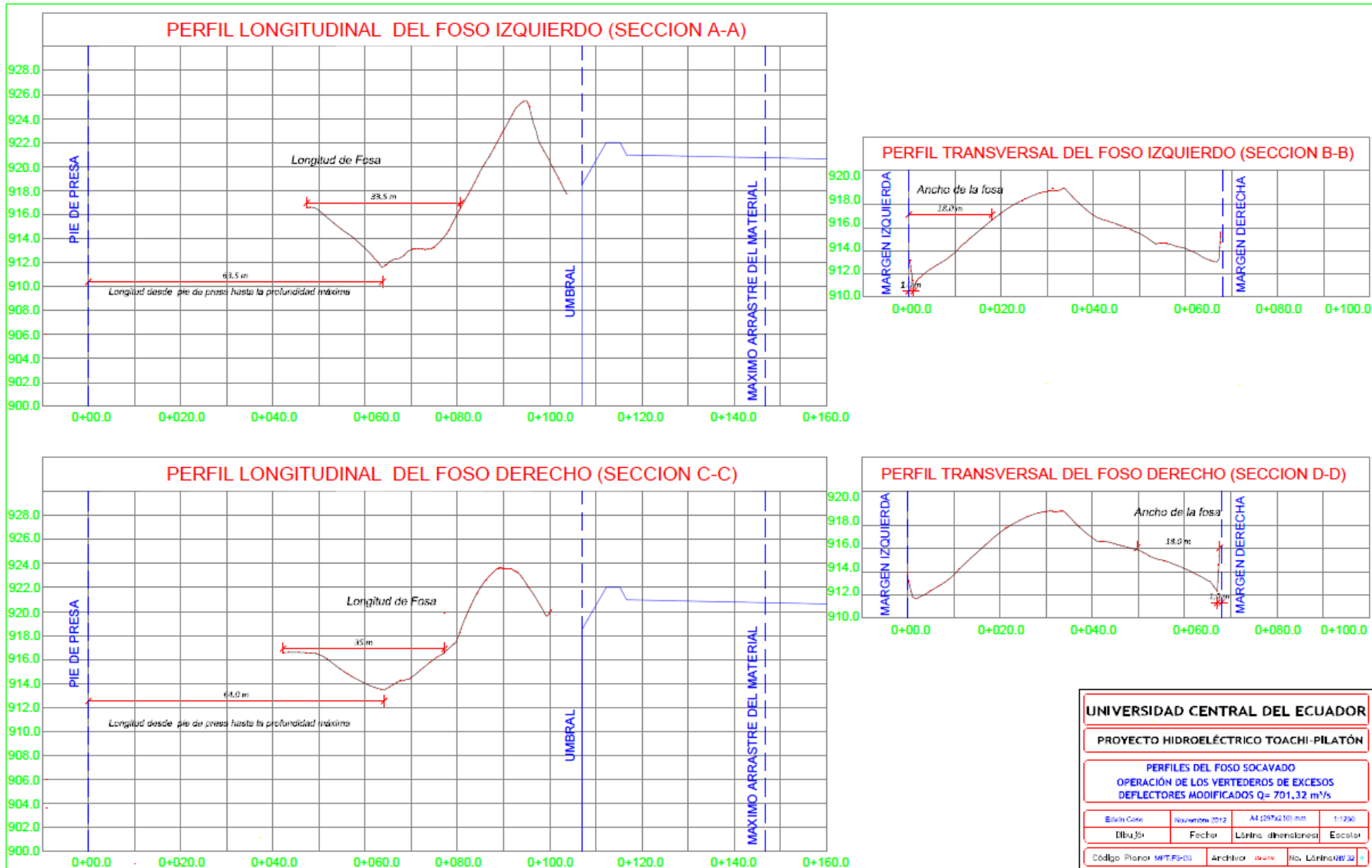


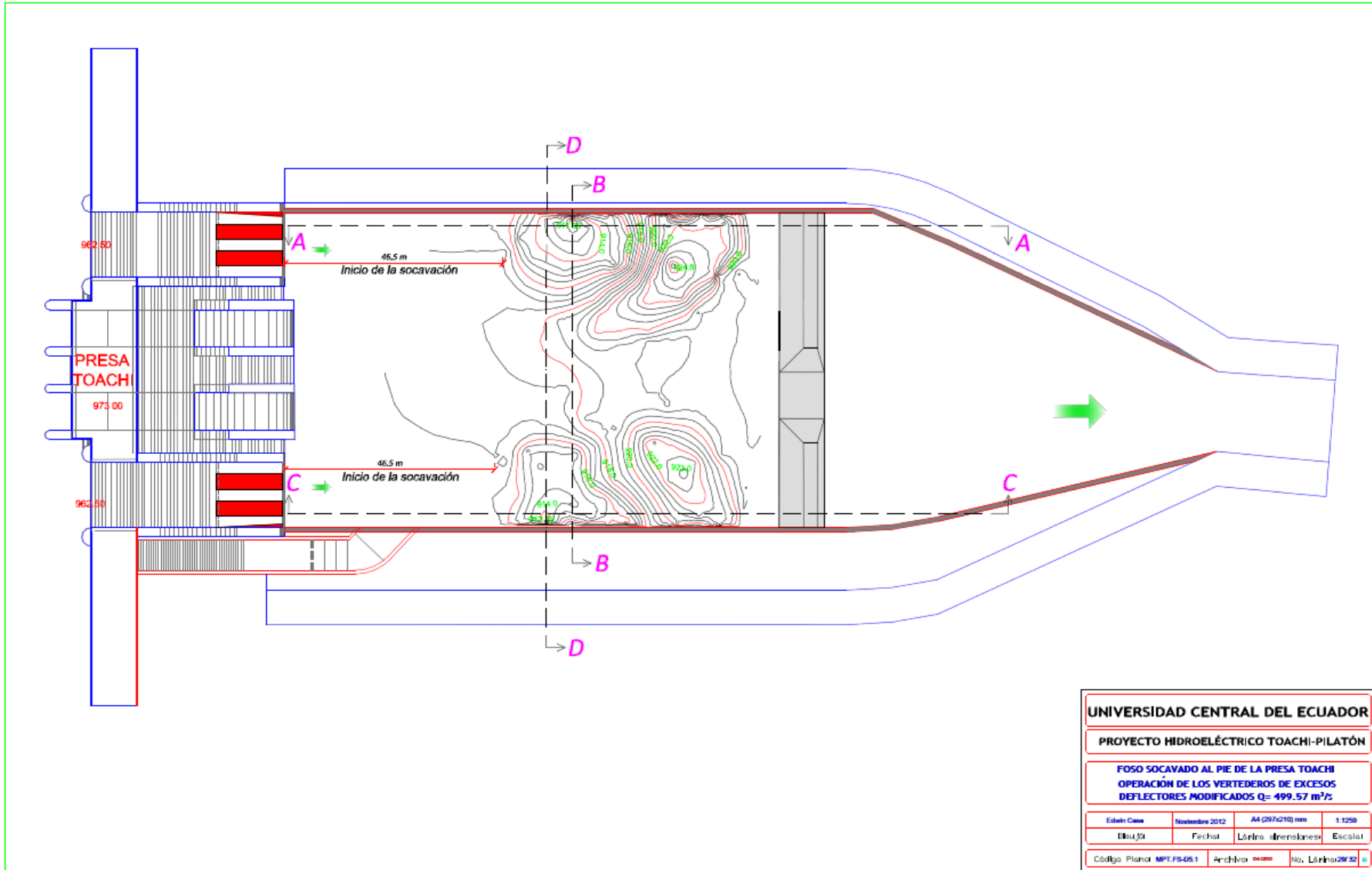


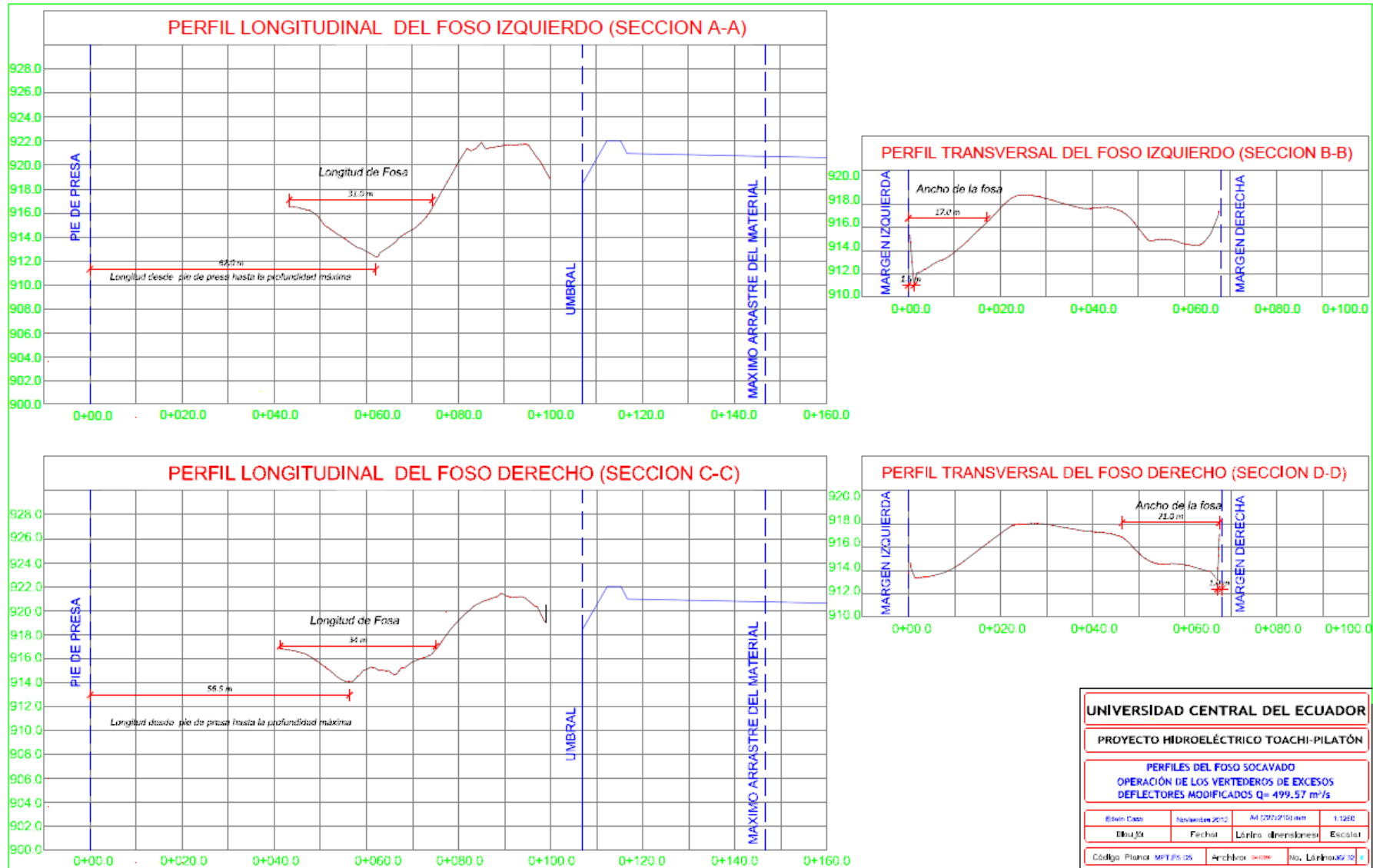


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR			
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI-PILATÓN			
PERFILES DEL FOSO SOCAVADO			
OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESO			
DEFLECTORES MODIFICADOS $Q = 1002,57 \text{ m}^3/\text{s}$			
Elaboró	Fecha	Al (297x210) mm	1:1250
Dibujó	Fecha	Línea dimensionales	Escala
Código	Planos MPT-P-00.P	Archivo	Rev. Línea

