

ENERGÍAS LIMPIAS DEL YAGUALA, S. A. de C. V.
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA.
SUBCOORDINACIÓN DE OBRAS Y EQUIPOS HIDRÁULICOS
CLAVE IMTA: HC1719.4



"ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LA OBRA DE EXCEDENCIA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ARENAL ETAPA I-II."

INFORME FINAL

Cliente: 			Contratista:  INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA	
Versión	Fecha y comentarios	Autor	Verificó	Aprobó
01	Diciembre de 2018. Observaciones a la versión 1	CACGC		
V1_RevCru_ GSM20.03.2019	Solventación de las observaciones a la versión V.01	GSM		

31 de mayo de 2018

Jefe de proyecto:

Gilberto Salgado Maldonado.

Participantes:

*Omar Fonseca Moreno
Cecia Millán Barrera
Fidel Rafael Gómez Mendoza*

Participación profesional de:

*Lidia Zulema Tostado Bojórquez
Miguel Alejandro Martínez Rodríguez
Wendoly Flores Alarcón*

Elaborado para:

**Energías Limpias del
Yaguala, S. A. de C. V.**

Coordinación Yaguala

*Andrea Ricciardi
Cristobal González*

Coordinación IMTA

*José Raúl Saavedra Horita
José Alfredo Gonzales Verdugo*

Contenido

FASE 1. CALIBRACIÓN Y ENSAYOS PRELIMINARES.....	1
Serie 0. Calibración y ensayos preliminares.....	1
Calibración de válvulas y vertedor de aforo.....	1
Serie I. Ensayos de evaluación del proyecto original	2
Serie I.1. Gasto 1,215m ³ /s.....	3
Serie I.2. Gasto 1,985m ³ /s.....	4
Serie I.5. Gasto 3,730m ³ /s.....	6
Serie I.6. Gasto 4,250m ³ /s.....	7
Serie I.7. Gasto 6,010m ³ /s.....	9
CONCLUSIONES DE LA FASE 1.....	10
RECOMENDACIONES DE LA FASE 1.....	10
Fase 2. CAPACIDAD HIDRÁULICA Y PATRÓN DEL FLUJO.....	11
Serie 1.- Ensayos de evaluación de propuestas provisionales de pilas laterales y centrales	22
Curvas de descarga del vertedero.....	23
Descripción del flujo de aproximación.....	25
Presiones dinámicas en la rápida de descarga para la geometría original.....	29
Serie 1.1. Gasto 1,215m ³ /s.....	33
Serie 1.2. Gasto 1,985m ³ /s.....	34
Serie 1.5. Gasto 3,730m ³ /s.....	36
Serie 1.7. Gasto 6,010m ³ /s.....	38
Conclusiones y recomendaciones de la serie 1.....	39
Serie 2.- Ensayos de evaluación de proyecto original con ataguía aguas abajo.....	40
Serie 2.1. Gasto 1,215m ³ /s.....	40
Serie 2.2. Gasto 1,985m ³ /s.....	41
Serie 2.5. Gasto 3,730m ³ /s.....	41
Serie 2.7. Gasto 6,010m ³ /s.....	42
Conclusiones y recomendaciones de la serie 2.....	42
Serie 3.- Ensayos con modificación en pilas marginales con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1).....	42

Serie 4.- Ensayos con modificación en pilas de la margen izquierda con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1) y modificación en la pila lateral de la margen derecha con un alargamiento de 3.0 metros para una longitud total de 5.00, con un ángulo de 64°	44
Serie 5.- Ensayos con modificación en pilas de la margen izquierda con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1) y modificación en la pila lateral de la margen derecha con un alargamiento de 3.0 metros para una longitud total de 5.00, con un ángulo de 64° (propuesta P2) y pilas centrales con las propuestas No.1 y No.2	46
Serie 6.- Ensayos con modificación de pilas de la margen izquierda y derecha con la propuesta P3 y modificación de las pilas centrales con la propuesta No.4	48
Serie 7.- Ensayos con modificación de pilas laterales propuesta P3, modificación de pilas centrales con la propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 55°	50
Serie 8.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 40°	51
Serie 9.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°. Con ataguía	53
Serie 10.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°. Sin Ataguía	55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL AVANCE A LA SERIE 10.	56
Serie 11.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados "D1" en la cubeta del deflector central y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de la margen izquierda y derecha. Sin ataguía.	57
Serie 12.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados "D1" en la cubeta del deflector central. Sin ataguía.	59
Serie 13.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central, con ángulo de 44° y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm y taludes aguas arriba y abajo.	60
Serie 14.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central,	

con ángulo de 44° y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm con paramento vertical aguas arriba.....	61
Serie 15.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta, deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm con paramento vertical aguas arriba.....	62
Serie 16.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados "D2" en la cubeta del deflector central. Sin ataguía.....	64
Serie 17.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, y un sector de aireador en el deflector lateral. Sin ataguía.....	65
Serie 18.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 22.50m de ancho.....	66
Serie 19.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.....	67
Serie 20.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, sin dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.....	69
Serie 21.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central y laterales, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.....	70
Serie 22.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, y modificación de la salida del deflector del vertedor izquierdo, con ángulo de 44°, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.....	71
Serie 23.- Presiones en el vertedor central con el arreglo de la serie 22.....	72
Presiones dinámicas en la rápida de descarga para la geometría final.....	72
CONCLUSIONES	75

RECOMENDACIONES.....	76
RESPUESTA A LAS OBSERVACIONES DEL INFORME FINAL	76
PREGUNTA 1. Indicar geometría (en particular la distancia) desde el pie aguas abajo de presa, hasta la caída del chorro para las configuraciones original (sin ningún cambio) y para la configuración 22, para ambos con y sin ataguía, y las dos configuraciones (con y sin escotadura).....	76
Diseño original.....	76
Sin ataguía:.....	76
Con ataguía.....	77
Configuración 22.....	78
PREGUNTA 2. Confirmar los cambios propuestos, es decir indicar cual es la recomendación final.....	82
PREGUNTA 3. Entrega de video: Junto con el informe final el IMTA tiene la responsabilidad de entregar un video del modelo hidráulico (ver punto 7 de la propuesta técnica económica) con una duración de 30 minutos, en el mismo solicitamos poder mostrar el Comportamiento del modelo según propuesta original entregada por Lombardi, con y sin ataguía (dos configuraciones con y si escotadura), Comportamiento según la configuración 22, de igual manera con y sin ataguía (dos configuraciones con y sin escotadura).....	82
PREGUNTA 4. En el informe recibido no se tiene información alguna sobre socavación, profundidad para diferentes calidades de materiales en el cuenco (ver fase 4 según EETT)	82
PREGUNTA 5. Información sobre el comportamiento del Modelo para caudal con $Tr=10,000$	85
ANEXOS.....	87
PLANO DE PROPUESTAS DE MODIFICACIONES.....	87
PLANO DE MODIFICACIONES FINALES.....	87

FASE 1. CALIBRACIÓN Y ENSAYOS PRELIMINARES.

De acuerdo a la propuesta técnica;

"Fase 1. Calibración y ensayos preliminares"

La fase preliminar se llevará a cabo con el propósito de analizar el comportamiento hidráulico general del modelo, tales como; condiciones del flujo de aproximación, formaciones de vórtices, ondas de choque, trayectoria del chorro, aeración a lo largo de la rápida, erosión en cuenco amortiguador y laderas (opcional) aguas abajo del salto de esquí, flujo en el cuenco amortiguador, estimación de la capacidad de descarga, etc. En base a las observaciones de esta primera fase se realizarán posibles modificaciones/mejoras necesarias para garantizar condiciones hidráulicas satisfactorias antes de iniciar con las pruebas y mediciones en el modelo (Fase 2). Los objetos que serán modificados en caso de ser necesario son:

- Geometría de las pilas en cresta de vertedero;
- Inclusión de un muro guía en el vertedero central;
- Ancho de los vertederos laterales;
- Geometría del salto de esquí;
- Geometría y material cuenco amortiguador, ataguía y laderas aguas abajo.

Lo anterior no limita el alcance del estudio.

El modelo deberá garantizar estas modificaciones de geometría. Lombardi en conjunto con la ingeniería del Yaguala participarán en esta fase preliminar de pruebas del modelo."

Por razones de logística, en esta fase se realizaron ensayos preliminares de calibración, es decir, ajustar el modelo como calibración, caracterización de los dispositivos de control y medición, y corrección de fugas y detalles de la geometría original para así observar los objetivos propuestos en cuanto a la observación del funcionamiento hidráulico con el proyecto original. Una vez definidos los requerimientos de modificación, se plantea que estos deben realizarse en forma simultánea con los objetivos de la fase 2, es decir su "capacidad hidráulica y patrón de flujo", bajo condiciones de optimización.

Serie 0. Calibración y ensayos preliminares

Calibración de válvulas y vertedor de aforo.

Se colocaron dos tomas en el modelo físico para lograr la alimentación de los gastos de diseño. Las válvulas se encuentran hacia las márgenes izquierda y derecha del tanque de alimentación, conectadas mediante tubería de PVC de 12" de diámetro perforada con la finalidad de distribuir el flujo lo más uniformemente posible, evitando así perturbaciones espurias que no sean representativas de la frontera aguas arriba del modelo.

La operación de la válvula se realizó en forma paulatina en fracciones de vuelta, verificando el gasto transitado por el modelo en el vertedor de aforo que se encuentra al final del módulo. La gráfica y tabla siguiente muestra el resultado de la prueba.

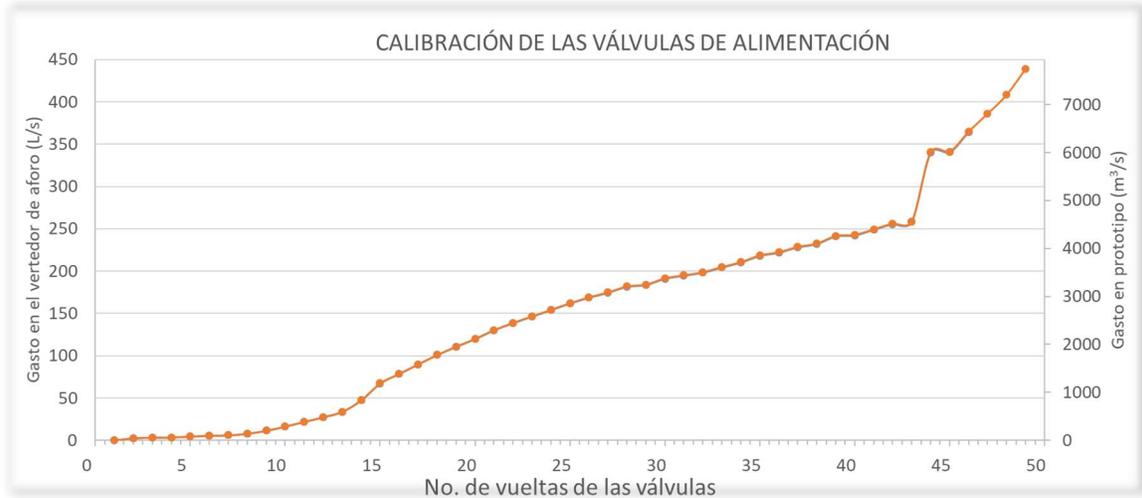


Ilustración 1. Curvas de verificación de las válvulas

Tabla 1. Verificación de las válvulas de alimentación

ENSAYOS DE CALIBRACIÓN PARA EL ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LA OBRA DE EXCEDENCIA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO "ARENAL ETAPA I-II" EN SAN PEDRO SULA, HONDURAS ESC. 1:50				ENSAYOS DE CALIBRACIÓN PARA EL ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LA OBRA DE EXCEDENCIA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO "ARENAL ETAPA I-II" EN SAN PEDRO SULA, HONDURAS ESC. 1:50			
No. Vueltas de la Válvula		Gasto en el vertedor de aforo (L/s)	Gasto en prototipo (m³/s)	No. Vueltas de la Válvula		Gasto en el vertedor de aforo (L/s)	Gasto en prototipo (m³/s)
MI	MD			MI	MD		
0		0	0	9 3/4		168.763	2983.337
9/16		2.673	47.252	10 1/4		174.55	3085.637
3/4		3.266	57.735	10 3/4		181.581	3209.929
1		3.578	63.251	11 1/4		183.746	3248.201
1 1/4		4.566	80.716	11 3/4		191.102	3378.238
1 1/2		5.631	99.543	12 1/4		194.714	3442.090
1 3/4		6.002	106.101	12 3/4		198.35	3506.366
2		7.974	140.962	13 1/4		204.46	3614.376
2 1/4		11.494	203.187	14 1/4		210.232	3716.412
2 1/2		16.461	290.992	15 1/4		218.121	3855.871
2 3/4		21.992	388.767	16 1/4		221.899	3922.657
3		27.409	484.527	17 1/4		228.245	4034.840
3 1/4		33.879	598.902	18 1/4		232.081	4102.651
3 3/4		47.376	837.497	20		241.117	4262.387
4 1/4		67.311	1189.902	22		242.417	4285.368
4 3/4		78.572	1388.970	23		248.955	4400.944
5 1/4		89.776	1587.030	30		255.552	4517.564
5 3/4		100.894	1783.571	35		258.207	4564.498
6 1/4		110.67	1956.388	41	6	339.977	6010.000
6 3/4		119.769	2117.237	41 1/8	6 1/8	340.485	6018.981
7 1/4		130.161	2300.943	43	8	364.136	6437.076
7 3/4		138.683	2451.592	43 1/2	8 1/2	385.254	6810.393
8 1/4		146.289	2586.049	44	9	407.465	7203.032
8 3/4		154.031	2722.909	45 1/2	10 1/2	438.123	7745.000
9 1/4		161.907	2862.138				

Serie I. Ensayos de evaluación del proyecto original

Se realizaron pruebas con la finalidad de observar el comportamiento del flujo bajo las condiciones de la geometría original.

Los gastos probados en esta fase fueron 1,215, 1,985, 3730, 4250 y 6010 m³/s asociados a los períodos de retorno de 2, 5, 50, 100 y 1000 años, sin haber sido limitativos.

Serie I.1. Gasto 1,215m³/s.



Fotografía 1. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 2. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 3. Contracciones pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 4. Contracciones más pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 5. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 6. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$

Serie I.2. Gasto $1,985\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía 7. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$. Aparece el punto de inyección prácticamente en la sección de tangencia entre la rápida y las cubetas deflectoras.



Fotografía 8. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas en la rápida debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$. Aparece el punto de inyección prácticamente en la sección de tangencia entre la rápida y las cubetas deflectoras.



Fotografía 9. Contracciones pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 10. Contracciones más pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 11. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 12. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$. Disipación de la energía residual en el cauce.

Serie I.5. Gasto $3,730\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía 13. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas en la rápida debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$. No se observa la intrusión de aire en el flujo del vertedor.



Fotografía 14. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía 15. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía 16. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 17. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$. La perturbación alcanza la sección final del cauce en el modelo.

Las perturbaciones de los chorros alcanzan la sección final del cauce representado en el modelo, significado de que no se tiene una disipación apropiada de la energía residual. Esto podría ocasionar socavación, dependiendo del tipo de suelo existente. Es entonces evidente la necesidad de colocar la ataguía para conformar el cuenco amortiguador.

Serie I.6. Gasto $4,250\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía 18. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=4,250\text{m}^3/\text{s}$. No se observa intrusión de aire en el flujo del vertedor.



Fotografía 19. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=4,250\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 20. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=4,250\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 21. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=4,250\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 22. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=4,250\text{m}^3/\text{s}$. La perturbación alcanza la sección final del cauce en el modelo.

Las perturbaciones de los chorros alcanzan la sección final del cauce representado en el modelo, significado de que no se tiene una disipación completa de la energía residual. Esto podría ocasionar socavación, dependiendo del tipo de suelo existente. Es entonces evidente la necesidad de colocar la ataguía para conformar el cuenco amortiguador.

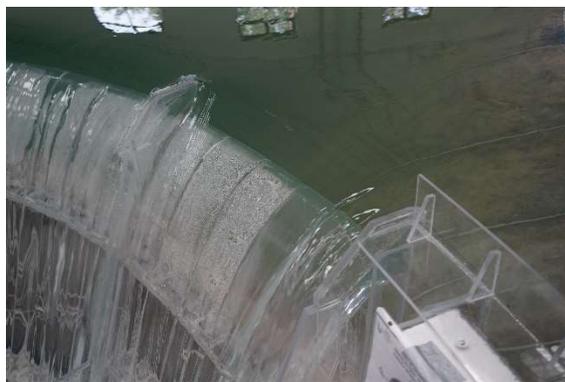
Serie I.7. Gasto $6,010\text{m}^3/\text{s}$.



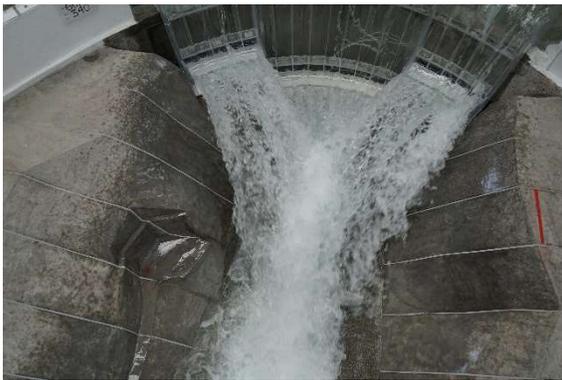
Fotografía 23. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$. No se observa intrusión de aire en el flujo del vertedor.



Fotografía 24. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 25. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 26. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía 27. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$. La perturbación alcanza la sección final del cauce en el modelo.

Las perturbaciones de los chorros alcanzan la sección final del cauce representado en el modelo, significado de que no se tiene una disipación adecuada de la energía residual. Esto podría ocasionar socavación, dependiendo del tipo de suelo existente. Es entonces evidente la necesidad de colocar la ataguía para conformar el cuenco amortiguador. La salpicadura en la plataforma de la ventana 1 se incrementa considerablemente, consecuencia de la perturbación intermitente provocada por la contracción del flujo en los muros de aproximación marginales de los vertedores laterales.

CONCLUSIONES DE LA FASE 1.

En general, el vertedor presenta un flujo adecuado. Se requiere mitigar las perturbaciones generadas por los muros de aproximación marginales extendiendo su geometría hacia aguas arriba. Se observa la necesidad de formar el cuenco amortiguador mediante la ataguía aguas abajo que será utilizada para el desvío del cauce durante la construcción de la cortina. Se observa introducción de aire al flujo al inicio del salto de ski hasta el gasto de $1985\text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente a 5 años de período de retorno.

RECOMENDACIONES DE LA FASE 1.

Las ilustraciones que se muestran a continuación son algunas propuestas geométricas iniciales para la modificación de las pilas, con el objetivo de optimizar su hidrodinámica.

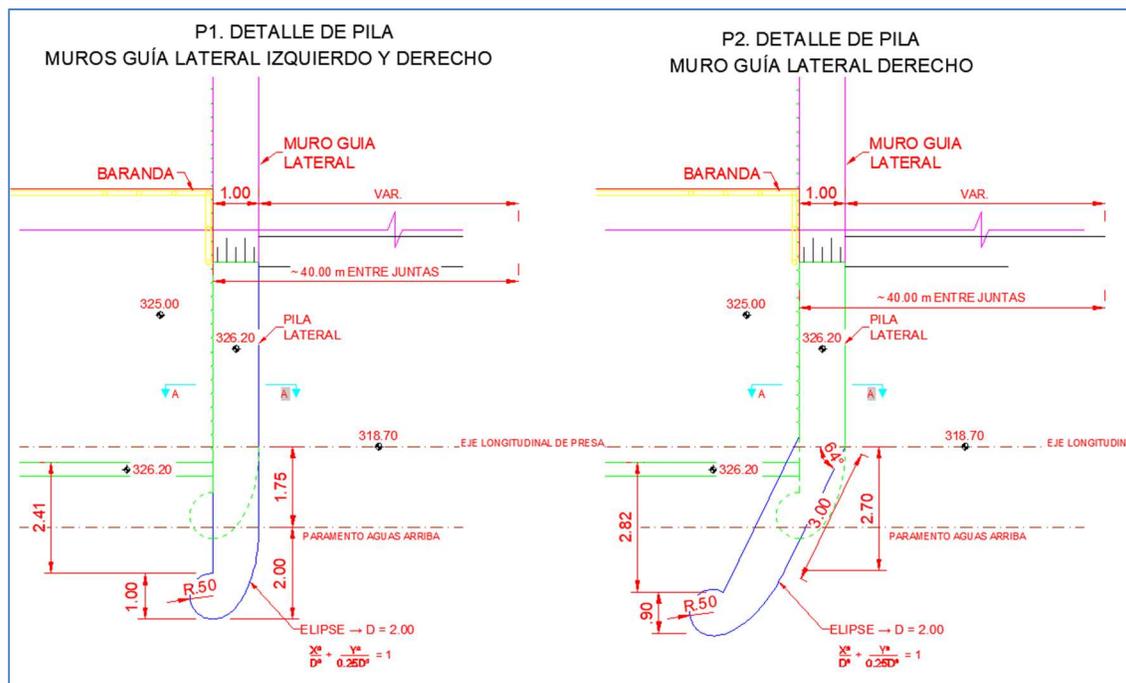


Ilustración 2. Propuesta para modificar la geometría de las pilas extremas

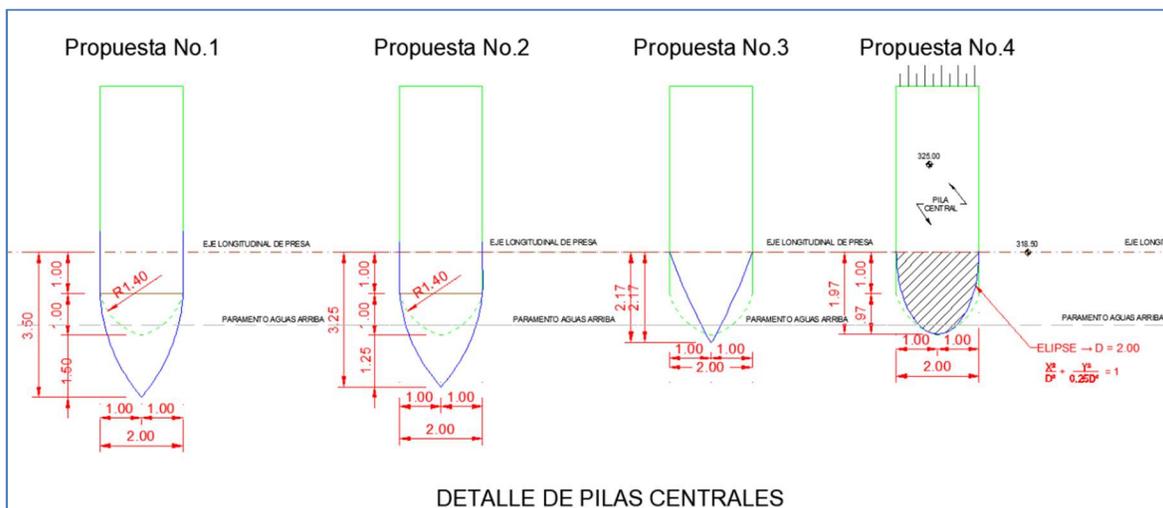


Ilustración 3. Propuesta para modificar la geometría de las pilas intermedias

Fase 2. CAPACIDAD HIDRÁULICA Y PATRÓN DEL FLUJO.

