

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**CANAL DE ADUCCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHACABUQUITO.
REVESTIMIENTO CON HORMIGÓN PROYECTADO (SHOTCRETE).**

**LINCOLN ALVARADO¹.
PABLO LOIS.²
HERNAN ZABALETA³**

RESUMEN

La aducción de la Central Hidroeléctrica Chacabuquito fue diseñada con 2,9 km de túneles de escurrimiento libre y 10,2 km de canal trapecial revestido con hormigón sin armar. Habitualmente los taludes de este revestimiento se construyen con hormigón convencional y moldaje, sin embargo en este caso la empresa constructora presentó una alternativa de construcción mediante revestimiento de hormigón, armado con malla central, lanzado manualmente con pala, alisado con regla vibratoria y terminado con platacho.

El análisis en laboratorio de testigos obtenidos de paños experimentales mostró que la permeabilidad promedio era igual a $2,9 \times 10^{-5}$ m/s mientras que la de cubos de hormigón elaborados en laboratorio con la misma especificación presentan una permeabilidad igual a $7,1 \times 10^{-10}$ m/s. Este resultado llevó a estudiar la posibilidad de utilizar hormigón proyectado (shotcrete) colocado por vía húmeda mediante bomba, alisado y platachado.

El análisis en laboratorio de testigos obtenidos de paños experimentales construidos mediante hormigón proyectado mostró que la permeabilidad promedio era igual a $3,04 \times 10^{-9}$ m/s. Los revestimientos de los taludes del canal de aducción se construyeron con hormigón proyectado, armado con malla central y a la fecha llevan 4 años de funcionamiento sin presentar problemas.

¹ Ingeniero Civil, Edic Ingenieros Ltda. - mail: lalvarado@edic.cl

² Ingeniero Civil, Hidroeléctrica Guardia Vieja S.A. - mail: plois@hgv.cl

³ Ingeniero Civil, Consultorías en Obras de Hormigón - mail: hzabalet@entelchile.net

1. INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica Chacabuquito, propiedad de Hidroeléctrica Guardia Vieja S.A., se ubica en el río Aconcagua a unos 8 km de la ciudad de Los Andes. La central aprovecha una altura neta de caída de 135 m y un caudal de 24 m³/s, para generar una potencia de 25 MW.

La central capta las aguas en la descarga de la Central Los Quilos y mediante una aducción de 13,1 km de longitud, compuesta de canal y dos túneles, las lleva hasta una Cámara de Carga, desde donde nace la tubería en presión que alimenta las 4 turbinas Francis.

El canal de aducción está excavado en suelo y en roca, con una longitud total de 10,2 km; su sección es trapecial y fue diseñada con revestimiento de hormigón.

En esta publicación se describen las experiencias, en prototipo, realizadas para llegar a la metodología que permitió su construcción mediante un revestimiento armado, construido con hormigón proyectado (shotcrete) colocado por vía húmeda.

2. CARACTERÍSTICAS DEL CANAL

El canal fue diseñado de sección trapecial con revestimiento de hormigón sin armar, con las siguientes características:

Canal en suelo	Canal en roca
Ancho basal = 2,60 m	Ancho basal = 2,60 m
Taludes = 2/3 (H/V)	Taludes = 2/3 (H/V)
Altura = 3,55 m	Altura = 3,55 m
Espesor del radier = 15 cm	Espesor del radier = 10 cm
Espesor del talud = 15 cm	Espesor del talud = 10 cm
Pendiente = 0,000385	Pendiente = 0,000385

Teniendo en consideración que el trazado del canal se desarrolla en una ladera, lo que hace que en su desarrollo tenga una cantidad importante de curvas, se utilizó un coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0,016.