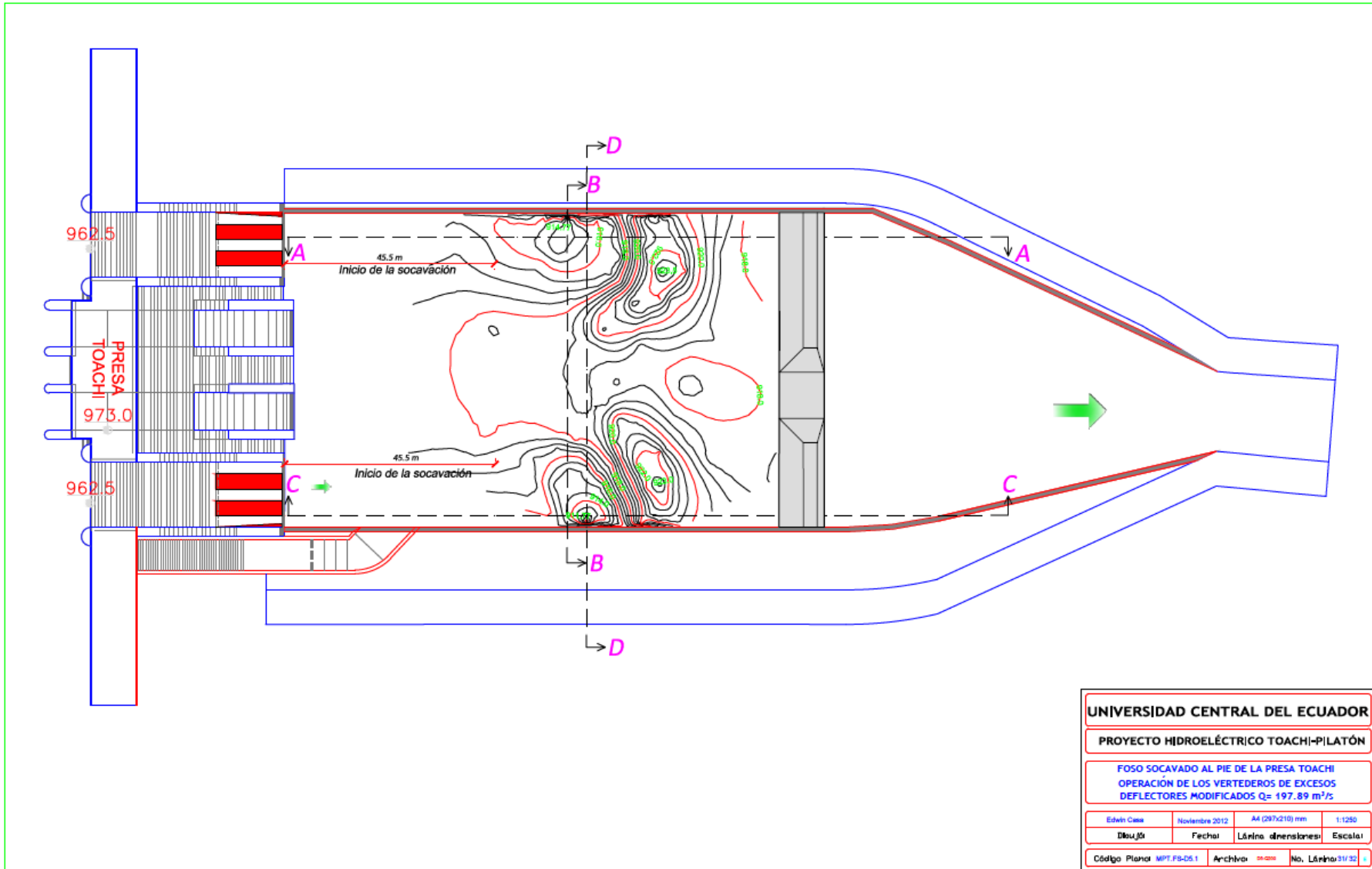




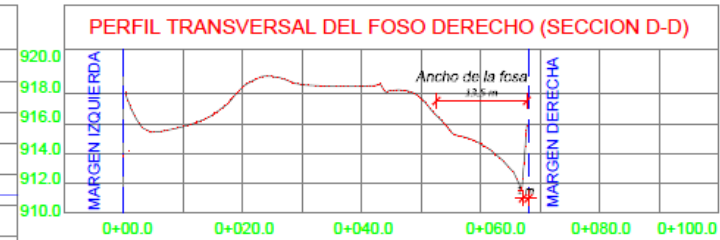