Una vez concluida la "FASE 1. CALIBRACIÓN Y ENSAYOS PRELIMINARES", en la que se verificó el funcionamiento del vertedor y corrigió el modelo de acuerdo a la geometría original, se continuó con la FASE 2, procediendo a realizar modificaciones a la geometría original del vertedor con la intención de optimizar el funcionamiento hidráulico.

Los gastos probados en esta fase fueron 1,215, 1,985, 3730, 4250 y 6010 m³/s asociados a los períodos de retorno de 2, 5, 50, 100 y 1000 años, sin haber sido limitativos.

En la tabla 1 se muestra la descripción general de las series de ensayos realizados.

Tabla 2. Series de pruebas realizadas en el modelo

SERIE	DESCRIPCIÓN
0	Fase 1. Calibración y ensayos preliminares
0.1	Ensayos y ajuste
0.2	Ensayos preliminares
I	Ensayos de evaluación del proyecto original
I.1	Ensayos con la estructura original para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s)
I.2	Ensayos con la estructura original para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s)
I.3	Ensayos con la estructura original para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s)
I.4	Ensayos con la estructura original para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s)
I.5	Ensayos con la estructura original para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s)
I.6	Ensayos con la estructura original para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s)
I.7	Ensayos con la estructura original para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s)
1	Fase 2. Ensayos de evaluación de propuestas provisionales de pilas laterales y centrales
1.1	Para gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s, Tr=2 años)
1.2	Para gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
1.3	Para gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
1.4	Para gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
1.5	Para gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
1.6	Para gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
1.7	Para gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
1.8	Para gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
1.9	Para gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
1.10	Para gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
1.11	Para gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
1.12	Para gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
1.13	Para gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
1.14	Para gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
2	Ensayos de evaluación de proyecto original con ataguía aguas abajo
2.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
2.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
2.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
2.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
2.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
2.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)

2.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
3	Ensayos con modificación en pilas marginales con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1)
3.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
3.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
3.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
3.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
3.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
3.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
3.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
4	Ensayos con modificación en pilas de la margen izquierda con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1) y modificación en la pila lateral de la margen derecha con un alargamiento de 3.0 metros para una longitud total de 5.00, con un ángulo de 64° (propuesta P2)
4.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
4.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
4.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
4.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
4.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
4.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
4.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
5	Ensayos con modificación en pilas de la margen izquierda con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1) y modificación en la pila lateral de la margen derecha con un alargamiento de 3.0 metros para una longitud total de 5.00, con un ángulo de 64° (propuesta P2) y pilas centrales con las propuestas No.1 y No.2
5.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
5.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
5.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
5.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
5.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
5.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
5.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
6	Ensayos con modificación de pilas de la margen izquierda y derecha con la propuesta P3 y modificación de las pilas centrales con la propuesta No.4.
6.1	Para un gasto de 1,215 m ³ /s (68 l/s Tr=2 años)
6.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
6.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)

6.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
6.7	Para un gasto de 6,010 m ³ /s (340 l/s, Tr=1000 años)
7	Ensayos con modificación de pilas laterales propuesta P3, modificación de pilas centrales con la propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 55°.
7.1	Para un gasto de 1,215 m ³ /s (68 l/s Tr=2 años)
7.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
7.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
7.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
7.7	Para un gasto de 6,010 m ³ /s (340 l/s, Tr=1000 años)
8	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 40°.
8.1	Para un gasto de 1,215 m ³ /s (68 l/s Tr=2 años)
8.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
8.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
8.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
8.7	Para un gasto de 6,010 m ³ /s (340 l/s, Tr=1000 años)
9	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°. Con ataguía.
9.1	Para un gasto de 1,215 m ³ /s (68 l/s Tr=2 años)
9.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
9.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
9.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
9.7	Para un gasto de 6,010 m ³ /s (340 l/s, Tr=1000 años)
10	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°. Sin Ataguía
10.1	Para un gasto de 1,215 m ³ /s (68 l/s Tr=2 años)
10.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
10.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
10.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
10.7	Para un gasto de 6,010 m ³ /s (340 l/s, Tr=1000 años)
11	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados en la cubeta del vertedor central, D1 y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Sin Ataguía.

11.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
11.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
11.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
11.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
11.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
11.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
11.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
12	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados "D1" en la cubeta del deflector central. Sin ataguía.
12.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
12.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
12.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
12.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
12.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
12.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
12.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
13	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central, con ángulo de 44° y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm y taludes aguas arriba y abajo.
13.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
13.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
13.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
13.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
13.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
13.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
13.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
14	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm con paramento vertical aguas arriba.
14.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
14.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
14.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
14.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
14.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)

14.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
14.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
15	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta, deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm con paramento vertical aguas arriba.
15.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
15.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
15.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
15.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
15.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
15.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
15.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
16	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados en la cubeta del deflector central, D2. Sin Ataguía.
16.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
16.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
16.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
16.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
16.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
16.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
16.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
17	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, y un sector de aireador en el deflector lateral. Sin ataguía.
17.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
17.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
17.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
17.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
17.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
17.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
17.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
18	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados

	"D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 22.50m de ancho.
18.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
18.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
18.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
18.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
18.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
18.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
18.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
19	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.
19.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
19.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
19.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
19.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
19.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
19.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
19.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
20	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, sin dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.
20.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
20.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
20.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
20.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
20.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
20.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
20.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
21	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central y laterales, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.
21.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
21.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
21.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
21.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)

21.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
21.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
21.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
22	Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, y modificación de la salida del deflector del vertedor izquierdo, con ángulo de 44°, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.
22.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
22.2	Para un gasto de 1985 m ³ /s (112.29 l/s, Tr= 5 años)
22.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
22.4	Para un gasto de 3045 m ³ /s (172.25 l/s, Tr=20 años)
22.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
22.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
22.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
23	Presiones en el vertedor central con el arreglo de la serie 22.
23.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
23.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
23.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
23.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
23.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
24	Presiones en el vertedor izquierdo con el arreglo de la serie 22.
24.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
24.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
24.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
24.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
24.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)
25	Presiones en el vertedor central en el muro izquierdo con el arreglo de la serie 22.
25.1	Para un gasto de 1215 m ³ /s (68.73 l/s Tr=2 años)
25.3	Para un gasto de 2520 m ³ /s (142.55l/s, Tr=10años)
25.5	Para un gasto de 3730 m ³ /s (211.0 l/s, Tr=50 años)
25.6	Para un gasto de 4250 m ³ /s (240.42 l/s, Tr=100 años)
25.7	Para un gasto de 6010 m ³ /s (339.98 l/s, Tr=1000 años)

Atendiendo a las conclusiones planteadas en la fase 1:

"En general, el vertedor presenta un flujo adecuado. Se requiere mitigar las perturbaciones generadas por los muros de aproximación marginales extendiendo su geometría hacia aguas arriba. Se observa la necesidad de formar el cuenco amortiguador mediante la ataguía aguas abajo que será utilizada para el desvío del

cauce durante la construcción de la cortina. Se observa introducción de aire al flujo al inicio del salto de ski hasta el gasto de 1985 m³/s, correspondiente a 5 años de período de retorno."

Y a los resultados esperados en la fase 2:

-Curvas de descarga del vertedero de superficie con respecto a 5 caudales definidos con Lombardi después de completar la Fase 1. Con la finalidad de realizar los ajustes necesarios a los coeficientes de descarga, se propone revisar el tránsito de la avenida en el vaso mediante la aplicación del modelo numérico TAV 1 (Tránsito de Avenidas en Vasos, desarrollado en el IMTA. Se incluye caratula del manual del usuario);

-Descripción del flujo de aproximación para 5 caudales definidos con Lombardi después de la finalización de la Fase 1, incluidas 3 geometrías diferentes de las pilas de los vertederos y muros de la rápida;

-La elevación del agua a lo largo de la rápida y en las paredes guías del vertedero para los 5 caudales definidos, incluido la posible adición de un muro guía en la mitad del vertedero central;

-Trayectoria del chorro y zonas de impacto aguas abajo de la presa para los 5 caudales definidos, incluyendo 6 geometrías del salto esquí y 2 anchos de los vertederos laterales (deflectores o vertedero convergente) que serán definidos con Lombardi finalizada la Fase 1.

En esta fase, 2, se probaron las propuestas de las pilas laterales P1, P2, P3, P4 y P5, y pilas centrales propuestas No.1, 2, 4 y 5, así como los saltos de esquí para ángulo de 55° y 40° continuo. Queda pendiente de probar el salto de esquí para un ángulo de 42° y la pila lateral P5. La ilustración 4 muestra la geometría de las propuestas mencionadas.

Al final de estas pruebas se midieron presiones en las rápidas de descarga del vertedor central y lateral margen izquierda y se realizaron mediciones del flujo en la zona de aproximación para verificar la uniformidad. La ilustración 5 muestra las secciones y ubicación donde se midieron las velocidades de aproximación, y en la ilustración 6, las secciones y ubicación de las celdas de presión en las rápidas de descarga central y margen izquierda. Es importante mencionar que las geometría y ubicaciones se definieron en común acuerdo con la empresa Lombardi.

"ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LA OBRA DE EXCEDENCIA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ARENAL ETAPA I-II."

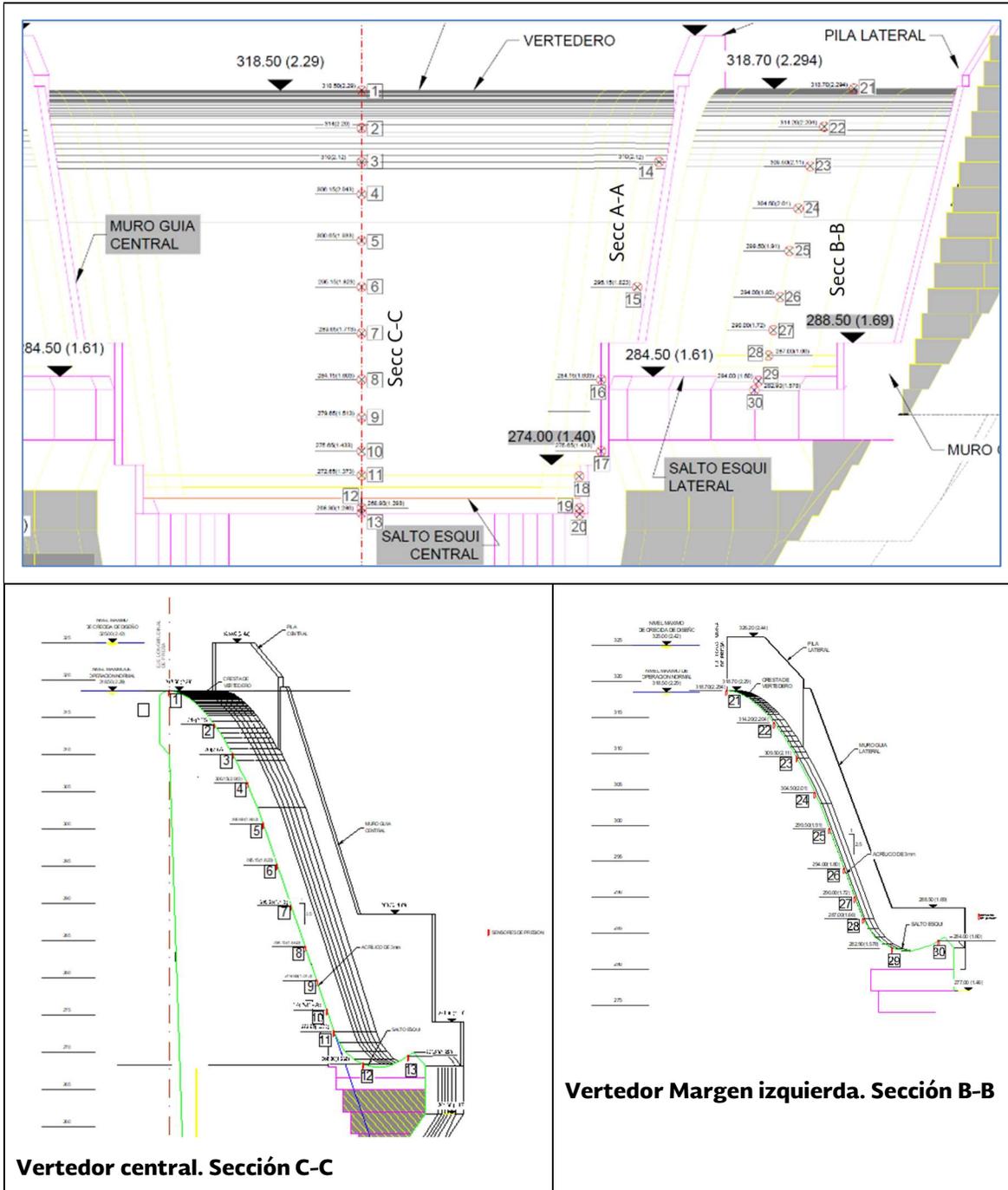


Ilustración 6. Ubicación de los sensores de presión en las rápidas de descarga del vertedor central y margen izquierda.

Serie 1.- Ensayos de evaluación de propuestas provisionales de pilas laterales y centrales

Durante la **serie "I. Ensayos de evaluación del proyecto original"** se observó una separación significativa del flujo, inducida principalmente por las pilas laterales, y debido al cambio brusco de dirección, mayor a 90°. Dicha perturbación viaja hacia aguas abajo con un comportamiento aleatorio de variación de la vena líquida, incluso con intrusión de aire repentina lo que provoca perturbaciones y salpicaduras importantes hacia el exterior de la obra.

Condiciones generales del flujo observadas en la serie 1.

En general, para todos los gastos, se observaron flujos de aproximación uniformes, sin vórtices significativos ni "ondas de choque".

Se aprecian pequeñas perturbaciones superficiales que inician en la cresta del vertedor, debidas a la contracción del flujo por a la geometría circular del eje de la cresta.

El acceso a los vertedores presenta un patrón uniforme, excepto para los dos gastos mayores, donde se aprecian contracciones importantes en las pilas a los extremos de ambas márgenes, haciendo inestable al flujo sobre la rápida de descarga mediante el cambio frecuente de la onda cruzada aguas abajo. Lo anterior genera salpicaduras considerables en ambas márgenes, principalmente en la derecha sobre la plataforma de acceso a la ventana 1.

Las perturbaciones superficiales originadas en la cresta se proyectan aguas abajo sobre la rápida de descarga, sin embargo, en general el comportamiento del flujo es uniforme en la zona de la rápida de descarga.

Para gastos hasta de 1,985 m³/s, al inicio de las cubetas deflectoras se observan "aguas blancas", lo cual es un indicio de la entrada de aire al flujo, y que el desarrollo de la capa límite alcanza esta sección. Es interesante observar este fenómeno, ya que se esperaría que la capa límite se desarrolle en la zona entre el perfil de la cresta vertedora y la rápida. La aparición de aire en el flujo en esta zona garantiza la mitigación del fenómeno de cavitación.

El flujo a la salida del cauce representado en el modelo no presenta perturbaciones importantes, esto se logró con la colocación de un umbral de elementos de concreto que generan las condiciones de frontera del cauce en esta sección.

Es importante corregir este comportamiento del flujo mediante transiciones más adecuadas.

En esta serie se colocaron en forma provisional placas de acrílico con diversos ángulos, profundidades y longitudes, mientras se observó el comportamiento del flujo. De aquí surgieron las propuestas de las pilas laterales P1 y P2 mostradas en la ilustración 4.



Fotografía. 1. Pruebas provisionales con placas de diversas geometrías, tamaños y posiciones. Margen izquierda.



Fotografía. 2. Pruebas provisionales con placas de diversas geometrías, tamaños y posiciones. Margen derecha.

Curvas de descarga del vertedero.

Para el registro de la elevación de la superficie libre del agua en el vaso se utilizó un medidor de nivel ultrasónico de nivel SIEMENS SITRANS Probe LU con rango de medición hasta 6 metros, precisión de 0.15%, frecuencia de medición 54 kHz. El medidor se configuró para un rango igual a la carga máxima sobre el vertedor de 13.3 cm, para lo cual el error máximo esperado en este rango es de 0.2 mm.



Fotografía. 3. Medidor ultrasónico de nivel de superficie libre del agua.



Fotografía. 4. Ubicación del medidor de nivel en el vaso del modelo físico.

La tabla 3 y la ilustración 7 muestra los resultados de la medición.

Tabla 3.- Resultados de la medición de niveles en el vaso y gastos de modelo y prototipo.

Periodo de retorno (Tr)	H vaso modelo (mm)	H cresta prototipo (m)	Elevación vaso	Q prototipo (m ³ /s)	Q vertedor de aforo (L/s)	Coeficiente de descarga
			(msnm)			
0.00	0.00	0.00	318.50	0.00	0.00	-----
2.00	53.00	2.65	321.15	1215.00	68.73	1.74
5.00	68.00	3.40	321.90	1985.00	112.29	1.96
10.00	78.00	3.90	322.40	2520.00	142.55	2.02
20.00	87.00	4.35	322.85	3045.00	172.25	2.08
50.00	100.00	5.00	323.50	3730.00	211.00	2.06
100.00	109.00	5.45	323.95	4250.00	240.42	2.07
1000.00	133.00	6.65	325.15	6010.00	339.98	2.17
10000.00	151.00	7.55	326.05	7745.00	438.00	2.31

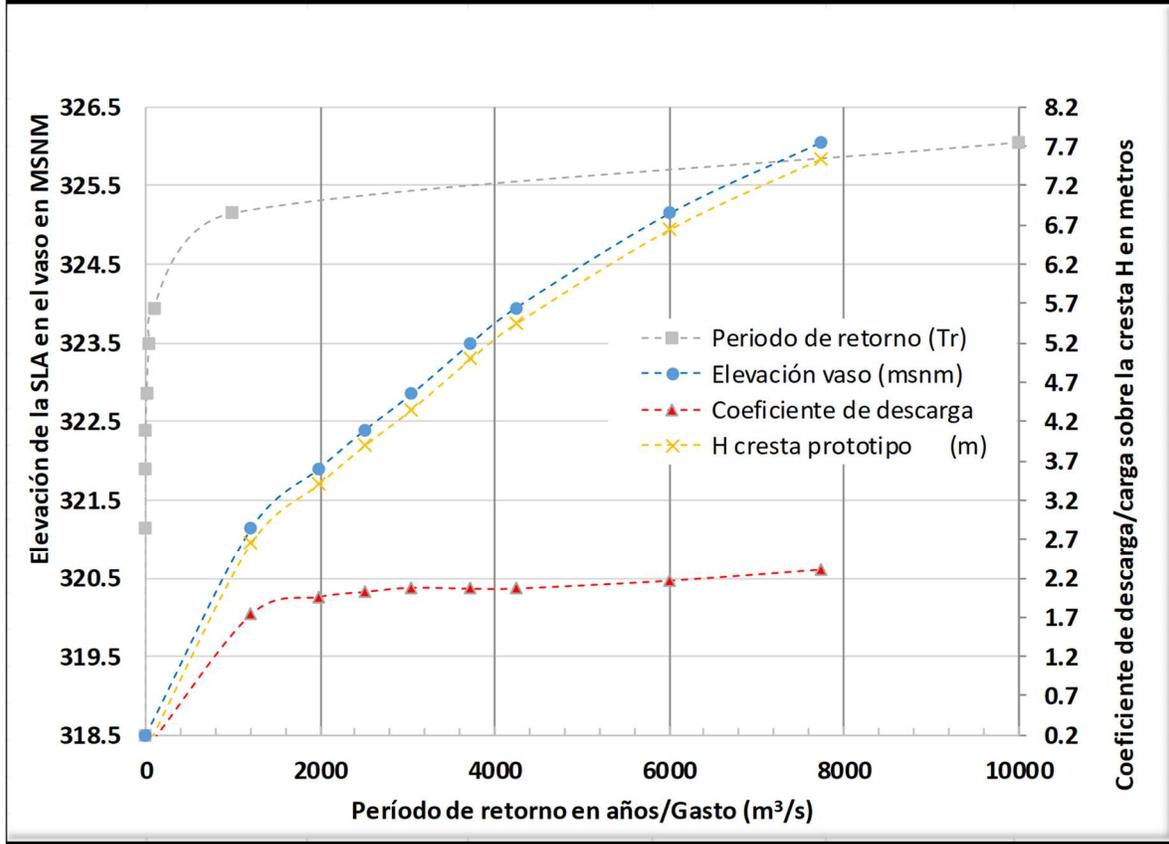


Ilustración 7. Resultados de la medición de niveles en el vaso y gastos de modelo y prototipo.