3. ANTECEDENTES DE FILTRACIONES EN CANALES REVESTIDOS

En la literatura técnica la información respecto a filtraciones (seepage) en canales revestidos con hormigón es escasa. Fipps y Pope, 1985, citando a Nofziger, 1979, indican los siguientes valores:

Tabla 1 Filtración en canales según el tipo de revestimiento

TIPO DE REVESTIMIENTO	FILTRACIÓN (ft/day)	FILTRACIÓN (m/s)
Hormigón	0,008 – 0,43	$2,8 \times 10^{-7} - 1,5 \times 10^{-5}$
Gunita	0,008 – 0,13	$2,8 \times 10^{-7} - 4,6 \times 10^{-6}$
Plástico	0,010 – 0,50	$3,5 \times 10^{-7} - 1,8 \times 10^{-5}$
Hormigón reforzado ⁽¹⁾	0,001064 - 0,011970	$3,8 \times 10^{-9} - 4,2 \times 10^{-8}$

⁽¹⁾Valores indicados en el USBR, 1963.

4. MÉTODO CONSTRUCTIVO

Habitualmente este tipo de revestimiento se construye mediante hormigón convencional con moldaje y vibrado, lo que puede hacer necesario dejar ventanas en el moldaje. Este método constructivo se complica en las curvas.

La empresa constructora propuso como método constructivo alternativo, para los paños del talud el hormigón lanzado a mano con pala, alisado con regla vibratoria y terminado con platacho. Se construyeron varios paños con este método los que fueron posteriormente analizados para analizar sus resultados.

5. ANÁLISIS DE LOS PAÑOS CONSTRUIDOS CON HORMIGÓN LANZADO

5.1 Observaciones en terreno

Los paños experimentales del talud, de 4,0x4,0 m y 15 cm de espesor, armado con malla ACMA C-92, se construyeron con hormigón, de 6 cm de asentamiento de cono, lanzado con pala, compactado con regla vibratoria y terminado mediante platachado de la superficie.

Una visita a terreno, realizada en Julio de 2001, permitió observar la faena de construcción, constatándose que:

- El paño tiene colocadas la regletas laterales y la malla ACMA central.
- El hormigón, con tamaño máximo de 40 mm, es lanzado manualmente contra el terreno.
- Una vez completado el revestimiento de al menos la mitad del paño, se pasa la regla vibratoria apoyada en maestras laterales de madera.
- Posteriormente se termina la superficie mediante platachado.

Pudo observarse que la compactación del hormigón es muy dudosa, pues proviene principalmente de la acción de la regla vibradora, la cual tiene efecto en 1 a 2 cm superficiales. El lanzamiento con pala y el platachado no produce ningún efecto de compactación.

La terminación superficial del paño resulta bastante aceptable.

5.2 Ensayos en laboratorio

Se obtuvieron 9 testigos de los paños experimentales ya terminados y a título comparativo se elaboró en laboratorio un hormigón de calidad similar al del revestimiento (H20).

Los ensayos (permeabilidad y resistencia) de los testigos obtenidos del prototipo se resumen a continuación:

Tabla 2 Permeabilidad (K) y Resistencia (R) de ensayos de testigos del prototipo

TESTIGO N°	K (m/s)	R (kg/cm ²)
1	$3,2 \times 10^{-7}$	189
2	$8,5 \times 10^{-5}$	121
3	$1,2 \times 10^{-7}$	233
4	$1,3 \times 10^{-5}$	257
5	$1,4 \times 10^{-4}$	141
6	$5,0 \times 10^{-5}$	219
7	$5,7 \times 10^{-7}$	266
8	$4,4 \times 10^{-7}$	244
9	$2,4 \times 10^{-5}$	178
Promedio	$3,5 \times 10^{-5}$	205
Desviación Normal	$4,9 \times 10^{-5}$	51,3

De cubos de hormigón elaborados en laboratorio con 10 días de edad y con la misma dosificación que la del hormigón usado en el prototipo, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3 Permeabilidad (K) y Resistencia (R) de cubos de hormigón elaborados en laboratorio

TESTIGO N°	K (m/s)	R (kg/cm ²)
1	$8,9 \times 10^{-10}$	134
2	$9,0 \times 10^{-10}$	146
3	$6,6 \times 10^{-10}$	148
4	$3,8 \times 10^{-10}$	138
Promedio	$7,1 \times 10^{-10}$	142
Desviación Normal	$2,4 \times 10^{-10}$	6,6

De cubos de hormigón, elaborados en laboratorio con 10 días de edad y con la misma dosificación que la del hormigón usado en el prototipo, se obtuvieron los siguientes resultados:

De la observación de los resultados se obtiene que la permeabilidad media de los testigos del prototipo es alta ($2,9 \times 10^{-5}$ m/s) comparada con la obtenida de los cubos de hormigón elaborados en el laboratorio ($7,1 \times 10^{-10}$ m/s) y con lo que en la literatura se indica como valor para el hormigón ($1,0 \times 10^{-7}$ m/s).