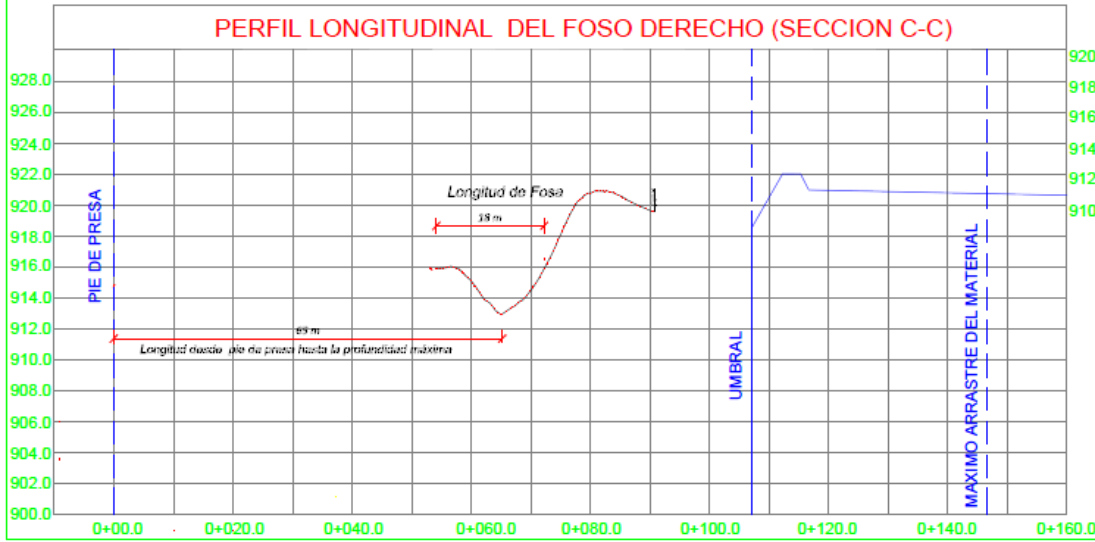
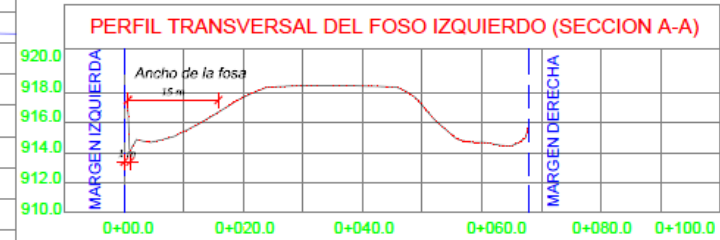
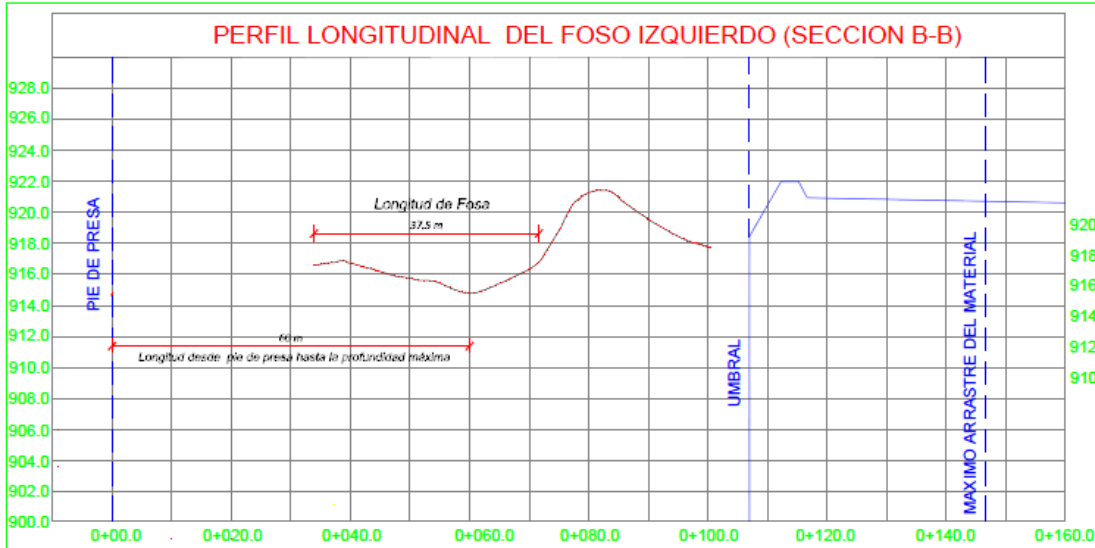