Para esta prueba, se tomó como NAMO la cresta del perfil. Es importante observar que el coeficiente de descarga se puede considerar bajo, por lo que la carga asociada al gasto de diseño aumenta, de 6.50m a 6.65m. La reducción de la eficiencia de descarga se puede atribuir a la geometría curva, en planta, del vertedor, a la distribución de las velocidades de aproximación que generan a su vez la contracción de la vena líquida vertiente. Es importante entonces, mejorar en lo posible el acceso del flujo al cimacio reduciendo la contracción provocada por las pilas.

Descripción del flujo de aproximación.

Para medir las velocidades del flujo de aproximación, el modelo se instrumentó con un medidor de flujo acústico de efecto Doppler, tipo ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), FlowTracker marca SonTek, con capacidad para medir velocidades en 2D y 3D desde 0.0001 a 4.0 m/s (0.0003 a 13 ft/s), error relativo del 1% de la velocidad medida en muestras por segundo. Los datos de velocidad pueden ser usados inmediatamente sin necesidad de correcciones post-proceso.



Fotografía. 5. Medidor ADV de velocidad.



Fotografía. 6. Medición del flujo de aproximación.

En general, el vertedor presenta un flujo de aproximación adecuado. Es posible mitigar las perturbaciones generadas por las pilas centrales y los muros de aproximación marginales mediante una geometría de transición apropiada. Las ilustraciones 8 a 13 muestran las gráficas de velocidades medidas para el gasto de diseño.

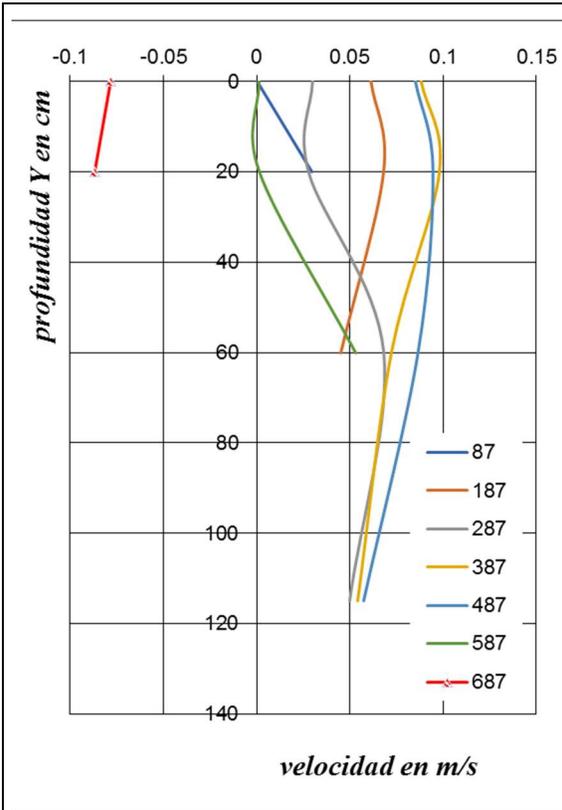


Ilustración 8. Perfil de velocidades verticales sobre la sección 1 para el gasto de diseño. La gráfica 87 cm corresponde a la margen izquierda y el 687 cm a la margen derecha.

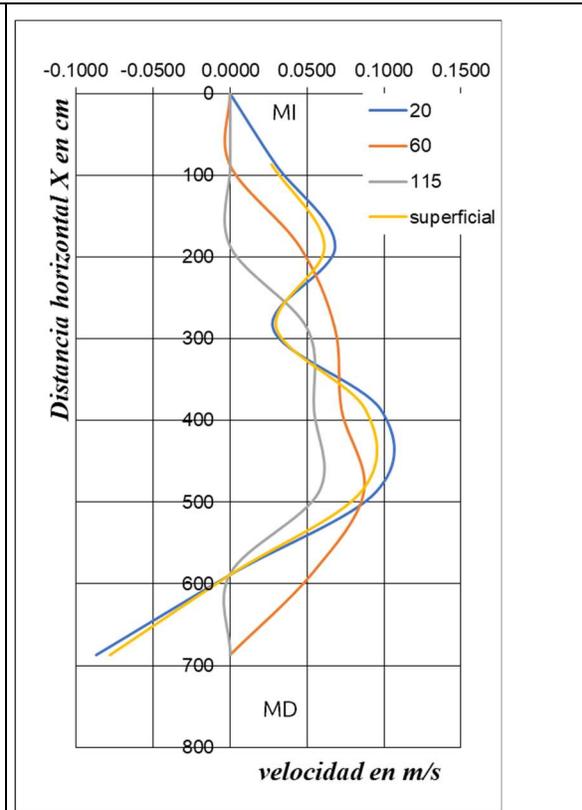
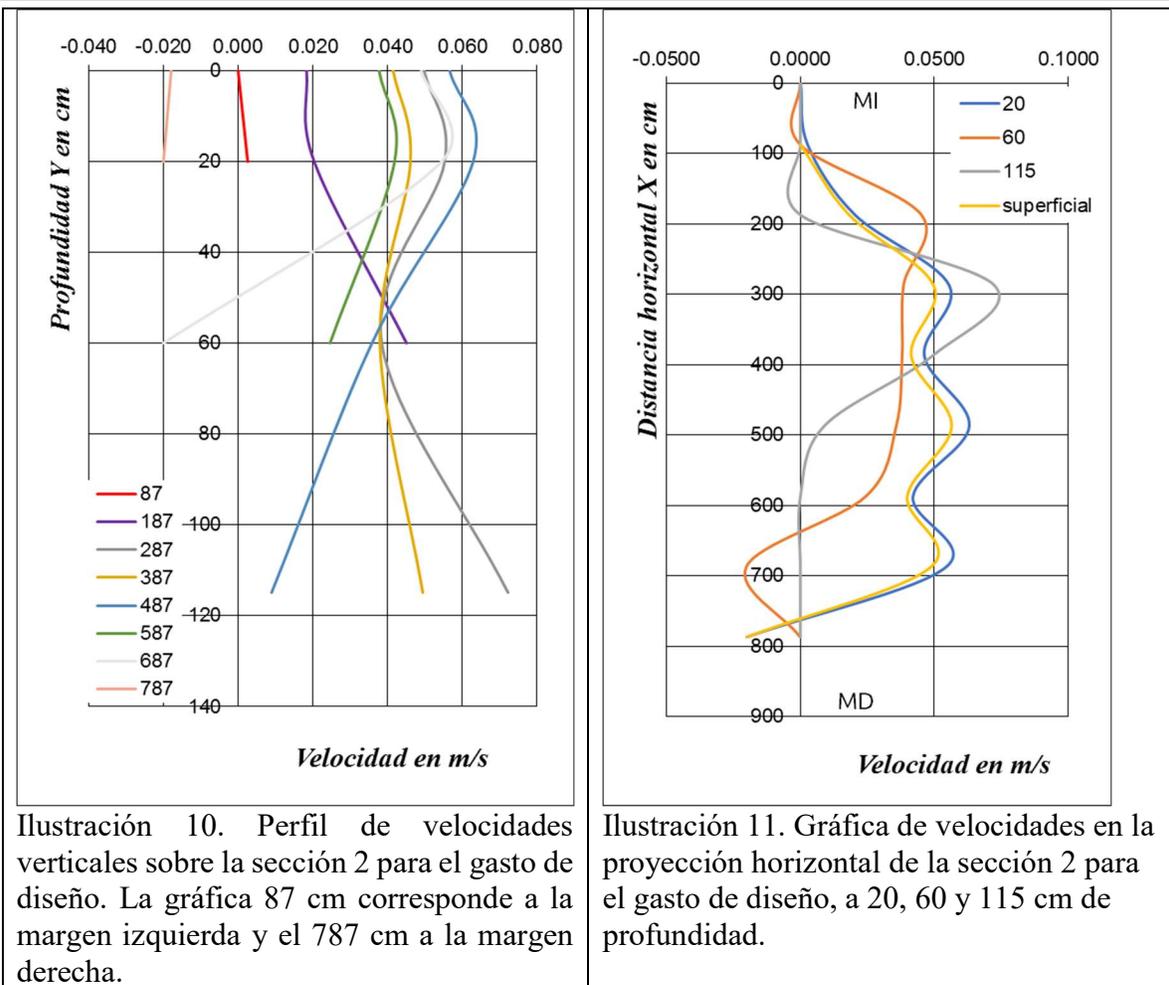


Ilustración 9. Gráfica de velocidades en la proyección horizontal de la sección 1 para el gasto de diseño, a 20, 60 y 115 cm de profundidad.

Sección 1. Se aprecian velocidades negativas (sentido opuesto del flujo general) superficiales y a 20 cm de profundidad en la margen derecha, sin embargo, para profundidades de 60 y 115 el perfil de velocidades es afectado por la topografía con todas las velocidades positivas (en el mismo sentido del flujo general). Este mismo comportamiento se observa en el modelo físico, donde se forma un flujo de recirculación en la margen derecha.



Sección 2. Se aprecian velocidades negativas (sentido opuesto del flujo general) superficiales, a 20 y a 60 cm de profundidad en la margen derecha, sin embargo, para profundidades de 115 el perfil de velocidades es afectado por la topografía con todas las velocidades positivas (en el mismo sentido del flujo general). Este mismo comportamiento se observa en el modelo físico, donde se forma un flujo de recirculación en la margen derecha.

Sección 3. No se aprecian velocidades negativas (sentido opuesto del flujo general). En la margen derecha, a 60 cm de profundidad la velocidad es prácticamente nula, lo que indica que el flujo se estanca. Este mismo comportamiento se observa en el modelo físico, mediante un trazador de color. Lo anterior acelera el flujo superficial en la llegada al cimacio.

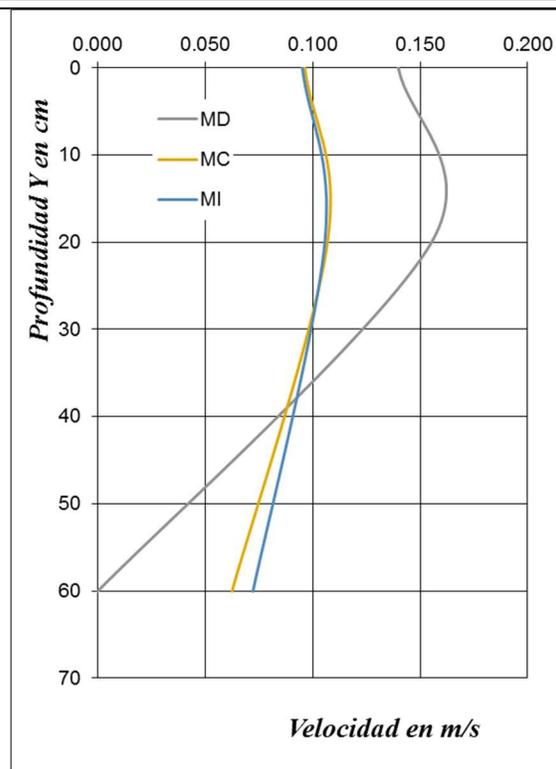


Ilustración 12. Perfil de velocidades verticales sobre la sección 3. La gráfica MI corresponde a la margen izquierda y MD a la margen derecha.

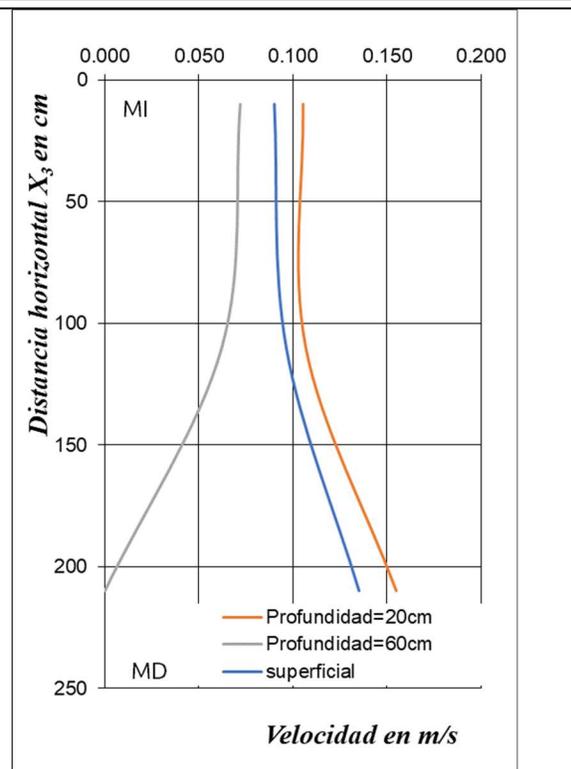


Ilustración 13. Gráfica de velocidades en la proyección horizontal de la sección 3, a 20 y 60 cm de profundidad.

El flujo de aproximación, como una condición de frontera, se observa sin perturbaciones importantes provocadas por la alimentación del modelo, las velocidades mayores se presentan a la profundidad de 20 cm y en la superficie con magnitudes hasta de 17 cm/s (120cm/s en prototipo), lo cual es de esperarse debido a la descarga superficial del vertedor. Las formas de los perfiles de velocidades son también semejantes a los comúnmente observados en la naturaleza, con la afectación de acuerdo a la topografía del vaso en la llegada del flujo.

Un cálculo de la velocidad media esperada en la aproximación del flujo puede estimarse considerando el área media de aproximación en el vaso ($P=93\text{m}$ $B=271\text{m}$) y gasto de diseño $6010\text{ m}^3/\text{s}$, $A_m=93 \times 271 / 2 = 12,601.5\text{m}^2$, $V_m=0.48\text{m/s}$, que es mayor a la media medida en la sección 2 del modelo (0.35m/s).

La condición del flujo de aproximación es tangencial al cimacio, debido a la ubicación de la cortina respecto al eje del cauce, genera perturbaciones importantes, ya que proyecta estelas de vórtices tras las pilas, los cuales son arrastrados aguas abajo del vertedor, sin embargo, las patrones de velocidad se distorsionan considerablemente debido a la influencia de la topografía a la llegada.

Presiones dinámicas en la rápida de descarga para la geometría original

Para estas pruebas se utilizaron celdas de presión de alta precisión marca Keller Preciseline rango de 0 a 2PSIG/4-20mA+RS485/op02/0.1% error total en todo el rango.



Fotografía. 7. Celda de presión Keller Preciseline.



Fotografía. 8. Arreglo de las celdas de presión.

Las celdas de presión se colocaron de acuerdo a las posiciones mostradas en la ilustración 6 durante la serie 1.

Las ilustraciones 14 a la 19 muestran los resultados de la medición por cada uno de los piezómetros y todas las series, y el perfil de presiones para cada serie, considerando que la línea de referencia "cero" es el perfil del fondo del vertedor.

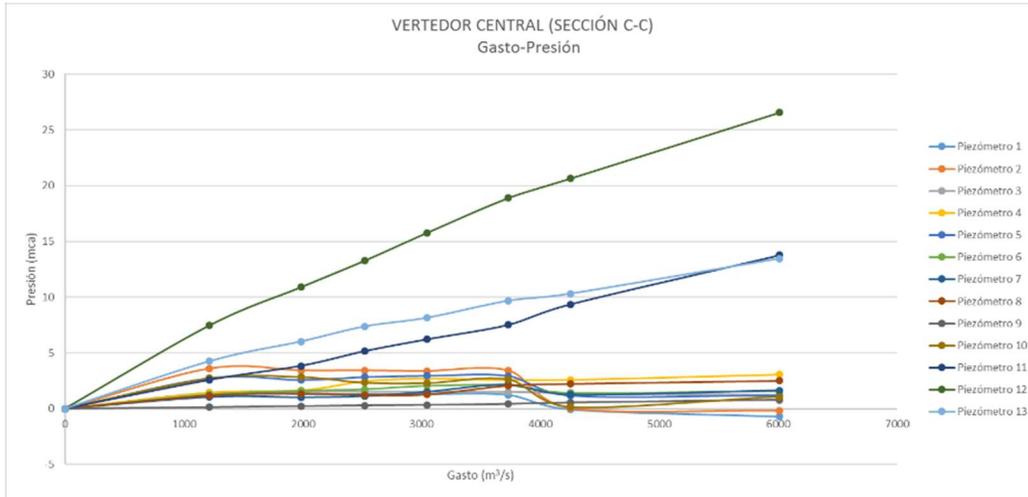


Ilustración 14. Resultados de presiones medidas en la sección C-C, en el eje del vertedor central. Magnitud de prototipo.

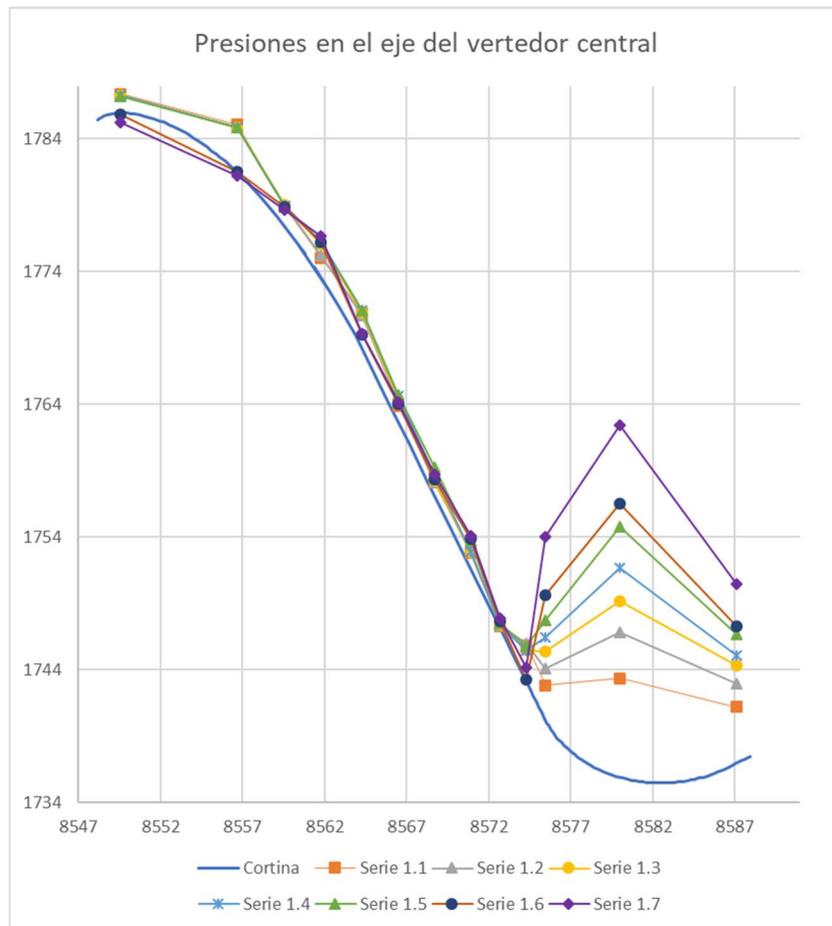


Ilustración 15. Perfil de resultados de presiones medidas en la sección C-C, en el eje del vertedor central. Magnitud de prototipo.

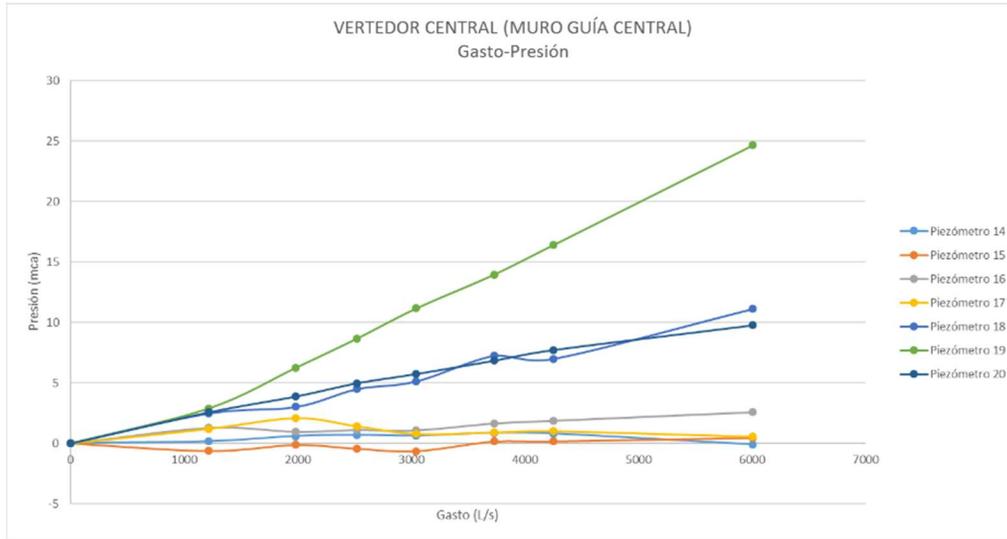


Ilustración 16. Resultados de presiones medidas en la sección A-A, en el muro guía del vertedor central. Magnitud de prototipo.