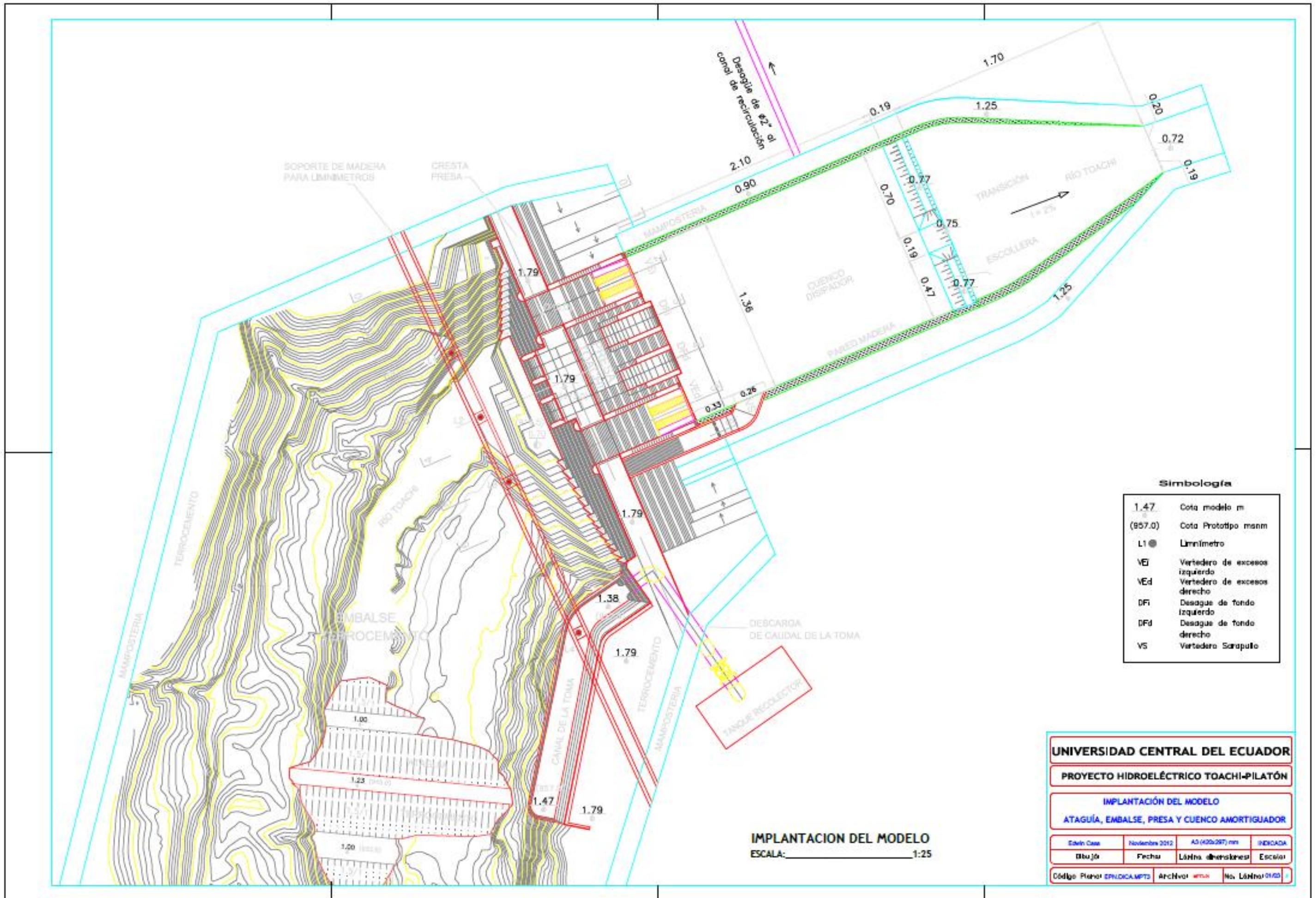
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR			
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI-PILATÓN			
PERFILES DEL FOSO SOCAVADO			
OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESO			
DEFLECTORES MODIFICADOS Q= 499.57 m³/s			
Dibujo No.	Fecha	Autores	Escala
Código Plano	MPT/25-05	Archivos	No. Láminas/12