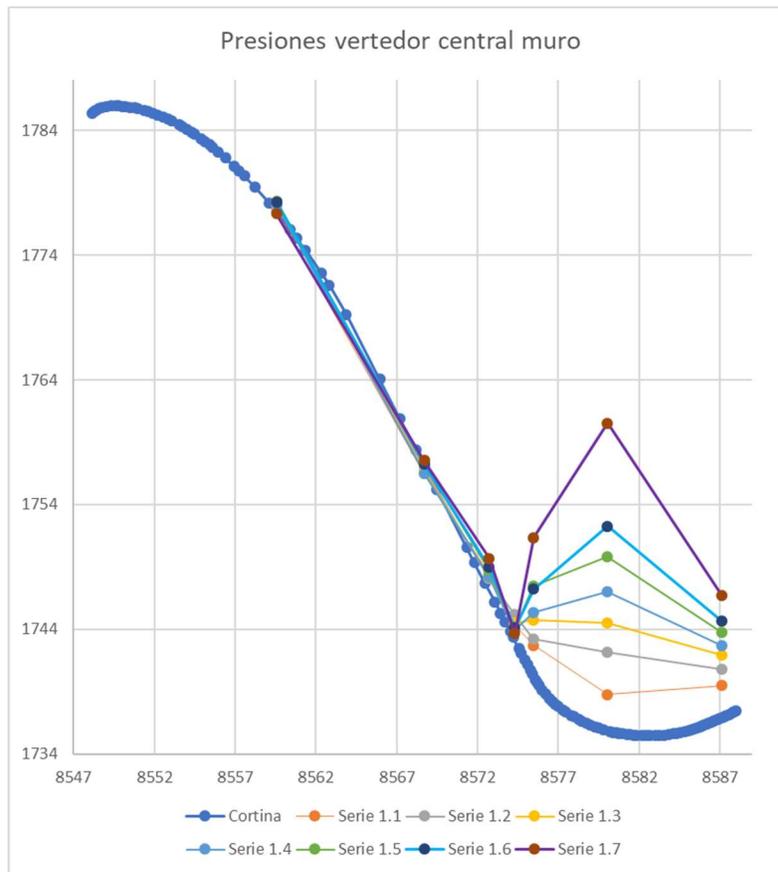


Ilustración 17. Perfil de resultados de presiones medidas en la sección A-A, en el muro guía del vertedor central. Magnitud de prototipo.

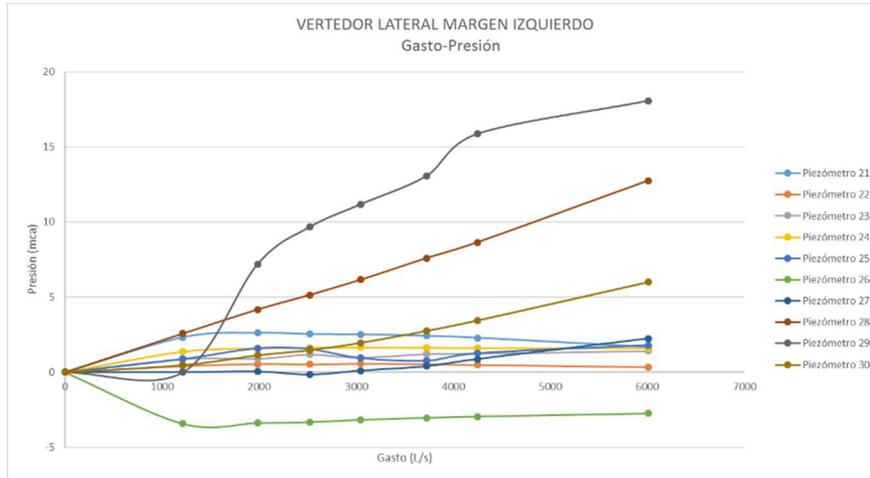


Ilustración 18. Resultados de presiones medidas en la sección B-B, en el eje del vertedor de la margen izquierda. Magnitud de prototipo

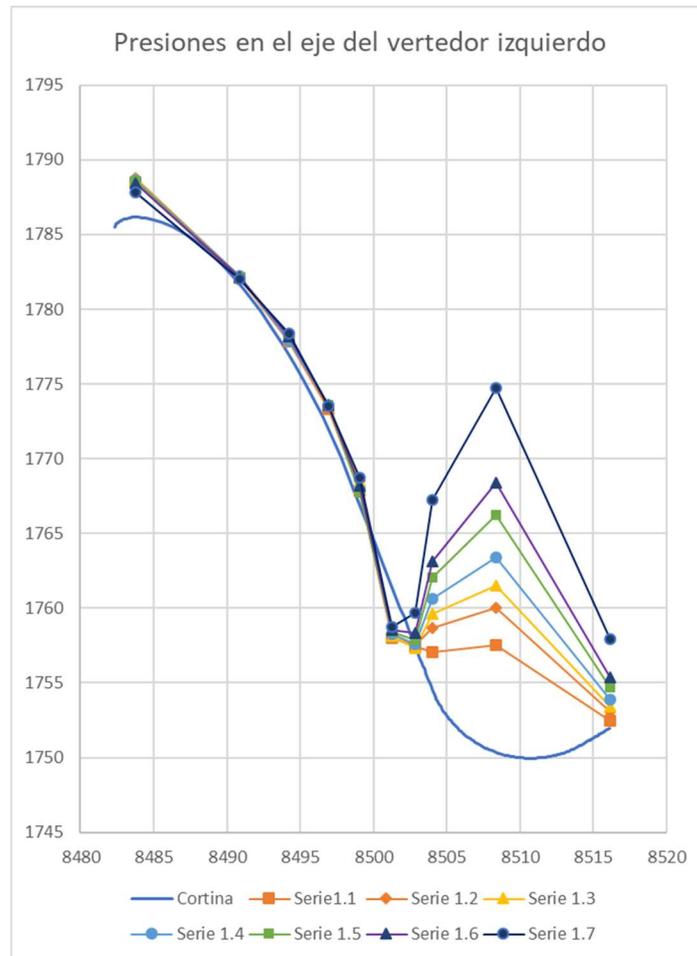


Ilustración 19. Perfil de resultados de presiones medidas en la sección B-B, en el eje del vertedor de la margen izquierda. Magnitud de prototipo.

Las magnitudes positivas mayores corresponden a los piezómetros ubicados dentro de la cubeta deflectora (11, 12, 13, 18, 19, 20, 28, 29 y 30). Las gráficas con comportamiento constante en las primeras pruebas, y que tienden a bajar, corresponden a puntos sobre la rápida de descarga, mientras que las presiones negativas se presentan en los puntos ubicados sobre la cresta y al final de la rápida, asociado a la perturbación provocada por la separación del flujo originada en las pilas, principalmente en la margen izquierda (piezómetro 26). Los valores de las presiones negativas están por debajo de los críticos (-3.428mca). Sin embargo, es importante investigar la relación entre la perturbación generada en la pila lateral M.I. con las presiones negativas.

Serie 1.1. Gasto 1,215m³/s.



Fotografía. 9. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. Q=1,215m³/s



Fotografía. 10. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. Q=1,215m³/s



Fotografía. 11. Contracciones más pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. Q=1,215m³/s



Fotografía. 12. Contracciones más pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. Q=1,215m³/s



Fotografía. 13. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 14. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$

Las observaciones de la serie 1.1 se apegan a la descripción de las condiciones generales del comportamiento descritas al inicio del capítulo, con pequeñas salpicaduras en el portal de la ventana de operación 1.

Serie 1.2. Gasto $1,985\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 15. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 16. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 17. Contracciones más pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 18. Contracciones más pronunciadas del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 19. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



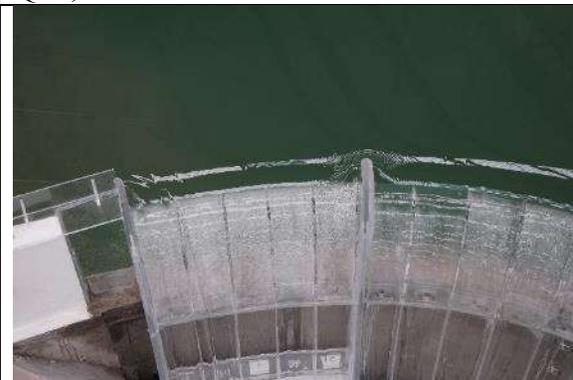
Fotografía. 20. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$. Se simula la disipación de energía en el cauce.

Las observaciones de la serie 1.2 se apegan a la descripción de las condiciones generales del comportamiento descritas al inicio del capítulo, como se muestra en las fotografías 15 a la 20. El punto de inyección se encuentra prácticamente en la sección de tangencia entre la rápida y las cubetas deflectoras

Serie 1.5. Gasto $3,730\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 21. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 22. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 23. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 24. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 25. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$. La perturbación alcanza la sección final del cauce en el modelo.

Las observaciones de la serie 1.5 se apegan a la descripción de las condiciones generales del comportamiento descritas al inicio del capítulo, como se muestra en las fotografías 21 a la 25, excepto que no se observa la intrusión de aire al flujo al deflector.

Las perturbaciones de los chorros alcanzan la sección final del cauce representado en el modelo, significado de que no se tiene una disipación completa de la energía residual. Esto podría ocasionar socavación, dependiendo del tipo de suelo existente. Es entonces evidente la necesidad de colocar la ataguía para conformar el cuenco amortiguador.

Serie 1.7. Gasto $6,010\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 26. La aproximación del flujo del vaso se aprecia en forma uniforme, sin vorticidad apreciable ni velocidades excesivas. Se observan perturbaciones superficiales pequeñas debidas a la contracción del flujo por la geometría circular del eje de la cresta. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 27. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen derecha. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 28. Se incrementan las contracciones del flujo en el muro de aproximación de la margen izquierda. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 29. Proyección de los chorros a la salida de los deflectores. Se observa el choque y disipación de energía en forma natural. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 30. Comportamiento del flujo al final del cauce representado en el modelo. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$. La perturbación alcanza la sección final del cauce en el modelo.

Las observaciones de la serie 1.7 se apegan a la descripción de las condiciones generales del comportamiento descritas al inicio del capítulo, excepto que no se observa la intrusión de aire en el flujo del vertedor.

Las perturbaciones de los chorros alcanzan la sección final del cauce representado en el modelo, significado de que no se tiene una disipación completa de la energía residual. Esto podría ocasionar socavación, dependiendo del tipo de suelo existente. Es entonces evidente la necesidad de colocar la ataguía para conformar el cuenco amortiguador. La salpicadura en la plataforma de la ventana 1 se incrementa considerablemente, consecuencia de la perturbación intermitente provocada por la contracción del flujo en los muros de aproximación marginales de los vertedores laterales. Es importante señalar que los gastos unitarios en el cimacio y al final de los saltos de ski son de 37.18 y 56.41 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, respectivamente, esto es un índice importante para considerar en el diseño.

Se observan fuertes salpicaduras y alcance del agua a la ventana 1 y su camino de acceso a partir del gasto de 3730 asociado a un período de retorno de 50 años

Conclusiones y recomendaciones de la serie 1.

En general, el vertedor presenta un flujo adecuado. Es posible mitigar las perturbaciones generadas por los muros de aproximación marginales mediante la modificación de sus geometrías. Se observa la necesidad de formar el cuenco amortiguador mediante la ataguía aguas abajo que será utilizada para el desvío del cauce durante la construcción de la cortina.

Las pilas inducen efectos importantes al flujo lo cual provoca separación del flujo con ondas inestables que al variar producen perturbaciones y salpicaduras que afectan el camino de acceso y la plataforma de operación de la obra de toma (ventana 1). Se requiere probar perfiles con forma hidrodinámica y longitudes más adecuadas, de acuerdo a las propuestas mostradas en la ilustración 1. Para el gasto de diseño

asociado a un TR=1000 años, el nivel del agua en el vaso rebosa el nivel de la corona de las pilas entre 1 y 2 mm en modelo, 5 a 10 cm en prototipo.

La confluencia de los chorros de descarga de los deflectores choca parcialmente en el aire, sin embargo, para gastos mayores cercanos al de diseño, podría incrementarse la intensidad del choque provocando mayor disipación de energía. Para esto es necesario incrementar el ángulo de despegue del vertedor central con las geometrías propuestas en la ilustración 1.

Serie 2.- Ensayos de evaluación de proyecto original con ataguía aguas abajo

Se colocó la ataguía de aguas abajo diseñada como parte de la obra de desvío la cual se pretende aprovechar para formar el cuenco amortiguador. Se formó simulando una sección trapecial escalonada simétrica de 3.15m de ancho en la corona y escalones de 1.75 m de huella por un metro de peralte para taludes de 1.75:1, para una altura total aproximada de 10 metros.

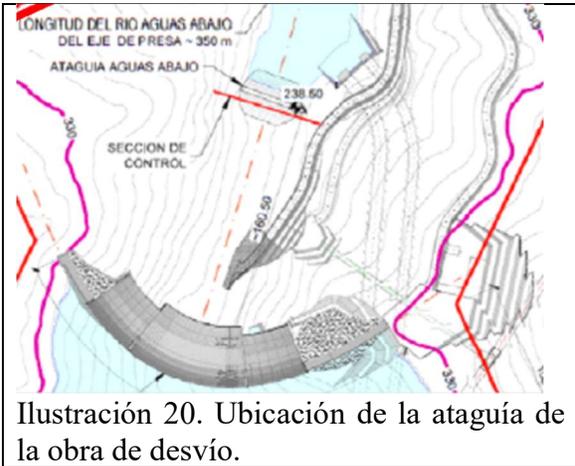


Ilustración 20. Ubicación de la ataguía de la obra de desvío.

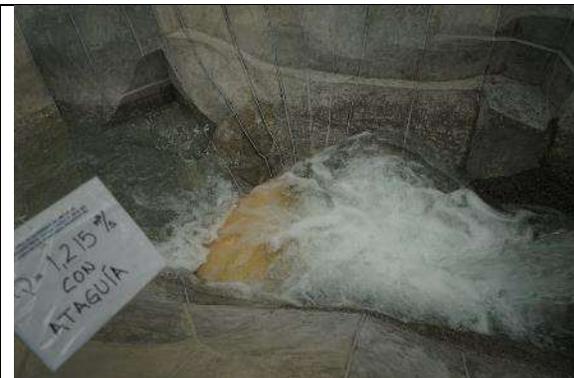


Fotografía. 31. Colocación de la ataguía en el modelo.

Serie 2.1. Gasto $1,215\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 32. Ingreso de los chorros al cuenco amortiguador. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$



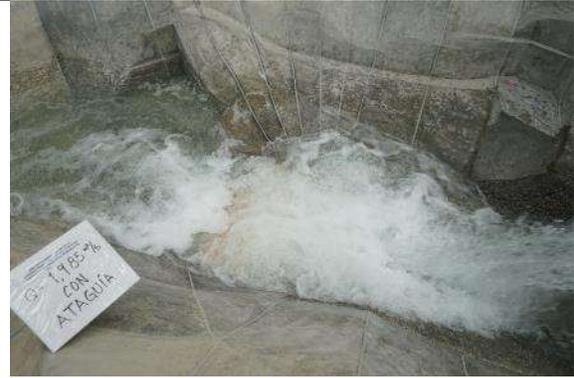
Fotografía. 33. Alcance de los chorros a la cara aguas arriba de la ataguía. $Q=1,215\text{m}^3/\text{s}$

Se aprecia que los chorros ingresan al cuenco prácticamente al pie de la ataguía, por lo que parte de la energía hidrodinámica del flujo golpea cerca de la estructura.

Serie 2.2. Gasto $1,985\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 34 Ingreso de los chorros al cuenco amortiguador. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 35. Alcance de los chorros a la cara aguas arriba de la ataguía. $Q=1,985\text{m}^3/\text{s}$

Se aprecia que los chorros ingresan al cuenco prácticamente al pie de la ataguía, la energía hidrodinámica residual del flujo golpea cerca de la estructura.

Serie 2.5. Gasto $3,730\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 36. Ingreso de los chorros al cuenco amortiguador. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 37. Alcance de los chorros a la cara aguas arriba de la ataguía. $Q=3,730\text{m}^3/\text{s}$

Serie 2.7. Gasto $6,010\text{m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 38. Ingreso de los chorros al cuenco amortiguador. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$



Fotografía. 39. Alcance de los chorros a la cara aguas arriba de la ataguía. $Q=6,010\text{m}^3/\text{s}$

Las perturbaciones de los chorros rebasan la ataguía y alcanzan la sección final del cauce representado en el modelo, por lo que no se tiene una disipación completa de la energía residual. Esto podría ocasionar socavación, dependiendo del tipo de suelo existente.

Es evidente que el cuenco amortiguador formado con la ataguía no es suficiente para disipar la energía residual. La inundación en la plataforma de la ventana 1 y su camino de acceso se incrementa considerablemente, consecuencia del relamido causado por el impacto de los chorros sobre el agua acumulada en el cuenco.

Conclusiones y recomendaciones de la serie 2.

La perturbación generada por la caída de los chorros dentro del cuenco alcanza el camino y la plataforma de acceso a la Ventana 1 en forma casi permanente con fuertes oleajes.

Con la finalidad de disipar en mayor grado la energía residual, se plantea probar diversos ángulos en el deflector central, buscando el más conveniente para lograr un choque de los chorros en el aire para hacer más eficiente la disipación de energía.

Se observan fuertes salpicaduras y alcance del agua a la ventana 1 y su camino de acceso a partir del gasto de 3730 asociado a un período de retorno de 50 años.

Para el gasto de diseño asociado a un $TR=1000$ años, el nivel del agua en el vaso rebosa el nivel de la corona de las pilas entre 1 y 2 mm en modelo, 5 a 10 cm en prototipo.

Serie 3.- Ensayos con modificación en pilas marginales con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1).

Se extendieron las pilas laterales 1.75m en forma recta manteniendo la misma forma de la nariz hasta una profundidad de 13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original.

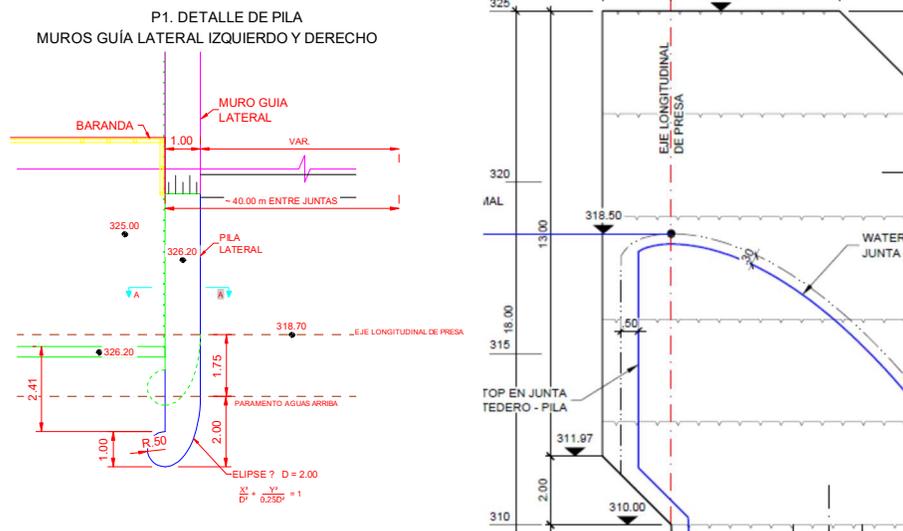
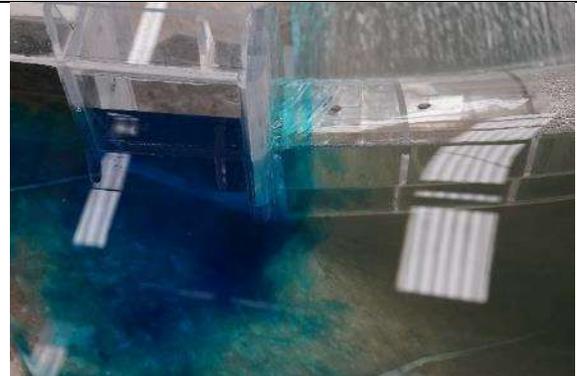


Ilustración 21. Vista en planta y perfil de la geometría de modificación de pilas laterales propuesta. Serie 3.



Fotografía. 40. Pila colocada en la margen izquierda para la serie 3.



Fotografía. 41. Funcionamiento hidráulico de la pila margen izquierda para un gasto asociado a un período de retorno de 2 años



Fotografía. 42. Funcionamiento hidráulico de la pila margen derecha para un gasto asociado a un período de retorno de 50 años



Fotografía. 43. Funcionamiento hidráulico de la pila margen izquierda para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años

En ambas márgenes se observa separación importante de flujo para el gasto de diseño ($T_r=1000$ años), lo cual provoca salpicaduras serias en la ventana 1 y su camino de acceso. Para períodos de retorno menores la contracción y sus efectos se reducen.

Para el gasto de diseño asociado a un $TR=1000$ años, el nivel del agua en el vaso rebosa el nivel de la corona de las pilas entre 1 y 2 mm en modelo, 5 a 10 cm en prototipo.

La perturbación generada por la caída de los chorros dentro del cuenco alcanza el camino y la plataforma de acceso a la Ventana 1 en forma casi permanente con fuertes oleajes.

Serie 4.- Ensayos con modificación en pilas de la margen izquierda con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1) y modificación en la pila lateral de la margen derecha con un alargamiento de 3.0 metros para una longitud total de 5.00, con un ángulo de 64° (propuesta P2).

Se extendió la pila de la margen derecha 1.75m en forma recta con un ángulo de aproximación de 64° , manteniendo la misma forma de la nariz hasta una profundidad de 13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original. La propuesta P1 se conservó para la margen izquierda.

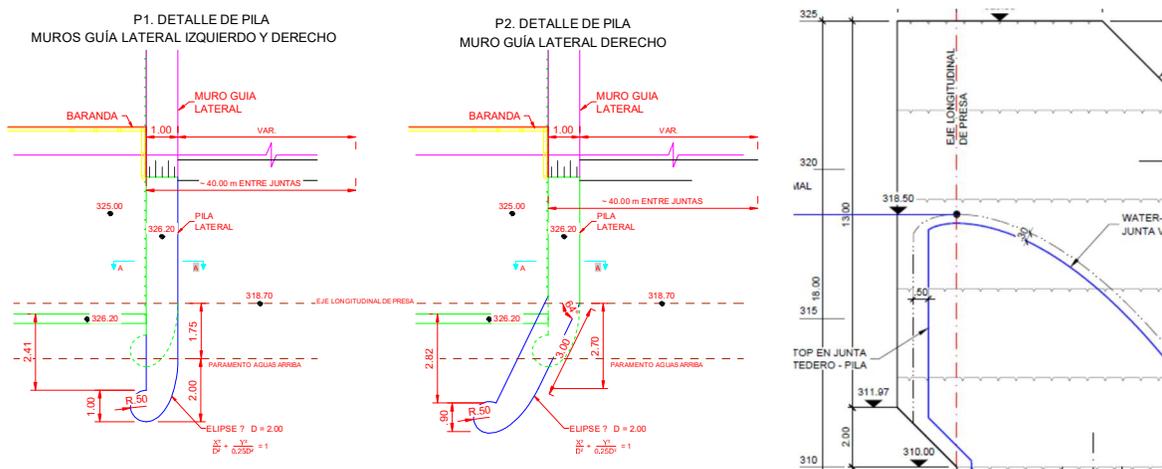


Ilustración 22. Vista en planta y perfil de la geometría de modificación de pilas laterales propuesta para la serie 4.