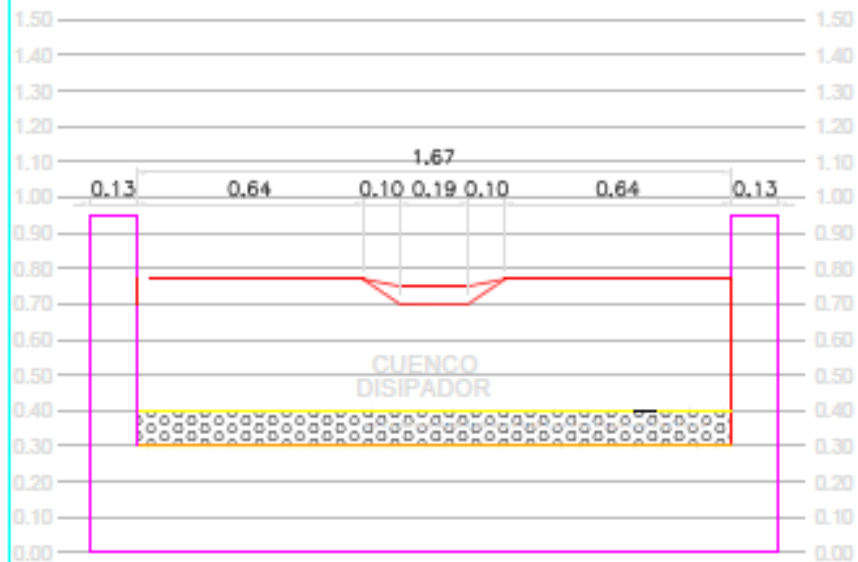


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR			
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI-PILATÓN			
FOSO SOCAVADO AL PIE DE LA PRESA TOACHI			
OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS			
DEFLECTORES MODIFICADOS Q= 197.89 m³/s			
Edwin Caza	Noviembre 2012	A4 (297x210) mm	1:1250
Dibujó	Fecha	Línea dimensiones	Escala
Código Plano	MPT-FB-05.1	Archivo	No. Lámina 31/32