Fotografía. 44. Pila colocada en la margen derecha para la serie 4.



Fotografía. 45. Funcionamiento hidráulico de la pila margen derecha para un gasto asociado a un período de retorno de 2 años



Fotografía. 46. Funcionamiento hidráulico de la pila margen derecha para un gasto asociado a un período de retorno de 20 años



Fotografía. 47. Funcionamiento hidráulico de la pila margen derecha para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años

En ambas márgenes se observa separación importante de flujo para el gasto de diseño ($Tr=1000$ años), lo cual provoca salpicaduras serias en la ventana 1 y su camino de acceso. Para períodos de retorno menores la contracción y sus efectos se reducen.

La perturbación generada por la caída de los chorros dentro del cuenco alcanza el camino y la plataforma de acceso a la Ventana 1 en forma casi permanente con fuertes oleajes.

Se observan fuertes salpicaduras y alcance del agua a la ventana 1 y su camino de acceso a partir del gasto de 3730 asociado a un período de retorno de 50 años.

Para el gasto de diseño asociado a un $TR=1000$ años, el nivel del agua en el vaso rebosa el nivel de la corona de las pilas entre 1 y 2 mm en modelo, 5 a 10 cm en prototipo.

Serie 5.- Ensayos con modificación en pilas de la margen izquierda con un alargamiento de 1.75 metros para una longitud total de 3.75, sin modificar el ángulo (propuesta P1) y modificación en la pila lateral de la margen derecha con un alargamiento de 3.0 metros para una longitud total de 5.00, con un ángulo de 64° (propuesta P2) y pilas centrales con las propuestas No.1 y No.2.

Se extendió la pila de la margen derecha 3.00m en forma recta con un ángulo de aproximación de 64°, manteniendo la misma forma de la nariz hasta una profundidad de 13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original. La propuesta P1 se conservó para la margen izquierda.

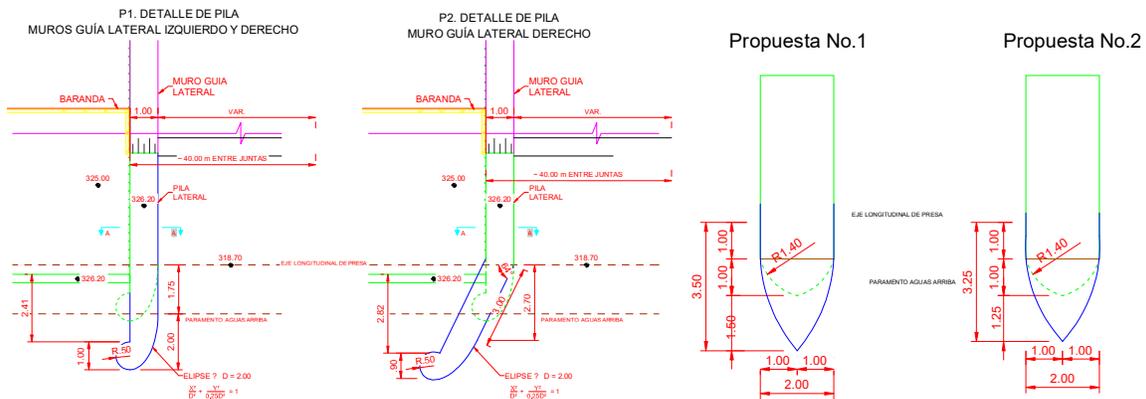


Ilustración 23. Vista en planta de la geometría de modificación de pilas laterales y centrales propuestas para la serie 5.



Fotografía. 48. Pila colocada en la margen derecha para la serie 5.



Fotografía. 49. Funcionamiento hidráulico de la pila margen derecha para un gasto asociado a un período de retorno de 2 años



Fotografía. 50. Funcionamiento hidráulico de la pila margen derecha para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 51. Funcionamiento hidráulico de la pila central P1 para un gasto asociado a un período de retorno de 10 años



Fotografía. 52. Funcionamiento hidráulico de las pilas centrales P1 y P2 para el gasto de diseño asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 53. Funcionamiento hidráulico de las pilas centrales P1 y P2 para el gasto de diseño asociado a un período de retorno de 1000 años

En ambas márgenes se observa separación importante de flujo para el gasto de diseño ($Tr=1000$ años), lo cual provoca salpicaduras serias en la ventana 1 y su camino de acceso. Para períodos de retorno menores la contracción y sus efectos se reducen.

La proyección de las pilas centrales más allá del paramento de aguas arriba, produce una estela mayor hacia la margen izquierda, lo anterior debido a que el flujo de llegada sigue una dirección casi tangente a dicho paramento como se muestra en el capítulo de la Fase 1, Serie I. Calibración y Ensayos Preliminares, *Descripción del flujo de aproximación*. Por lo anterior, se propone reducir la longitud de la pila en lo posible. Las propuestas para las pilas centrales 4 y 5 corresponden precisamente a esta idea.

Para el gasto de diseño asociado a un $TR=1000$ años, el nivel del agua en el vaso rebaza el nivel de la corona de las pilas entre 1 y 2 mm en modelo, 5 a 10 cm en prototipo.

La perturbación generada por la caída de los chorros dentro del cuenco alcanza el camino y la plataforma de acceso a la Ventana 1 en forma casi permanente con fuertes oleajes.

Se observan fuertes salpicaduras y alcance del agua a la ventana 1 y su camino de acceso a partir del gasto de 3730 asociado a un período de retorno de 50 años.

Serie 6.- Ensayos con modificación de pilas de la margen izquierda y derecha con la propuesta P3 y modificación de las pilas centrales con la propuesta No.4.

Se modificaron las pilas marginales con la propuesta P3 y centrales propuesta no.4 mostradas en la siguiente ilustración, hasta una profundidad de 13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original.

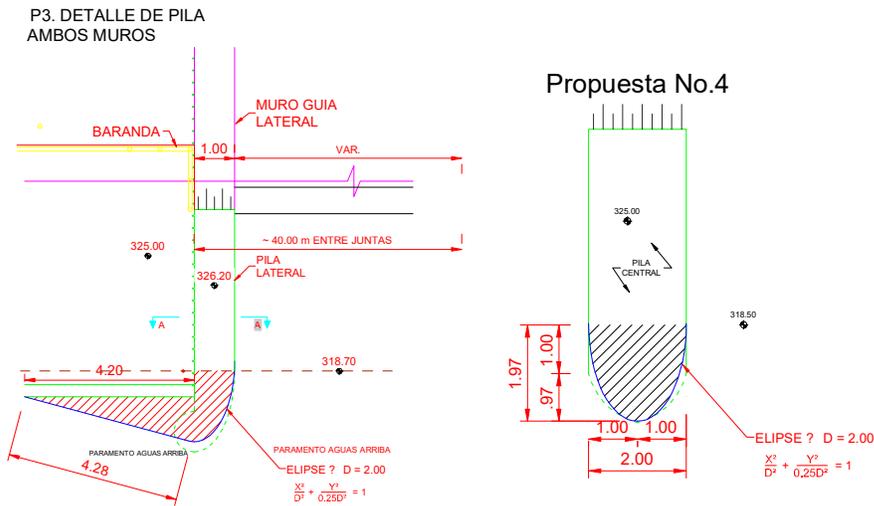


Ilustración 24. Vista en planta de la geometría de modificación de pilas laterales y centrales propuestas para la serie 6.



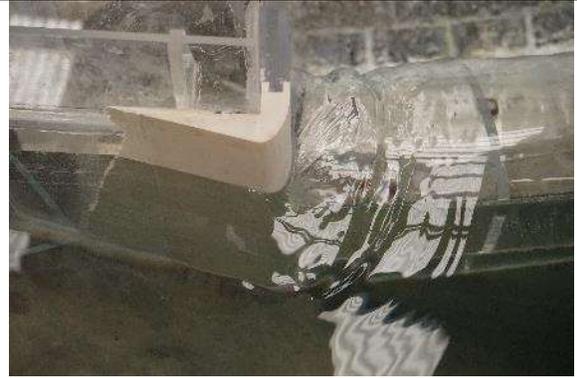
Fotografía. 54. Geometría de Pilas laterales P3 colocada para la serie 6.



Fotografía. 55. Geometría de Pilas centrales P4 colocada para la serie 6



Fotografía. 56. Funcionamiento hidráulico de la pila central P4 para un gasto asociado a un período de retorno de 20 años



Fotografía. 57. Funcionamiento hidráulico de la pila lateral P3 para un gasto asociado a un período de retorno de 20 años



Fotografía. 58. Funcionamiento hidráulico de la pila lateral P3 y central P4, margen derecha para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 59. Funcionamiento hidráulico de la pila lateral P3 y central P4, margen izquierda para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 60. Alcance del agua a la ventana 1 y camino de acceso para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 61. Coque de los chorros en el aire para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años

La separación del flujo para el gasto de diseño ($Tr=1000$ años) disminuyen tanto para las pilas laterales y centrales, sin embargo, prevalecen salpicaduras serias en la ventana

1 y su camino de acceso. Para períodos de retorno menores la contracción y sus efectos se reducen.

A pesar de la formación del cuenco amortiguador mediante la ataguía aguas abajo, la perturbación generada por la caída de los chorros dentro del cuenco alcanza el camino y la plataforma de acceso a la Ventana 1 en forma casi permanente con fuertes oleajes.

Se observan fuertes salpicaduras y alcance del agua a la ventana 1 y su camino de acceso a partir del gasto de 3730 asociado a un período de retorno de 50 años, producido principalmente por el golpe del agua al caer en el cauce.

Con la finalidad de reducir la energía residual de los chorros, es importante intentar que el chorro central choque en forma más franca y completa con los laterales, por lo que se propone modificar el ángulo de salida a 55° desde el labio del deflector central para la serie 7.

Serie 7.- Ensayos con modificación de pilas laterales propuesta P3, modificación de pilas centrales con la propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 55°.

Se mantienen las pilas marginales con la propuesta P3 y centrales propuesta no.4 mostradas en la ilustración que se muestra a continuación, hasta una profundidad de 13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original. Se modificó el ángulo de salida del labio del deflector central de 30° a 55°.

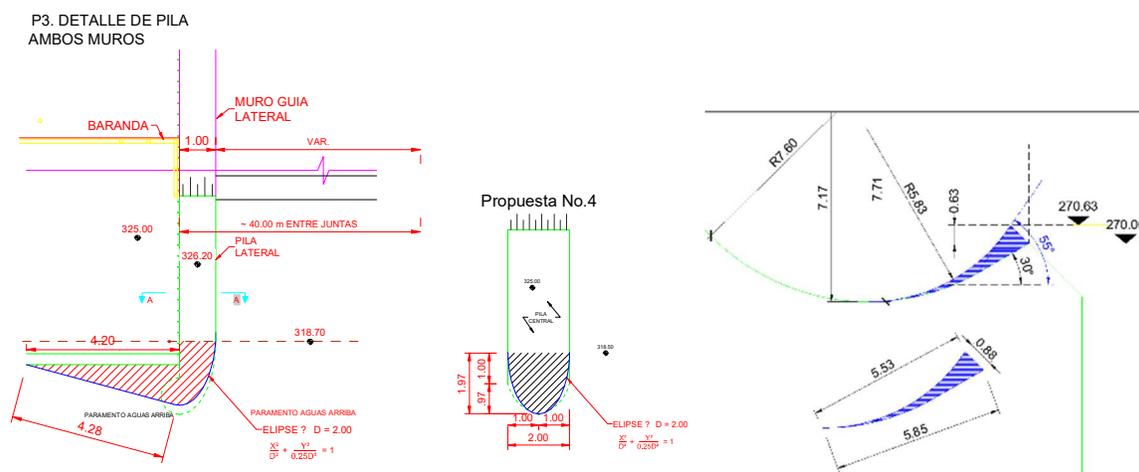


Ilustración 25. Vista en planta de la geometría de modificación de pilas laterales y centrales, y modificación del labio del deflector central propuestas para la serie 7.



Fotografía. 62. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 63. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.



Fotografía. 64. Funcionamiento hidráulico de la caída al cauce del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.



Fotografía. 65. Funcionamiento hidráulico de la caída al cauce del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.

Se logra hacer que los tres chorros se golpeen en el aire con una importante disipación de energía. Pero la ventana 1 y su camino de acceso continúan siendo alcanzados por el nivel del agua abajo.

Se logró recortar el alcance horizontal de los chorros, sin embargo, se aprecia que al caer francamente sobre el tanque amortiguador con agua, genera el movimiento de ondas hacia la ventana 1 y su camino de acceso.

Con la intención de evitar el cambio del radio de la cubeta deflectora, se propone que la modificación del ángulo sea a 40° , esta modificación se probó en la serie 8.

Serie 8.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 40° .

Se mantienen las pilas marginales con la propuesta P4 y centrales propuesta no.4 mostradas en la ilustración que se muestra a continuación, hasta una profundidad de

"ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LA OBRA DE EXCEDENCIA DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ARENAL ETAPA I-II."

13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original. Se modificó el ángulo de salida del labio del deflector central de 55° a 40°.

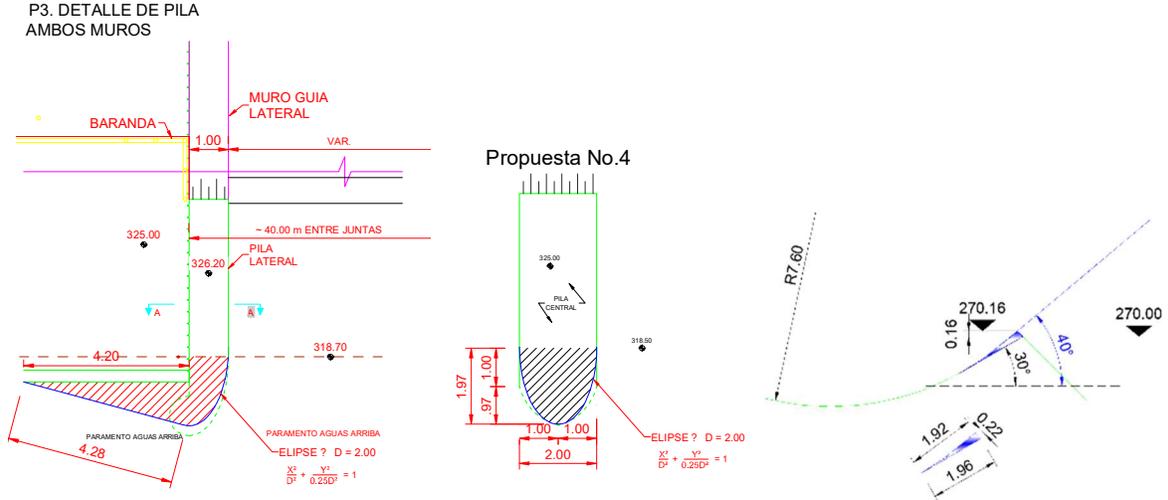


Ilustración 26. Vista en planta de la geometría de modificación de pilas laterales y centrales, y modificación del labio del deflector central propuestas para la serie 8.



Fotografía. 66. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 67. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.



Fotografía. 68. Funcionamiento hidráulico de la caída al cauce del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.



Fotografía. 69. Funcionamiento hidráulico de la caída al cauce del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.

Se reducen las contracciones del flujo en las pilas laterales, pero continua el efecto aguas abajo que produce salpicaduras en la plataforma de la ventana 1. Por lo anterior, se propone la modificación máxima de la geometría de entrada a las pilas laterales nombrada como P5 de la ilustración 3.

Se logra hacer que los tres chorros se golpeen en el aire con una importante disipación de energía. Pero la ventana 1 y su camino de acceso continúan siendo alcanzados por el nivel del agua abajo.

Se logró recortar el alcance horizontal de los chorros, sin embargo, se aprecia que al caer francamente sobre el tanque amortiguador con agua, genera el movimiento de ondas hacia la ventana 1 y su camino de acceso.

Con la intención de evitar el cambio del radio de la cubeta deflectora, se propone que la modificación del ángulo sea menor, y solo cubra el tramo recto final de dos metros del diseño original, esta modificación se probó en la serie 8.

Serie 9.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°. Con ataguía

Se mantienen las pilas marginales con la propuesta P4 y centrales propuesta no.4 mostradas en la ilustración que se muestra a continuación, hasta una profundidad de 13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original. Se modificó el ángulo de salida del labio del deflector central de 40° a 44°.

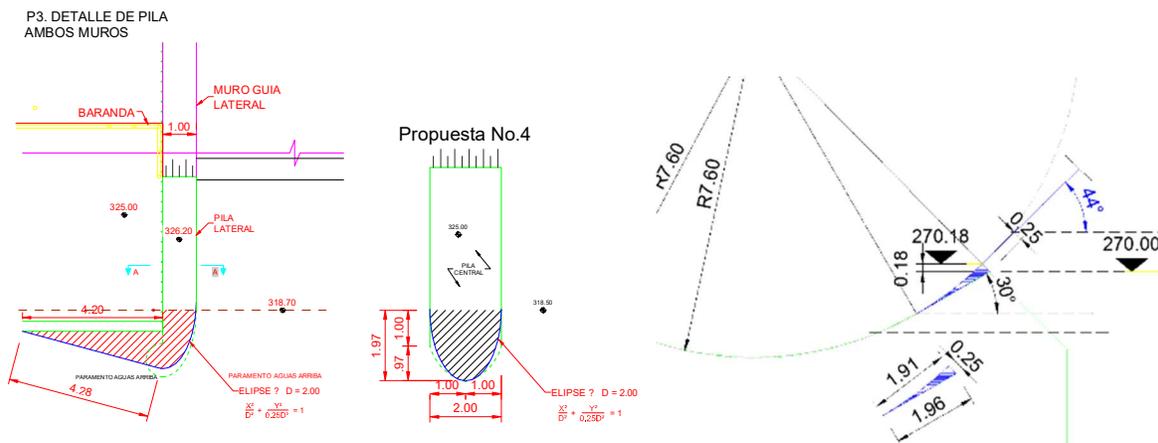


Ilustración 27. Vista en planta de la geometría de modificación de pilas laterales y centrales, y modificación del labio del deflector central propuestas para la serie 8.



Fotografía. 70. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 71. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.

Se logra hacer que los tres chorros se golpeen en el aire con una importante disipación de energía. Pero la ventana 1 y su camino de acceso continúan siendo alcanzados por el nivel del agua abajo.

Se logró recortar el alcance horizontal de los chorros, sin embargo, se aprecia que, al caer francamente sobre el tanque amortiguador con agua, genera el movimiento de ondas hacia la ventana 1 y su camino de acceso.

Con la intención de evitar la acumulación de agua en el cuenco, debido a que se observa que la profundidad es demasiado baja para amortiguar el golpe del chorro y que la distancia entre la superficie del agua en el cuenco está muy cerca de la plataforma de la ventana 1, se propone probar sin la ataguía aguas abajo, lo cual será realizado en la serie 10.

Serie 10.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.4, y modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°. Sin Ataguía.

Se mantienen las pilas marginales con la propuesta P4 y centrales propuesta no.4 mostradas en la ilustración que se muestra a continuación, hasta una profundidad de 13m en prototipo, conforme a la elevación y geometría original. Se modificó el ángulo de salida del labio del deflector central de 40° a 44°. Se retiró la ataguía aguas abajo para observar el efecto del chorro al chocar con el cauce.

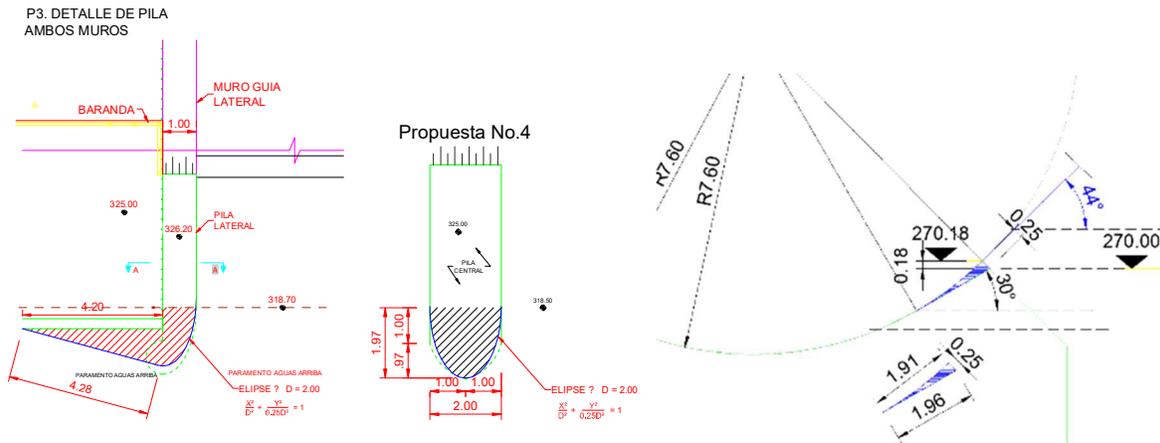


Ilustración 28. Vista en planta de la geometría de modificación de pilas laterales y centrales, y modificación del labio del deflector central propuestas para la serie 8.



Fotografía. 72. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años



Fotografía. 73. Funcionamiento hidráulico del chorro de despegue para un gasto asociado a un período de retorno de 1000 años.

Se logra hacer que los tres chorros se golpeen en el aire con una importante disipación de energía. Pero la ventana 1 y su camino de acceso continúan siendo alcanzados por el oleaje generado en el cuenco.

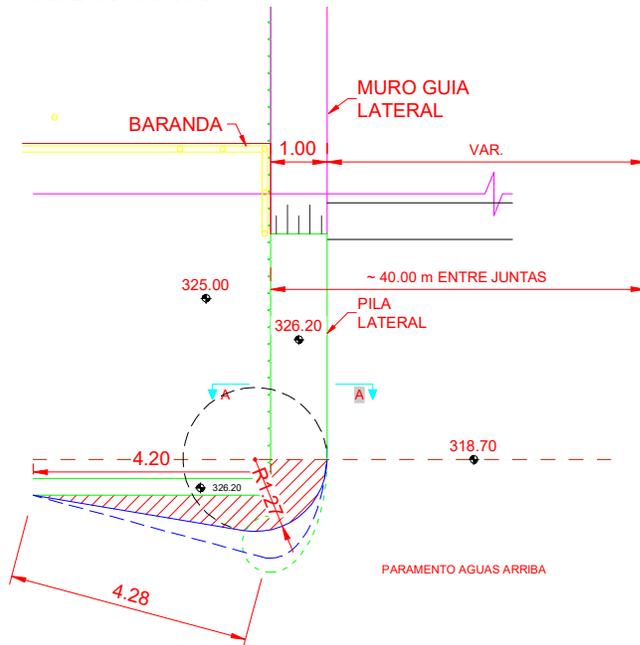
Se logró recortar el alcance horizontal de los chorros, sin embargo, persiste la generación del movimiento de ondas hacia la ventana 1 y su camino de acceso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL AVANCE A LA SERIE 10.

Siguiendo un desarrollo lógico del estudio desde el punto de vista del comportamiento hidráulico del modelo, y considerando que debido a que el flujo bajo estudio se encuentra en condiciones supercríticas, las modificaciones aguas arriba influyen hacia abajo, pero no al contrario. La secuencia es modificar las pilas para evitar las contracciones del flujo, modificar deflectores para encontrar la trayectoria más conveniente, colocar y remover la ataguía aguas abajo.

Se logró mejorar el ingreso del flujo cercano a las pilas centrales y laterales. Para el caso de las pilas centrales pueden ser modificadas al límite de la geometría ya que la nariz coincide con el paramento aguas arriba No. 5. Para el caso de los accesos laterales todavía se tiene la posibilidad de probar el perfil P5.

P4. DETALLE DE PILA AMBOS MUROS



Propuesta No.5

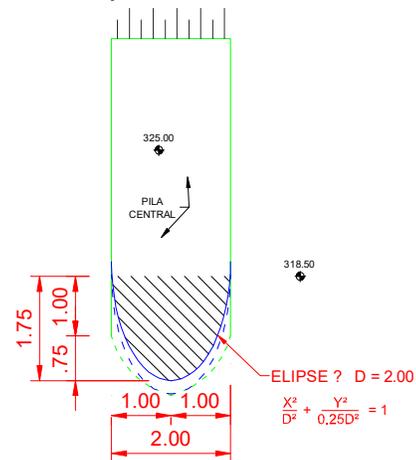


Ilustración 29 Perfil de las pilas centrales No. 5 y accesos laterales P5

Serie 11.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P4, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados "D1" en la cubeta del deflector central y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de la margen izquierda y derecha. Sin ataguía.

Se modificaron las pilas laterales de acuerdo a la propuesta P5, reduciendo al máximo la proyección hacia dentro del cimacio, con la intención de reducir la estela por el ingreso del flujo hacia el vertedor. Las modificaciones se muestran en la ilustración 30.

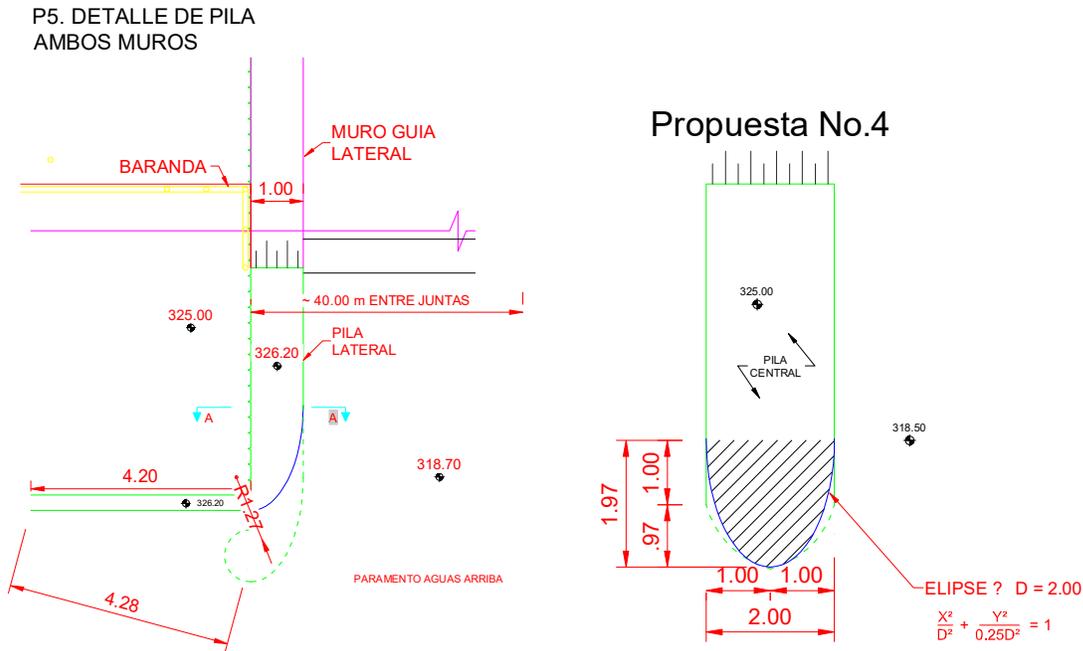


Ilustración 30 Perfil de accesos laterales P5, pilas centrales No. 4.

Con la intención de disipar energía en el deflector central, se probaron umbrales trapeciales colocados en el deflector central, con las dimensiones mostradas en la Ilustración que se muestra a continuación y fotografía 74.

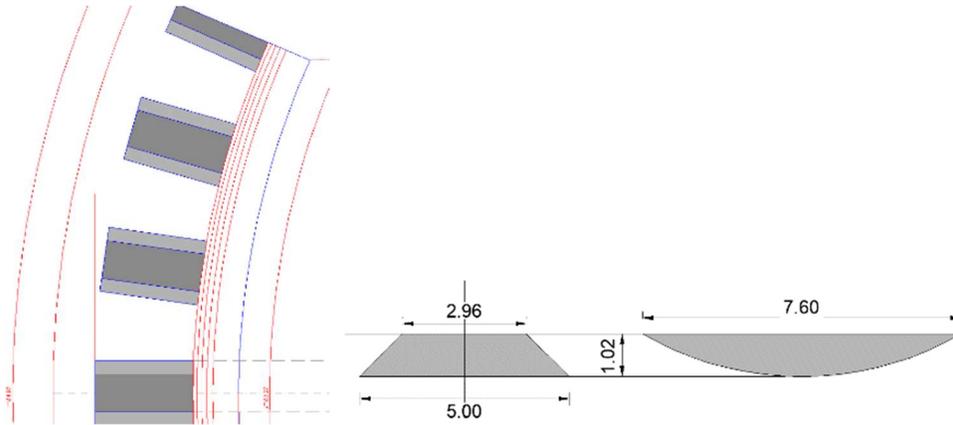


Ilustración 31. Umbrales trapeciales en el deflector central D1.



Fotografía. 74. Umbrales trapeciales en el deflector central



Fotografía. 75 Umbrales trapeciales, cuyas dimensiones se observan en la Ilustración 31.



Fotografía. 76 Deflectores verticales colocados en los muros laterales.



Fotografía. 77. Funcionamiento hidráulico para un gasto de $1,215 \text{ m}^3/\text{s}$ asociado a un periodo de retorno de 2 años.



Fotografía. 78. Funcionamiento hidráulico para un gasto de $6010 \text{ m}^3/\text{s}$ asociado a un periodo de retorno de 1000 años.

La modificación de las pilas laterales con la geometría al límite, reduce la separación del flujo en la misma medida, aunque la generación de las perturbaciones se observan aguas arriba del paramento de la cortina, principalmente en el extremo izquierdo, en forma de vórtices que al alcanzar el cimacio se manifiestan con la separación de la lámina vertiente. Sin embargo y de acuerdo a las mediciones de presión en la rápida de esta sección, no se generan presiones negativas importantes. Esta geometría presentó el mejor comportamiento hidráulico en esta zona.

La disipación de energía producida por los dados en el salto de ski es insuficiente para evitar que la perturbación superficial alcance el camino de la ventana 1. Se aprecia que tampoco existe disipación de energía por la caída al cauce, además de que el impacto con el fondo podría acelerar su socavación.

Otra solución para disipar la energía residual sería incrementar la altura de la ataguía de aguas abajo aumentando la profundidad del colchón del cuenco amortiguador.

Serie 12.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados "D1" en la cubeta del deflector central. Sin ataguía.

Se modificaron las pilas centrales al límite de la geometría de tal forma que la nariz de las pilas coincida con el paramento aguas arriba (propuesta No. 5), ilustración que se muestra a continuación.

<p>Propuesta No.5</p> <p>Ilustración 32. Propuesta 5 en las pilas centrales.</p>	<p>Fotografía. 79 . Propuesta 5 vista superior de las pilas centrales.</p>
<p>Fotografía. 80 . Estela tras la pila central MI con el perfil modificado</p>	<p>Fotografía. 81 . Alcance de las perturbaciones de la superficie del cuenco amortiguador al camino de acceso a V1.</p>

Se aprecia mejoría en el acceso de las pilas centrales. Persiste la inundación del camino a la ventana V1.

Serie 13.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central, con ángulo de 44° y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm y taludes aguas arriba y abajo.

En esta serie se coloca una ataguía aguas abajo del cauce, incrementando la altura en tres metros, a la elevación de corona a 241.50 msnm y taludes aguas arriba y abajo. Se eliminan los dados del salto de ski.



Fotografía. 82. Colocación de la ataguía sobreelevada a la cota 241.50msnm



Fotografía. 83. Vista aérea del vertedor, con el gasto de diseño. Se aprecia el alcance del agua al camino de acceso de la ventana V1.



Fotografía. 84. Gasto de diseño. El chorro alcanza a chocar con la ataguía exacerbando el alcance del camino



Fotografía. 85. Vista aguas abajo donde se observa el choque del chorro con la ataguía y el alcance del agua

La ataguía sobreelevada incrementa el efecto de amortiguamiento del chorro, sin embargo, debido a que la superficie del agua está más próxima a la plataforma de la ventana V1, también se incrementa la frecuencia y la profundidad de inundación.

Serie 14.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central, con ángulo de 44° y deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50msnm con paramento vertical aguas arriba.

Con la intención de incrementar el volumen de agua en el cuenco amortiguador y por tanto su capacidad de amortiguación, así como reducir el choque del chorro en el talud aguas arriba, se probó una ataguía con una elevación de corona 241.50msnm sin talud aguas arriba, como se muestra en las siguientes fotografías.



Fotografía. 86. Ataguía sin talud aguas arriba. Vista aguas arriba



Fotografía. 87. Ataguía sin talud aguas arriba. Vista aguas abajo



Fotografía. 88. Vista aguas abajo donde se observa cómo funciona la ataguía para un gasto de $6010 \text{ m}^3/\text{s}$



Fotografía. 89. Vista aguas abajo donde se observa el funciona la ataguía.

Continúa la perturbación exagerada en el cuenco amortiguador, alcanzando el camino a la ventana V1.

Serie 15.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector en el vertedor central, con ángulo de 44° , dados "D2" en la cubeta, deflectores verticales colocados en los muros laterales del vertedor de margen izquierda y derecha. Con ataguía elevación de corona 241.50 msnm con paramento vertical aguas arriba.

Se agregan 5 dados o umbrales en el deflector con la intención de generar una mayor disipación de energía en esta zona como se muestra en la ilustración siguiente:

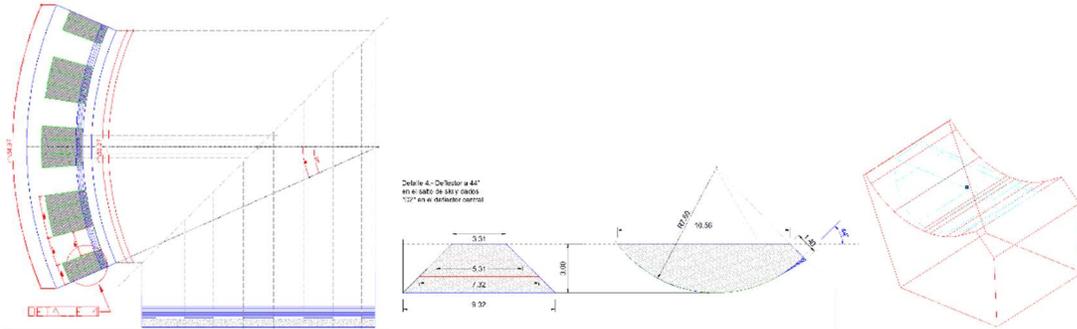


Ilustración 33. Geometría del dado D2



Fotografía. 90. Dados D2 colocados en el deflector del vertedor central.



Fotografía. 91. Funcionamiento para un gasto de 1215 m³/s.



Fotografía. 92. Comportamiento hidráulico del flujo para un gasto de diseño 6010 m³/s



Fotografía. 93. Comportamiento hidráulico del flujo para un gasto de diseño 6010 m³/s

El efecto de los dados D2 es notable en la disipación de la energía del flujo para el vertedor central, sin embargo, ahora se aprecia que el chorro del vertedor de la margen izquierda golpea la ladera de la margen derecha cerca del camino de acceso a la ventana V1, lo cual provoca el alcance del flujo. Se propone retirar la ataguía para verificar el efecto con este arreglo.

Serie 16.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° y dados "D2" en la cubeta del deflector central. Sin ataguía.

Con la intención de bajar el nivel del agua en el tanque amortiguador, se retiró la ataguía de aguas abajo.



Fotografía. 94. Comportamiento del flujo sin ataguía para el gasto de diseño de 6010 m³/s.



Fotografía. 95. Aguas abajo del vertedor sin ataguía con un Q= 6010 m³/s.

Se aprecia que el chorro del vertedor de la margen izquierda golpea la ladera de la margen derecha cerca del camino de acceso a la ventana V1, lo cual provoca el alcance del flujo a este.

Serie 17.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, y un sector de aireador en el deflector lateral. Sin ataguía.

Con la finalidad de observar el efecto de la aireación sobre la disipación de energía del chorro, se colocaron aireadores en el deflector lateral izquierdo como se muestra en la siguiente ilustración. La entrada de aire se realizó dentro de los muros de encauzamiento a la elevación 290msnm, justo antes del inicio de la curva del deflector.

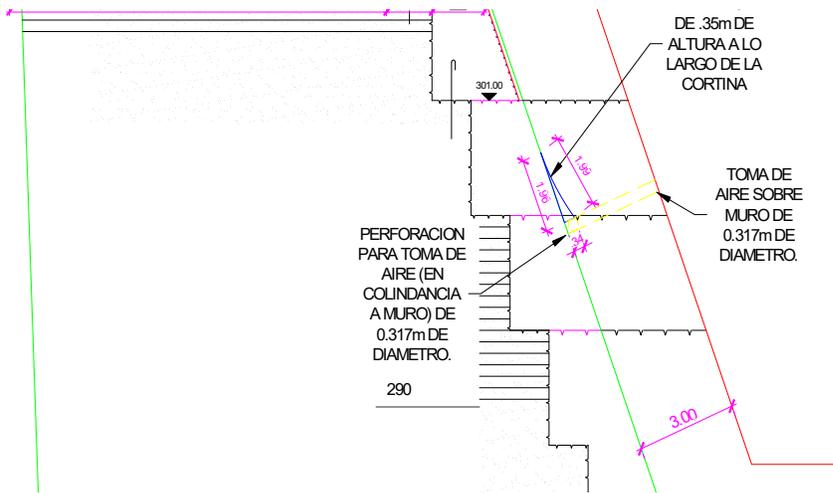


Ilustración 34. Geometría del aireador colocado en el vertedor lateral izquierdo.



Fotografía. 96. Vista aérea del vertedor para el un $Q= 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.

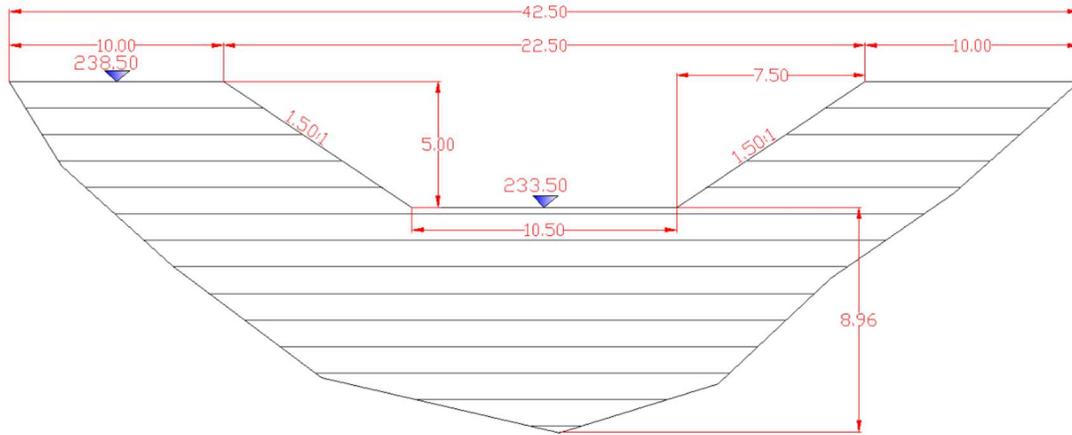


Fotografía. 97. Comportamiento de flujo en la margen derecha del cuenco, para un $Q= 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.

La aireación del chorro se genera parcialmente sin suficiente disipación de energía, por lo que el camino de acceso a la ventana V1 es alcanzado por el chorro. Se propone colocar la ataguía con una escotadura.

Serie 18.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 22.50m de ancho.

Con la intención de reducir el nivel del agua dentro del cuenco amortiguador, se colocó la ataguía, pero ahora con una escotadura de 22.50 m como se muestra en la ilustración siguiente:



SECCION EN PROTOTIPO.
Anotaciones en metros.

Nota: La escotadura en la ataguía se deberá realizar al finalizar la obra.

→ X

Ilustración 35. Ataguía aguas abajo con escotaduras de 25.5 metros de ancho y cinco metros de profundidad con taludes de 1.5:1



Fotografía. 98. Vista de frente de la ataguía, con escotadura de 45 cm de



Fotografía. 99. Vista aérea de ataguía con escotadura.



Fotografía. 100. Vista aérea del funcionamiento del vertedor, con ataguía y escotadura, para un $Q= 6010$ m^3/s .



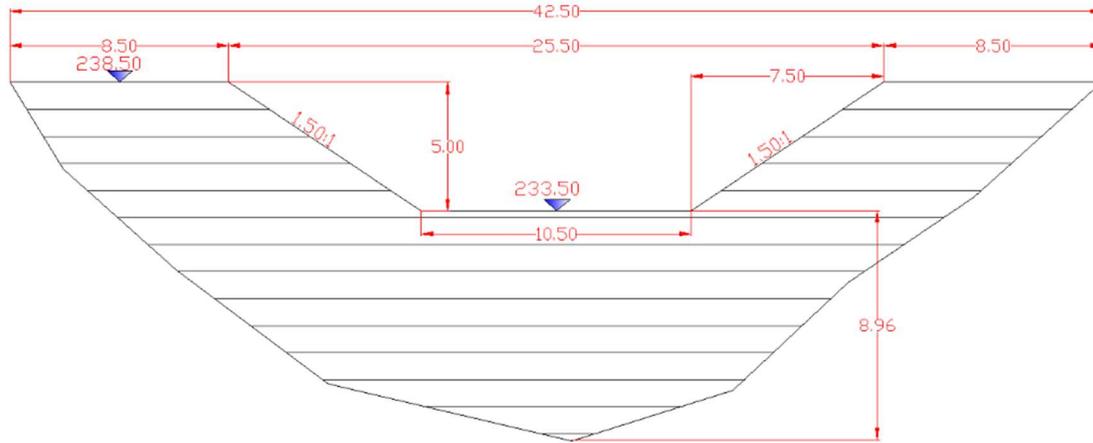
Fotografía. 101. Vista aérea del funcionamiento del vertedor, con ataguía y escotadura, para un $Q= 6010$ m^3/s .

Se reduce en forma importante el alcance del chorro al camino de acceso a la ventana V1. Sigue apreciándose el alcance del chorro que despega de la margen izquierda hacia la ladera de la margen derecha del cauce. Se propone ampliar el ancho de la ataguía tres metros más para un total de 25.50m.

Serie 19.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° , dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.

Con la intención de reducir el nivel del agua dentro del cuenco amortiguador, se colocó la ataguía, pero ahora con una escotadura de 25.50 m como se muestra en la ilustración 36

Ataguía con escotadura de 25.50m.



SECCION EN PROTOTIPO.
Acotaciones en metros.

Nota: La escotadura en la ataguía se deberá realizar al finalizar la obra.

Ilustración 36 Ataguía aguas abajo con escotaduras de 25.5 metros de ancho y cinco metros de profundidad con taludes de 1.5:1



Fotografía. 102. Vista de frente de la ataguía con escotadura de 25.50 m.