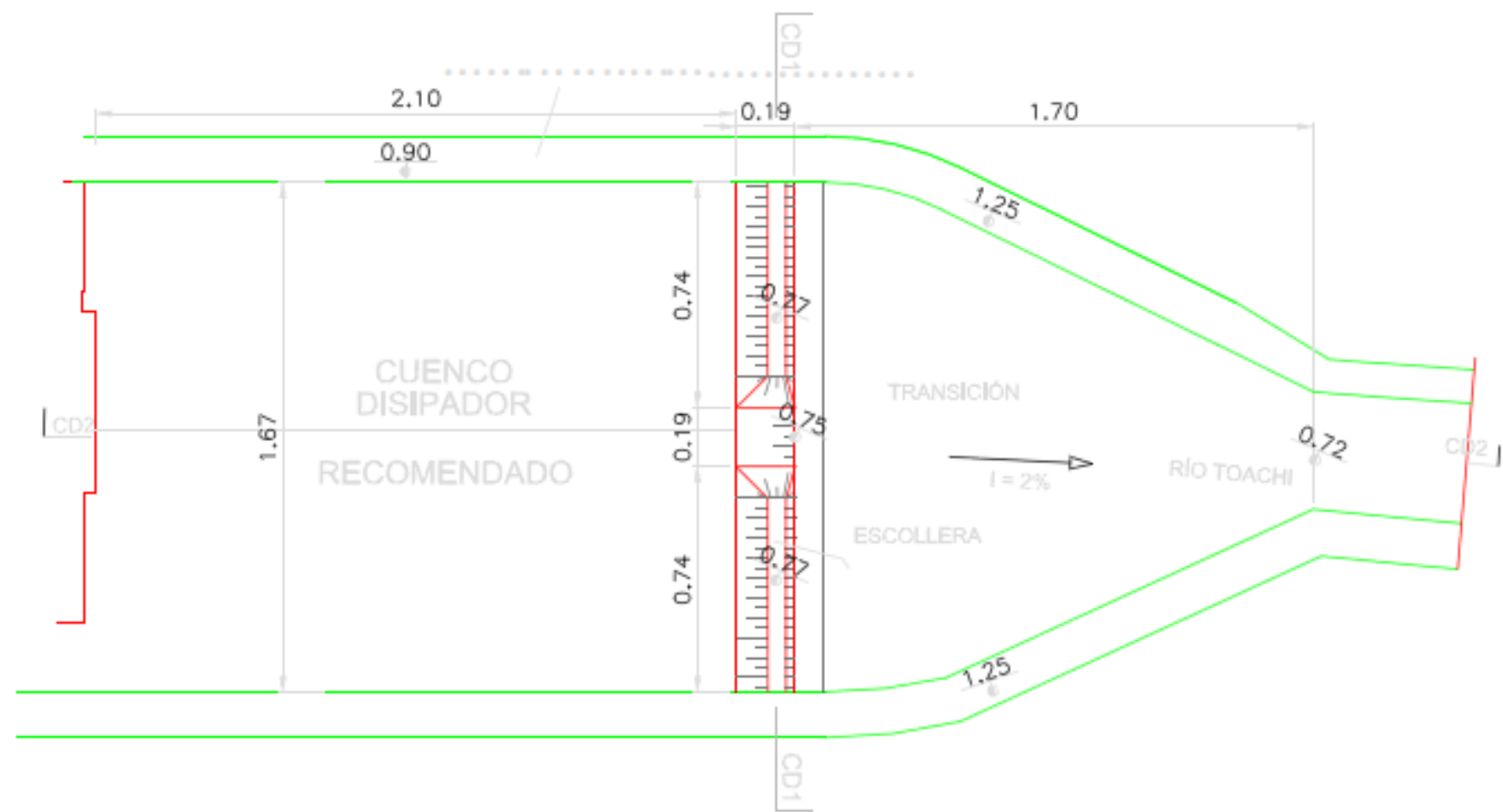


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR			
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI-PILATÓN			
PERFILES DEL FOSO SOCAVADO			
OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS			
DEFLECTORES MODIFICADOS $Q = 197.89 \text{ m}^3/\text{s}$			
Elaboró	Revisó	Aprobó	Fecha
Ilustró	Calculó	Verificó	Escalado
Código Plano	MPI/PS 05	Archivos	0000
No. Lámina	01	No. Láminas	01

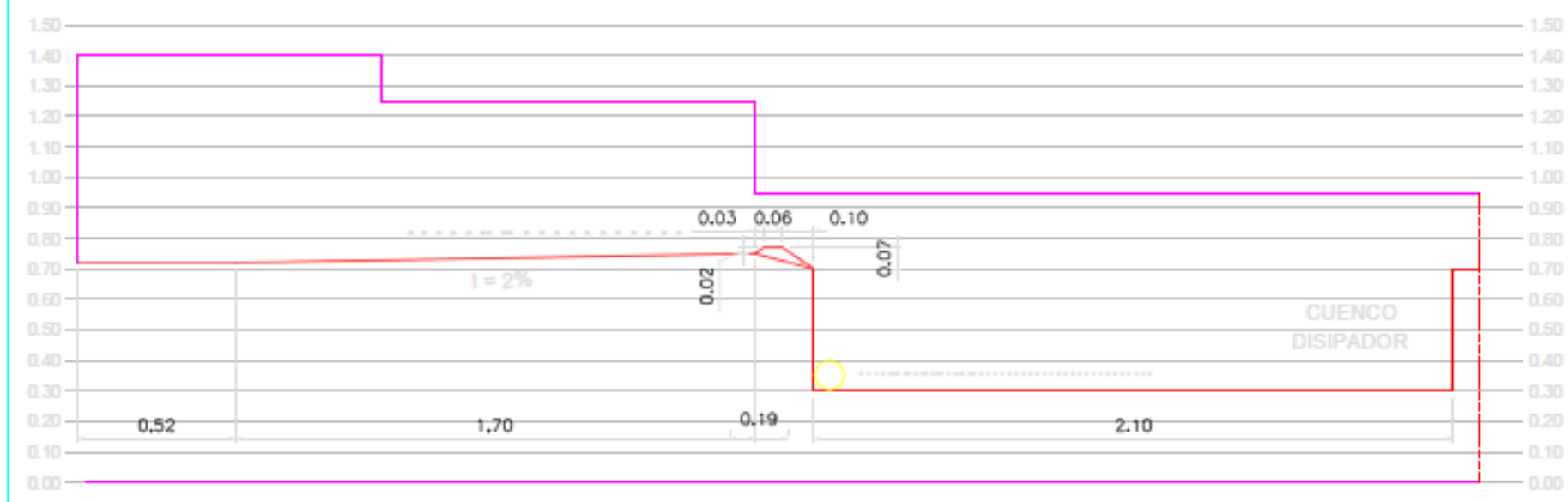




CORTE CD1-CD1
ESCALA: 1:20



IMPLANTACION DEL CUENCO DISIPADOR
ESCALA: 1:20



CORTE CD2-CD2
ESCALA: 1:20

Simbología

1.47	Cota modelo m
------	---------------

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR			
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI-PILATÓN			
VISTA EN PLANTA DEL CUENCO AMORTIGUADOR RECOMENDADO			
PRUEBAS - ESCENARIO N° 1-			
Edwin Caza	Noviembre 2012	A3 (400x297) mm	INDICADA
Ilustrador	Fecha	Línea dimensiones	Escalas
Código Plano	INDICADO	Archivo	No Línea 02/03