Fotografía. 103. Vista del funcionamiento del vertedor, con ataguía y escotadura de 25.5 m, para un $Q= 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 104. Vista del funcionamiento de la ataguía con ataguía y escotadura, para un $Q = 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se reduce en forma importante el alcance del chorro al camino de acceso a la ventana V1. Sigue apreciándose el alcance del chorro que despega de la margen izquierda hacia la ladera de la margen derecha del cauce. Se propone retirar los dados del deflector central para observar el comportamiento y la necesidad de mantenerlos.

Serie 20.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44° , sin dados "D2" en la cubeta del vertedor central, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.

Se retiran los dados "D2" del deflector central para observar el comportamiento y la necesidad de mantenerlos, así como el efecto del chorro al caer al cuenco.



Fotografía. 105. Funcionamiento del vertedor, con ataguía y escotadura de 25.5 m, para un $Q = 6010 \text{ m}^3/\text{s}$, sin dados en la cubeta del vertedor central.



Fotografía. 106. Caída del chorro en el colchón, para un $Q = 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.

El golpe del chorro alcanza con mayor frecuencia que en la prueba anterior al camino de acceso a la ventana V1 debido a que por la falta de los dados "D2" se incrementa la energía del chorro. Sigue apreciándose el alcance del chorro que despega de la margen

izquierda hacia la ladera de la margen derecha del cauce. Se propone colocar los dados "D2" en los deflectores de los tres vertedores.

Serie 21.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central y laterales, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.

Dado que en la serie 19 se observó una disipación importante de energía en la cubeta con los dados tipo "D2", y con el propósito de disipar energía en los deflectores laterales, se colocaron también en estos.



Fotografía. 107. Colocación de dados "D2" en la cubeta de los vertedores central y laterales.



Fotografía. 108. Vista aérea del comportamiento de la caída del chorro en el colchón, para un $Q= 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 109. Comportamiento de la caída del chorro en el colchón, para un $Q= 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.

Debido a los dados, se produce demasiada perturbación en los vertedores laterales lo cual incrementa las salpicaduras al camino de acceso a la ventana V1. Por lo que se propone retirarlos de los laterales y dejarlos en el central.

Para reducir el alcance horizontal del chorro se propone incrementar el ángulo de salida del salto de ski del vertedor lateral margen izquierda.

Serie 22.- Ensayos con modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, y modificación de la salida del deflector del vertedor izquierdo, con ángulo de 44°, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho.

Con el fin de reducir las perturbaciones en las cubetas laterales y evitar las salpicaduras hacia fuera de los vertedores, se retiran los dados "D2" de los deflectores laterales.

Para reducir el alcance horizontal del chorro se incrementa el ángulo de salida del salto de ski del vertedor lateral margen izquierda.



Fotografía. 110. Retiro de los dados laterales.



Fotografía. 111. Comportamiento de la caída del chorro en el colchón, para el $Q= 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fotografía. 112. Comportamiento de la caída del chorro en el colchón, para el gasto de diseño.



Fotografía. 113. Comportamiento de la caída del chorro en el colchón, para el $Q= 6010 \text{ m}^3/\text{s}$.

El arreglo de la serie 22 se considera el más adecuado para la optimización del funcionamiento hidráulico del vertedor en general. Se anexa el plano geométrico de las modificaciones finales correspondientes a la serie 22.

Una vez definida la geometría final, se procedió a la medición de presiones en los mismos puntos que en la serie 1 y así tener una referencia.

Serie 23.- Presiones en el vertedor central con el arreglo de la serie 22.

Presiones dinámicas en la rápida de descarga para la geometría final

Se utilizaron las mismas celdas de presión se colocaron de acuerdo a las posiciones mostradas en la ilustración 6 durante la serie 1.

Las ilustraciones 37 a la 39 muestran los resultados de la medición por cada uno de los piezómetros y todas las series, y el perfil de presiones para cada serie, considerando que la línea de referencia "cero" es el perfil del fondo del vertedor.

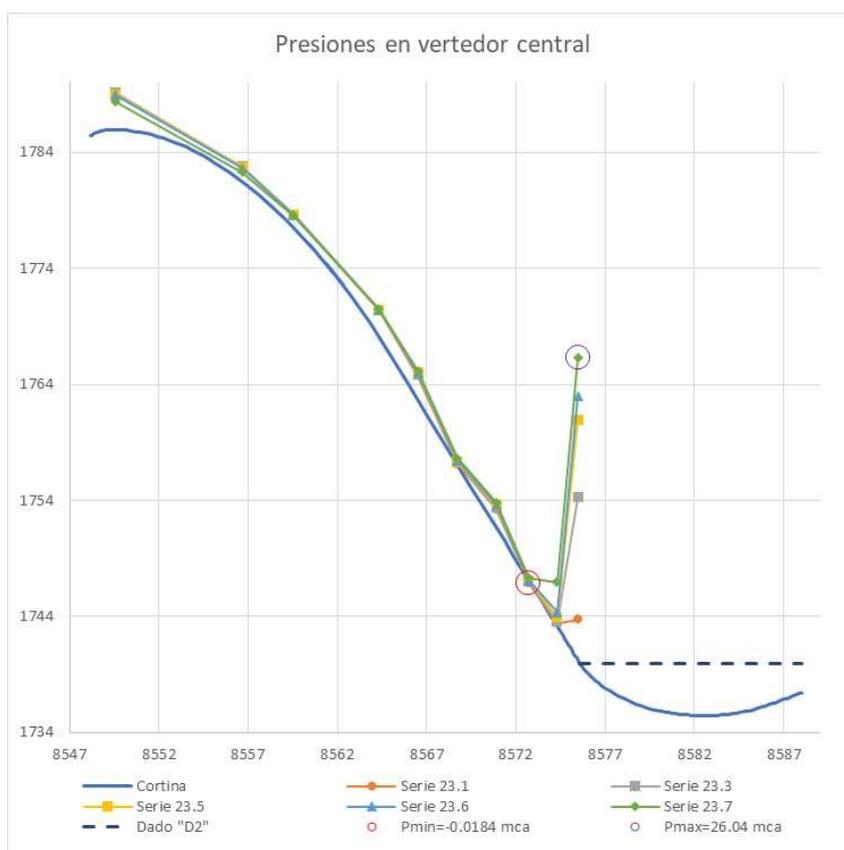


Ilustración 37. Perfil de resultados de presiones medidas en la sección C-C, en el eje del vertedor central. Magnitud de prototipo.

La presión mínima de -0.02 mca en prototipo, se presenta para la serie 23.1, $Q=1215 \text{ m}^3/\text{s}$, $Tr=2$ años, y prácticamente en la línea tangente del deflector con la rápida de descarga.

La presión máxima se presenta al inicio del dado central, con 26.04 mca, para la serie 23.7, $Q=6010 \text{ m}^3/\text{s}$, $Tr=1000$ años y sobre el dado "D2".

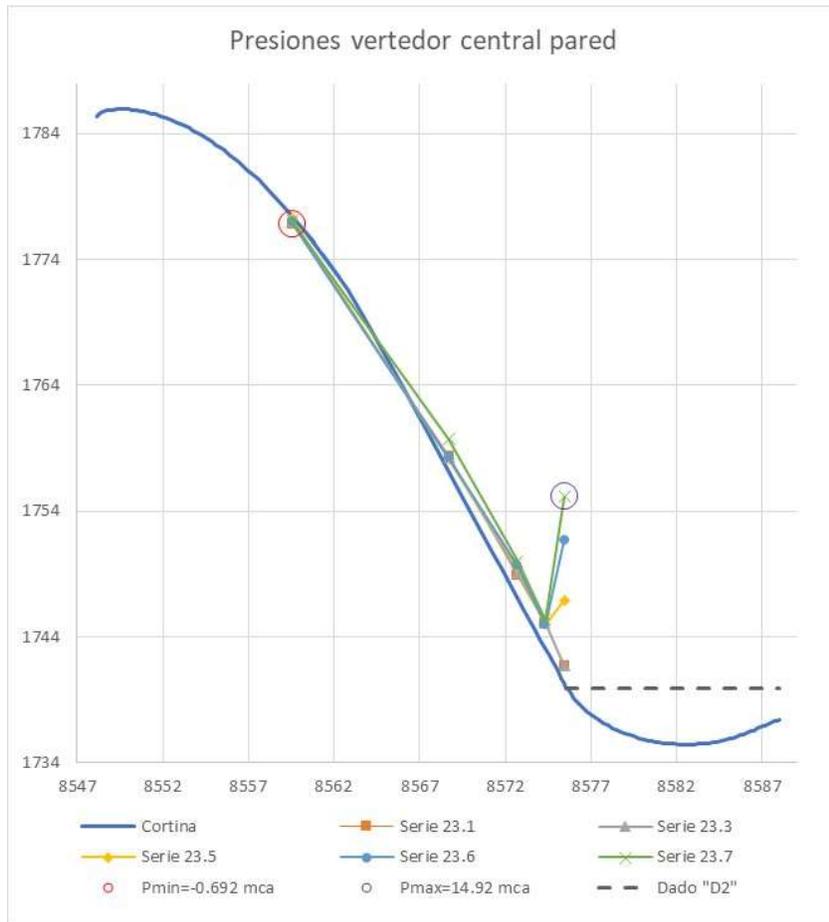


Ilustración 38. Perfil de resultados de presiones medidas en la sección A-A, en el muro guía del vertedor central. Magnitud de prototipo.

La presión mínima de -0.692 mca en prototipo, se presenta para la serie 23.1, $Q=1215$ m^3/s , $Tr=2$ años, y prácticamente en la línea tangente del deflector con la rápida de descarga.

La presión máxima se presenta al inicio del dado central, con 14.92 mca, para la serie 23.7, $Q=6010$ m^3/s , $Tr=1000$ años y sobre el dado "D2".

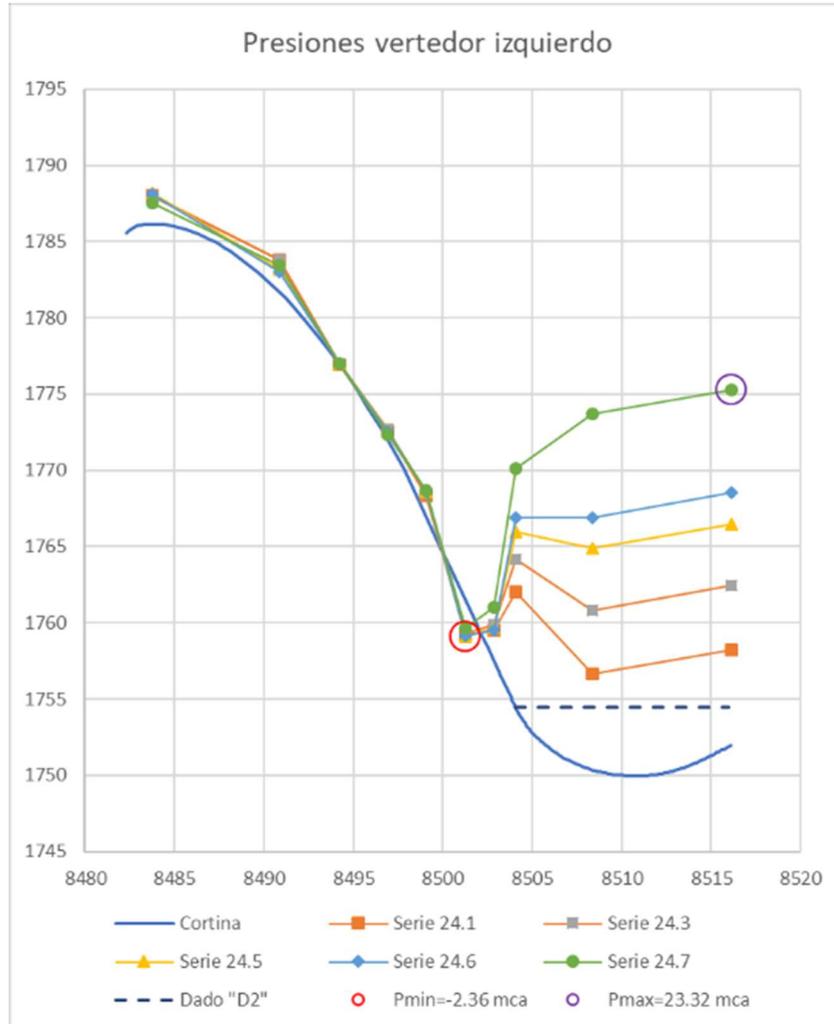


Ilustración 39. Perfil de resultados de presiones medidas en la sección B-B, en el eje del vertedor de la margen izquierda. Magnitud de prototipo.

La presión mínima de -2.36 mca en prototipo, se presenta para la serie 23.5, $Q=3730 \text{ m}^3/\text{s}$, $Tr=50$ años, y prácticamente en la línea tangente del deflector con la rápida de descarga.

La presión máxima se presenta al inicio del dado central, con 23.32 mca, para la serie 23.7, $Q=6010 \text{ m}^3/\text{s}$, $Tr=1000$ años y al final del dado "D2".

CONCLUSIONES

En general, el vertedor presenta un flujo adecuado. Se requirió mitigar las perturbaciones generadas por los muros de aproximación marginales y centrales modificando su geometría y recortando al máximo su proyección, hasta el filo del paramento de aguas arriba de la cortina.

La condición del flujo de aproximación es tangencial al cimacio en los extremos, debido a la ubicación de la cortina respecto al eje del cauce, genera perturbaciones importantes, ya que proyecta estelas de vórtices tras las pilas, los cuales son arrastrados aguas abajo del vertedor.

Para el proyecto original, es importante observar que el coeficiente de descarga se puede considerar bajo, por lo que la carga asociada al gasto de diseño aumenta, de 6.50m a 6.65m. La reducción de la eficiencia de descarga se puede atribuir a la geometría curva, en planta, del vertedor, a la distribución de las velocidades de aproximación que generan a su vez la contracción de la vena líquida vertiente. Es importante entonces, mejorar el acceso del flujo al cimacio reduciendo en lo posible la contracción provocada por las pilas. Para el gasto de diseño asociado a un TR=1000 años, el nivel del agua en el vaso supera el nivel de la corona de las pilas entre 1 y 2 mm en modelo, 5 a 10 cm en prototipo.

Para el proyecto original; las magnitudes positivas mayores corresponden a los piezómetros ubicados dentro de la cubeta deflectora, mientras que las presiones negativas se presentan en los puntos ubicados sobre la cresta y al final de la rápida, que podría estar asociado a la perturbación provocada por la separación del flujo originada en las pilas, principalmente en la margen izquierda. El valor máximo, de las presiones negativas, -3.428 mca, está por debajo de los críticos.

Para la geometría final determinada en el estudio; las magnitudes positivas mayores corresponden a los piezómetros ubicados dentro de la cubeta deflectora y dados "D2", mientras que las presiones negativas se presentan en los puntos ubicados sobre la cresta y al final de la rápida, que podría estar asociada a la perturbación provocada por la separación del flujo originada en las pilas, principalmente en la margen izquierda. El valor máximo de las presiones negativas está por debajo de los críticos, -2.36 mca lo cual mejora las condiciones del proyecto original.

Se observa introducción de aire al flujo al inicio del salto de ski hasta el gasto de 1985 m³/s, correspondiente a 5 años de período de retorno.

Para la disipación de energía y control del flujo a la salida del deflector (salto de ski), se requiere colocar estructuras, en este caso dados (D2) y modificar el ángulo de salida del chorro con la finalidad de reducir el alcance horizontal y evitar el choque con las laderas y el talud de aguas arriba de la ataguía.

Se requiere formar el cuenco amortiguador mediante la ataguía de aguas abajo que será utilizada para el desvío del cauce durante la construcción de la cortina, pero controlando su profundidad mediante la escotadura propuesta.

RECOMENDACIONES.

De acuerdo a lo observado con las diversas pruebas del modelo tendientes a mejorar su funcionamiento hidráulico, se enlistan las recomendaciones requeridas:

Modificar el ángulo de salida al final del deflector del vertedor central con un ángulo de 44°.

Colocar Dados sobre la cubeta deflectora del vertedor central con la finalidad de modificar la trayectoria del chorro saliente y disipar energía.

Modificar las pilas de los muros laterales utilizando la misma geometría del proyecto original, pero acortando al máximo su longitud.

Modificar las pilas centrales utilizando la misma geometría del proyecto original, pero acortando al máximo su proyección hasta el paramento aguas arriba de la cortina.

Una vez concluida la construcción, realizar una escotadura sobre la ataguía aguas abajo.

Sobrelevar en al menos 50 cm las pilas centrales.

Los detalles de las recomendaciones descritas se muestran en el plano anexo "Plano de modificaciones finales".

RESPUESTA A LAS OBSERVACIONES DEL INFORME FINAL

PREGUNTA 1. INDICAR GEOMETRÍA (EN PARTICULAR LA DISTANCIA) DESDE EL PIE AGUAS ABAJO DE PRESA, HASTA LA CAÍDA DEL CHORRO PARA LAS CONFIGURACIONES ORIGINAL (SIN NINGÚN CAMBIO) Y PARA LA CONFIGURACIÓN 22, PARA AMBOS CON Y SIN ATAGUÍA, Y LAS DOS CONFIGURACIONES (CON Y SIN ESCOTADURA).

Los ensayos realizados fueron:

1. Para la geometría original sin y con ataguía sin escotadura
2. Para la serie 22 es con ataguía y escotadura de 25.50m de ancho y sin ataguía.

Además, la geometría del chorro y su alcance es independiente de la existencia de la ataguía, y tampoco es conveniente que los chorros caigan directamente sobre el terreno natural, es decir, es muy importante crear un colchón de agua dentro del estanque que amortigüe parcialmente la caída de los chorros, como se verá en las pruebas de socavación. Por lo anterior solo se describirán los arreglos mencionados.

Diseño original.

Sin ataguía:

Las fotografías 1 a 4 muestran el comportamiento del chorro al despegar del deflector y caer en el fondo del cauce sin ataguía (prueba 5.7). La profundidad del flujo es barrida hacia aguas abajo, fotografía 1, condición no deseable ya que se requiere la acumulación del agua en este espacio para amortiguar la caída de los chorros. El alcance

horizontal mayor de los chorros laterales es debido a que, como se aprecia en la ilustración 2, el chorro central, por su elevación de salida, pasa por debajo de los laterales sin chocar prácticamente. Las fotografías 3 y 4 muestran las salpicaduras a la Ventana 1 y su camino de acceso.



Fotografía. 114. Alcance del chorro para la configuración original. Sin ataguía. El tirante en el canal es barrido hacia aguas abajo.



Fotografía. 115. Geometría del chorro para la configuración original. Sin ataguía.



Fotografía 116. Alcance del chorro para la configuración original. Sin ataguía.



Fotografía 117. Alcance del chorro para la configuración original. Sin ataguía. La ventana 1 y su camino de acceso reciben salpicaduras considerables.

Con ataguía

Las fotografías 5 a 8 muestran el comportamiento del chorro al despegar del deflector y caer en el fondo del cauce con ataguía (prueba 9.7). La profundidad del flujo es barrida hacia la ataguía provocando una perturbación en la superficie libre del agua que alcanza el camino de acceso a la ventana 1, fotografía 5. Si bien se forma el colchón de agua, este sobre eleva la superficie del agua logrando alcanzar el camino. Las perturbaciones son exacerbadas por el choque cercano del chorro en el talud de aguas arriba de la

ataguía. El alcance horizontal máximo es debido a los vertedores laterales, como se aprecia en la fotografía 6, el chorro central, por su elevación de salida, pasa por debajo de los laterales sin chocar prácticamente. Las fotografías 7 y 8 muestran las inundaciones del camino de acceso a la ventana1.



Fotografía 118. Alcance del chorro para la configuración original. Con ataguía. El tirante acumulado es barrido contra la ataguía.



Fotografía 119. Geometría del chorro para la configuración original. Con ataguía.



Fotografía 120. Alcance del chorro para la configuración original. Con ataguía.



Fotografía 121. Alcance del chorro para la configuración original. Con ataguía. La ventana 1 y su camino de acceso reciben inundaciones periódicas.

Configuración 22

Las fotografías 9 y 10 muestran el comportamiento del chorro al despegar del deflector y caer en el fondo del cauce con ataguía y escotadura. En la fotografía 9 se aprecia claramente el choque de los tres chorros con el gasto de diseño, lo cual provoca mayor disipación de energía en el aire. El flujo es barrido hacia la ataguía provocando una perturbación en la superficie libre del agua que alcanza el camino de acceso a la ventana 1 en forma esporádica, fotografía 10. Si bien se forma el colchón de agua, este es controlado por la escotadura de la ataguía induciendo que la superficie del agua

reduzca el alcance al camino. La caída del chorro se produce a mayor distancia del talud de aguas arriba de la ataguía debido al mayor ángulo de salida desde el deflector.



Fotografía. 122. Choque de los chorros en el aire. configuración 22. Con ataguía y escotadura. Se genera mayor amortiguamiento del chorro dentro del estanque.



Fotografía. 123. Alcance en la parte baja del camino en forma esporádica.

Las ilustraciones 40 y 41 muestran gráficamente los resultados analíticos calibrados con las observaciones del modelo para las geometrías original y final (serie 22).

El análisis se realizó mediante la fórmula propuesta en la referencia 1, "Diseño de presas pequeñas":

$$y = x \tan \alpha - \frac{x^2}{K [4(d + h_v) \cos^2 \alpha]}$$

Donde:

y es el alcance vertical máximo a partir del labio de salida del deflector, en metros

x es el alcance horizontal máximo a partir del labio de salida del deflector, en metros

α es el ángulo de salida del chorro a partir del labio de salida del deflector, en grados

d es la profundidad del flujo a la salida del deflector en metros

h_v es la carga de velocidad del flujo a la salida del deflector en m/s

K factor igual a 1, para un flujo del chorro teórico. Para compensar las pérdidas de energía y la reducción de velocidad causada por la resistencia del aire, turbulencias internas, y desintegración del chorro, debe asumirse un valor de 0.9. Adimensional.

La tabla 4 muestra los resultados del análisis:

Tabla 4. Análisis de resultados de las trayectorias de los chorros para la geometría original ($\alpha=30^\circ$) y recomendada ($\alpha=44^\circ$)

		LÁMINA INFERIOR					
angulo α :	grados	30°	30°	55°	30°	44°	44°
$K=$		0.56	0.90	0.81	0.90	0.43	0.71
Elevacion del labio:	MSNM	270.00	284.50	270.16	284.66	270.18	284.68
Profundidad (d)=	m	2.20	2.90	2.20	2.45	2.20	2.45
Velocidad (V)=	m/s	29.27	25.09	29.27	25.09	29.27	25.09
X central	X lateral	Y central	Y lateral D	Y central	Y lateral I	Y central	Y lateral I
m	m	m	m	m	m	m	m
6.50	0.00	270.00	284.50	270.16	284.66	270.18	284.68
11.50	5.00	272.56	287.12	276.79	287.28	274.39	289.01
16.50	10.00	274.48	289.21	282.39	289.36	277.38	292.36
21.50	15.00	275.75	290.78	286.97	290.91	279.13	294.71
26.50	20.00	276.38	291.81	290.52	291.92	279.65	296.07
31.50	25.00	276.36	292.31	293.04	292.39	278.94	296.44
36.50	30.00	275.69	292.28	294.54	292.33	277.00	295.82
41.50	35.00	274.38	291.72	295.01	291.73	273.83	294.21
46.50	40.00	272.42	290.64	294.46	290.59	269.43	291.61
56.50	50.00	266.57	286.87	290.27	286.71	256.93	283.43
66.50	60.00	258.14	280.99	281.98	280.68	239.52	271.30
76.50	70.00	247.11	272.98	269.59	272.51	217.18	255.20
86.50	80.00	233.51	262.86	253.09	262.19	189.92	235.14
96.50	90.00	217.32	250.62	232.49	249.73	157.73	211.12
106.50	100.00	198.55	236.25	207.79	235.12	120.63	183.13
126.50	120.00	153.26	201.17	146.07	199.47	31.65	115.27

La calibración de la fórmula se realizó ajustando el valor de K de acuerdo al alcance horizontal observado en el modelo. Se obtuvieron valores por debajo de los recomendados, $K=0.9$, excepto para los vertedores laterales con 30° de salida, probablemente debido al efecto concentrador en las rápidas del vertedor y perturbador por la forma del ingreso en la cresta, perturbaciones que se transportan hasta la estructura final.

La lámina superior se estimó considerando la profundidad a la salida del flujo en el deflector y el ancho observado en el choque con el fondo del cauce.

Se observa en la ilustración 40 con la geometría original, que los chorros prácticamente no chocan entre ellos, por lo que no se produce disipación de energía en el aire por esta causa.

En la ilustración 41, de la geometría final (serie 22), se aprecia el choque de los chorros de los tres vertedores, en el aire, con lo que se incrementa la disipación de energía.

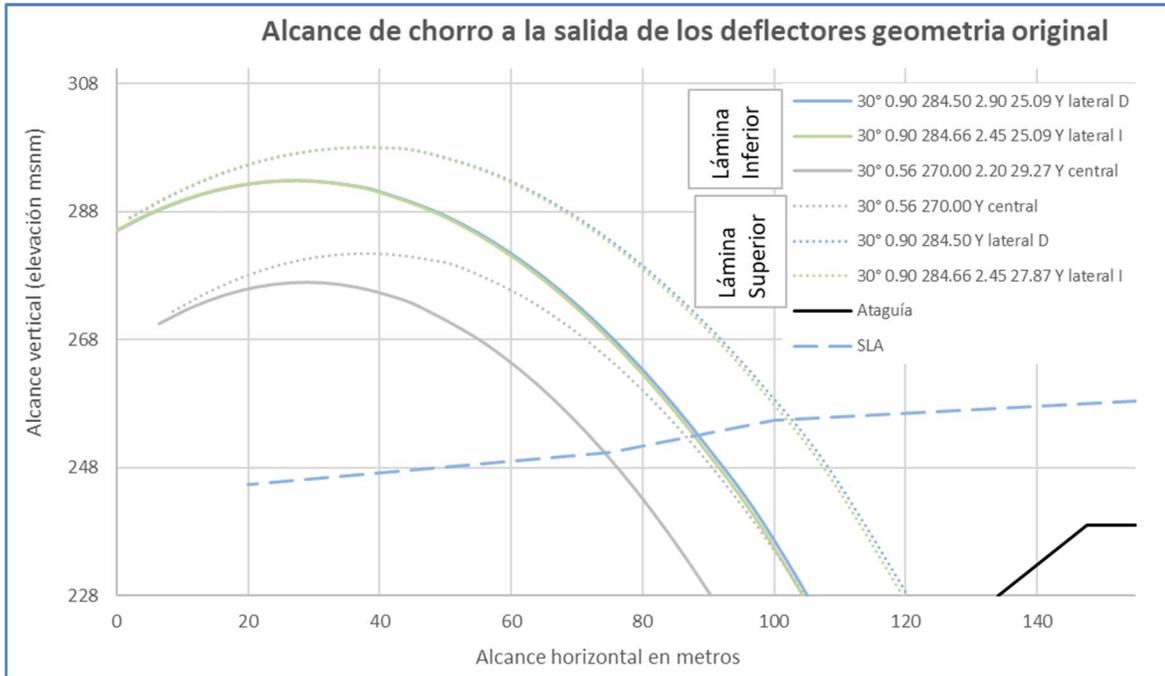


Ilustración 40. Perfil del chorro a la salida de los deflectores con la geometría original. Se aprecia que los chorros prácticamente no chocan entre sí, por lo que no se presenta disipación de energía por esta causa.

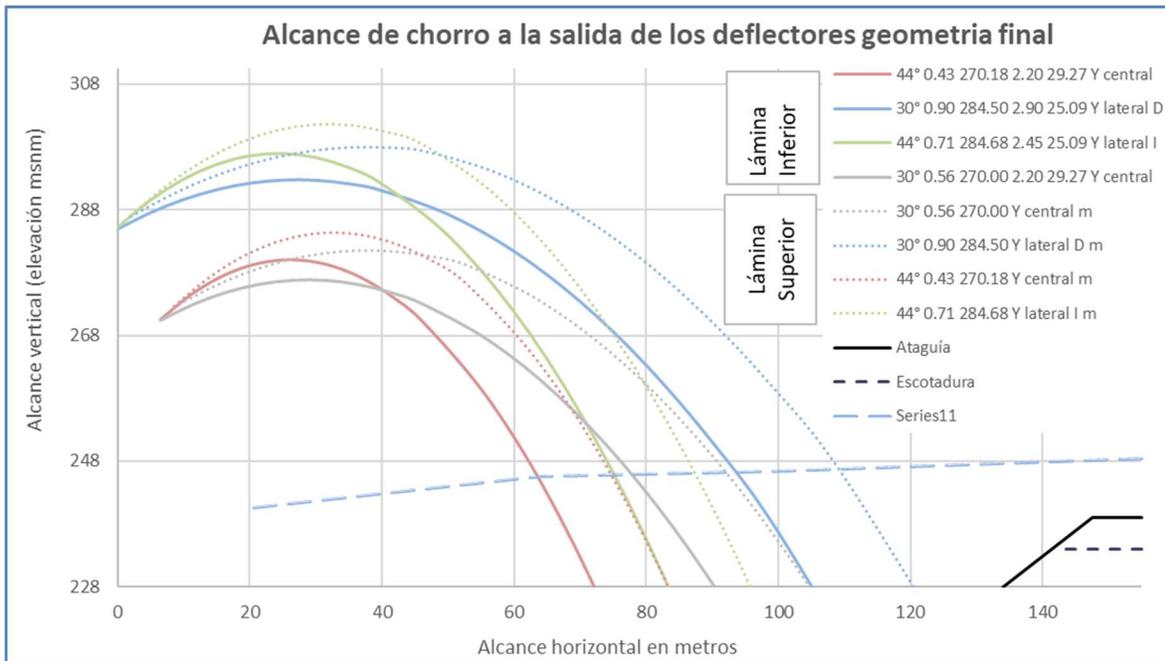


Ilustración 41. Perfil del chorro a la salida de los deflectores con la geometría final. Se aprecia que los chorros chocan entre sí, lo que provoca disipación de energía en el aire.

En la tabla 5, se muestra el resumen de los alcances de la lámina inferior del chorro referido al labio de despegue de los vertedores laterales.

Tabla 5. Resumen de los alcances del chorro referido al labio de despegue de los vertedores laterales. En metros.

Configuración	Chorro central		Chorro lateral M. I.		Chorro lateral M. D.	
	Lamina inferior	Lámina superior	Lamina inferior	Lámina superior	Lamina inferior	Lámina superior
Original con/ sin ataguía	90.00	105.50	105.50	120.00	105.50	120.00
22 con ataguía/escotadura	73.00	84.00	84.00	98.00	105.50	120.00

PREGUNTA 2. CONFIRMAR LOS CAMBIOS PROPUESTOS, ES DECIR INDICAR CUAL ES LA RECOMENDACIÓN FINAL.

La recomendación final se muestra en el plano de modificaciones finales, anexo.

PREGUNTA 3. ENTREGA DE VIDEO: JUNTO CON EL INFORME FINAL EL IMTA TIENE LA RESPONSABILIDAD DE ENTREGAR UN VIDEO DEL MODELO HIDRÁULICO (VER PUNTO 7 DE LA PROPUESTA TÉCNICA ECONÓMICA) CON UNA DURACIÓN DE 30 MINUTOS, EN EL MISMO SOLICITAMOS PODER MOSTRAR EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO SEGÚN PROPUESTA ORIGINAL ENTREGADA POR LOMBARDI, CON Y SIN ATAGUÍA (DOS CONFIGURACIONES CON Y SI ESCOTADURA), COMPORTAMIENTO SEGÚN LA CONFIGURACIÓN 22, DE IGUAL MANERA CON Y SIN ATAGUÍA (DOS CONFIGURACIONES CON Y SIN ESCOTADURA).

El video fue enviado el día 11 de diciembre de 2018.

PREGUNTA 4. EN EL INFORME RECIBIDO NO SE TIENE INFORMACIÓN ALGUNA SOBRE SOCAVACIÓN, PROFUNDIDAD PARA DIFERENTES CALIDADES DE MATERIALES EN EL CUENCO (VER FASE 4 SEGÚN EETT)

<p>6. Fase 4. Cuenco amortiguador y laderas (opcional)</p> <p>En la Fase 4 se examinará el potencial de erosión en el cuenco amortiguador aguas abajo de la cortina.</p> <p>-La profundidad máxima de erosión y la extensión horizontal se definirán para 2 x 5 caudales (2 camas de material diferente) y serán detalladas con Lombardi durante la Fase 2.</p> <p>-Para evaluar el efecto de la ataguía de aguas abajo en la reducción de la erosión en el cuenco amortiguador aumentando el espesor de la lámina de agua se deberá instalar este objeto en el modelo.</p> <p>-La profundidad máxima de erosión y la extensión horizontal se definirán también en esta configuración para 2 x 5 caudales (2 camas de material diferente) y serán detalladas con Lombardi durante la Fase 2.</p> <p>-Como opción, se examinará el potencial de erosión en las laderas aguas abajo de la presa. La profundidad máxima de erosión y la extensión (horizontal y vertical) se definirán para 2 x 5 caudales (2 camas de material diferente) y serán detalladas con Lombardi durante la Fase 2.</p>
--

Fig. 1. Alcance de la fase 4.

Es importante mencionar que no se detallaron las opciones durante la fase 2, por lo que faltó preparar los escenarios correspondientes. Por otro lado, se aprecia que el chorro

golpea directamente el fondo del cauce sin alcanzar francamente las laderas, por lo que se descarta el potencial de erosión en las laderas.

Para las pruebas de la geometría original, Fase I, el cuenco amortiguador se formó con la topografía original con una mezcla de gravilla (grava de 3/8", 4.5mm de diámetro medio) y cemento resistencia final de $f'c=3\text{kg/cm}^2$, aproximadamente:

La topografía original del fondo se muestra en la ilustración 3. En las siguientes ilustraciones se muestran las morfologías de socavación obtenidas con sus principales características.

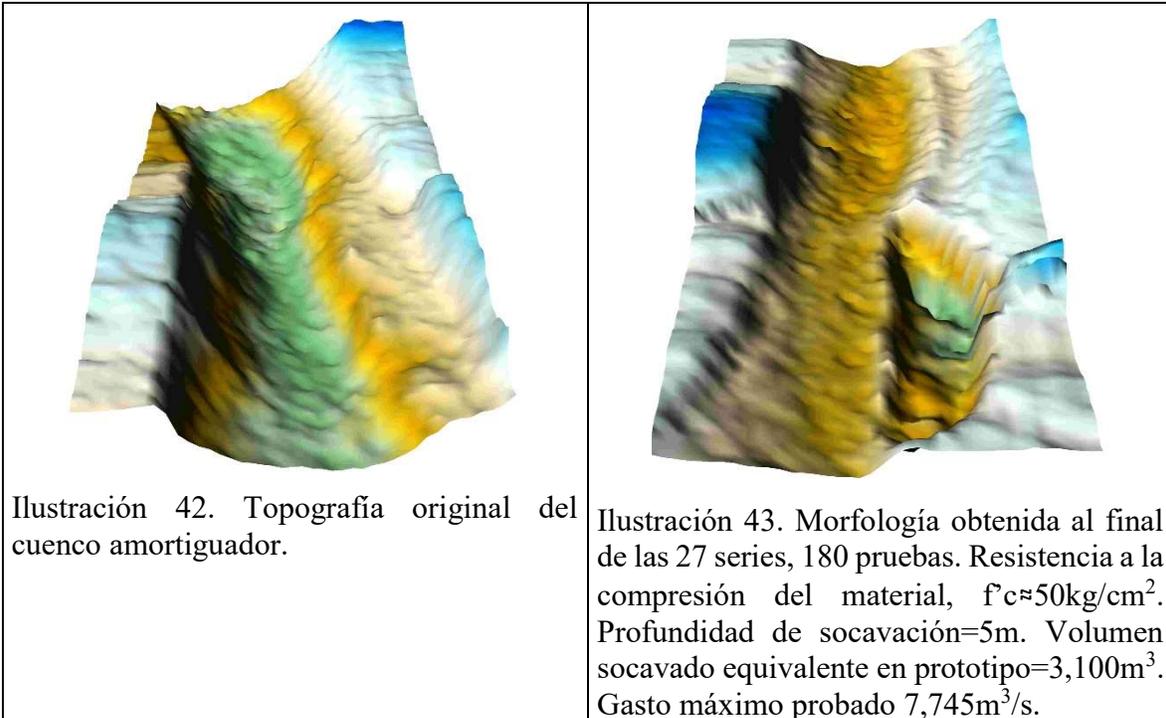




Ilustración 44. Morfología obtenida al final de la serie 28, 5 pruebas. Resistencia a la compresión del material, $f'c \approx 45 \text{ kg/cm}^2$. Profundidad de socavación=2.5m. Volumen socavado equivalente en prototipo= 12 m^3 . Gasto máximo probado $6,010 \text{ m}^3/\text{s}$.

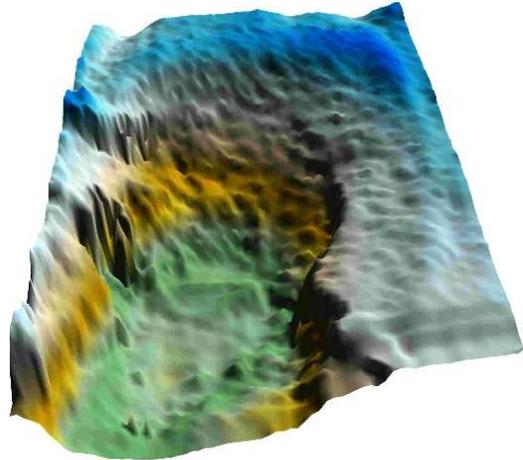


Ilustración 45. Morfología obtenida al final de la serie 29, 1 prueba. Material suelto. Profundidad máxima de socavación=14.7m. Volumen socavado equivalente en prototipo= $22,200 \text{ m}^3$. Gasto máximo probado $1,215 \text{ m}^3/\text{s}$.

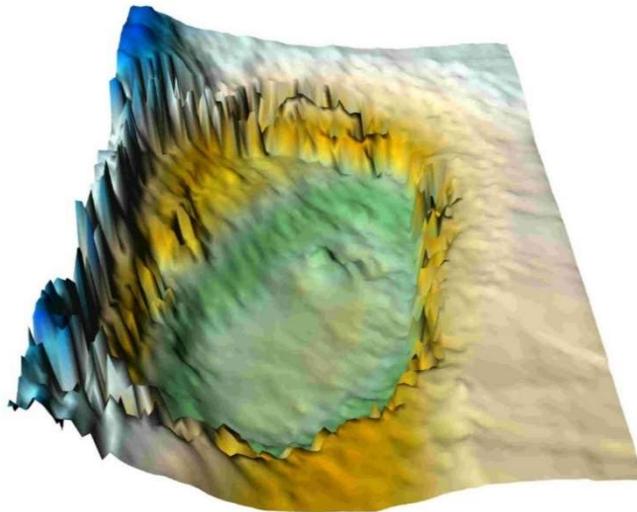


Ilustración 46. Morfología obtenida al final de la serie 30, 1 prueba. Resistencia a la compresión del material, $f'c \approx 2.70 \text{ kg/cm}^2$. Profundidad de socavación=11.1m. Volumen socavado equivalente en prototipo= $12,900 \text{ m}^3$. Gasto máximo probado $1,215 \text{ m}^3/\text{s}$.

Es importante aquí aclarar que los resultados de este tipo de pruebas son cualitativos, y dan una idea de la forma en que se produce la socavación y, comparativamente, la eficiencia del colchón formado en el cuenco para mitigar la socavación en el mismo. Esto último es más difícil de conseguir, ya que se requiere ejecutar pruebas con material de diferente resistencia, hasta encontrar una que genere diferentes morfologías de socavación para cada gasto, con y sin ataguía.

PREGUNTA 5. INFORMACIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO PARA CAUDAL CON TR=10,000.

La serie 26 se realizó con geometría final, correspondiente a la serie 22, pero para el gasto asociado al período de retorno de 10,000 años, (gasto de 7,745 m³/s), con la configuración:

"Modificación de pilas laterales, propuesta P5, modificación de pilas centrales, propuesta No.5, modificación de la salida del deflector central del vertedor, con ángulo de 44°, dados "D2" en la cubeta del vertedor central, y modificación de la salida del deflector del vertedor izquierdo, con ángulo de 44°, ataguía con corona a la elevación 238.50msnm y escotadura de 25.50m de ancho"

Una vez definida la geometría final, considerando que el gasto de diseño es de 6,010 m³/s, asociado a un período de retorno de 1,000 años, se realizó una prueba con el gasto máximo solicitado, asociado a 10,000 años de período de retorno, Lo anterior con la finalidad de observar el comportamiento de la obra de excedencias para esta referencia, reconocida por varios países como el gasto de diseño de este tipo de obras.

Las fotografías 11 a 18 muestran el comportamiento del flujo desde el ingreso al cimacio hasta despegar del deflector y caer en el fondo del cauce con ataguía y escotadura

Las fotografías 11 y 12 muestran el acceso del flujo al cimacio, las perturbaciones se exacerban principalmente en la pila en el extremo de la margen izquierda, las pilas centrales y derecha presentan separaciones del flujo aceptables, ya que se uniformizan al bajar por la rápida. La dirección de llegada del flujo hacia la margen izquierda se presenta en forma casi tangencial, lo cual provoca el fenómeno perturbador al ingreso por la pila.

Las fotografías 13 y 14. Muestran el alcance de los chorros esporádicamente al camino de acceso y la ventana y la vista general del flujo en la zona del cuenco y al ingreso del cauce. El flujo confluye hacia el cauce aguas abajo en forma adecuada, sin invadir prácticamente la ladera de la margen derecha aguas debajo de la ataguía.

La fotografía 15. muestra el choque de los tres chorros en el aire y la disipación de energía asociada.

En la fotografía 16 muestra que los chorros caen antes de la ataguía, sin embargo, se aprecia un fuerte empuje sobre esta. Ya que es una estructura que permanecerá durante la operación de la obra, es conveniente que se construya con un concreto resistente al choque y a la erosión esperada por el flujo.



Fotografía. 124. Acceso del flujo al cimacio, pilas centrales y margen derecha. Se observa separación de flujo aceptable.



Fotografía. 125. Acceso del flujo al cimacio, pilas centrales y margen derecha. Se observa separación de flujo aceptable, excepto en la margen izquierda donde la perturbación viaja incrementándose hacia aguas abajo.



Fotografía. 126. Alcance del chorro para la configuración de la serie 22. El flujo alcanza esporádicamente el camino de acceso y la ventana V1.



Fotografía. 127. Vista general del flujo en la zona del cuenco y al ingreso del cauce. El flujo confluye hacia el cauce aguas abajo en forma adecuada, sin invadir prácticamente la ladera de la margen derecha aguas debajo de la ataguía



Fotografía 128. Se aprecia el choque de los tres chorros en el aire y la disipación de energía asociada.



Fotografía 129. Los chorros caen antes de la ataguía, sin embargo, se aprecia un fuerte empuje sobre esta.



Fotografía. 130. Vista desde aguas abajo del chorro sobre la ataguía.



Fotografía. 131. Vista superior del chorro desde aguas abajo.

ANEXOS

PLANO DE PROPUESTAS DE MODIFICACIONES

PLANO DE MODIFICACIONES FINALES