Esto significa que la permeabilidad de los paños del prototipo es 300 mayor que la que habitualmente tiene un revestimiento de hormigón.

5.3 Comentarios

Los resultados de los ensayos han confirmado que la metodología de construcción propuesta conduce a un hormigón con una alta y muy variable permeabilidad y a una resistencia inferior a la especificada.

Este hecho, además de las consecuencias sobre la durabilidad del revestimiento, tiene un significado económico, importante derivado de la pérdida de agua por filtraciones y sobre la seguridad estructural de la obra, pues es posible que la saturación del terreno afecte su capacidad de soporte del suelo o se produzcan subpresiones excesivas al vaciar el canal.

Como una solución alternativa se propuso el empleo de un hormigón proyectado por vía húmeda.

6. ANÁLISIS DE PAÑOS CONSTRUIDOS CON HORMIGÓN PROYECTADO

Se construyeron paños experimentales, de las mismas características de los mencionados en 5.3, con hormigón proyectado por vía húmeda mediante bomba, alisado y platabado.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se indican a continuación:

Tabla 4 Permeabilidad (K) y Resistencia (R) del hormigón proyectado

PAÑO km	K (m/s)	R (kg/cm ²) ⁽¹⁾
1.814 - 1.818	$4,85 \times 10^{-12}$	346
1.830 - 1.834	$6,92 \times 10^{-10}$	220
1.846 - 1.850	$2,53 \times 10^{-11}$	155
1.854 - 1.858	$4,06 \times 10^{-9}$	160
1.870 - 1.874	$1,04 \times 10^{-8}$	241
Promedio	$3,04 \times 10^{-9}$	224
Desviación Normal	$4,44 \times 10^{-9}$	78

⁽¹⁾ Resistencia a los 6 días

Los resultados obtenidos muestran que en este caso el hormigón presenta una baja permeabilidad, muy inferior a la del hormigón lanzado (3×10^{-9} m/s versus $3,9 \times 10^{-5}$ m/s).

Este valor es aceptable, lo que indica que se obtiene una compactación notablemente mayor que con el sistema de hormigón lanzado, aún cuando la variabilidad relativa de ambos sistemas es similar.

Este procedimiento de colocación del hormigón da una suficiente seguridad en cuanto a la calidad del revestimiento, pues asegura que menos del uno por mil de los paños tendrá un coeficiente de permeabilidad inferior a 10^{-8} m/s, que es el valor aceptable para el revestimiento del canal.

Los valores de la resistencia resultaron superiores a la calidad exigida, o sea, hormigón H 20.

Lo anteriormente indicado condujo a aceptar la construcción de los revestimientos laterales del canal con hormigón proyectado, colocado con bomba por vía húmeda. Sin embargo teniendo en cuenta que la colocación presenta una variabilidad importante fue necesario especificar que el procedimiento se aplique empleando un hormigón y un equipamiento apropiado, con una mano de obra calificada. Además se utilizó un estricto control de calidad inicial.

Finalmente se construyeron los revestimientos laterales en paños de 4,0 m de ancho, 13 cm de espesor, con una malla central del tipo ACMA Q-92 ($\phi = 4,2$ mm). Es necesario destacar la importancia de la utilización de la malla, pues sin ella el hormigón proyectado no se sujeta al ser colocado y se desliza.

7. OPERACIÓN DEL CANAL

La central fue puesta en servicio en Julio del año 2002 y no se han presentado problemas en el canal hasta la fecha.

La Foto 5 tomada en Mayo de 2005 muestra el estado del canal.

8. CONCLUSIONES

El revestimiento de los taludes del canal mediante hormigón lanzado con pala no cumple con las especificaciones de resistencia ni con la permeabilidad que habitualmente tienen los canales revestidos con hormigón, por esta razón no debe ser usado.

El revestimiento de los taludes del canal mediante hormigón proyectado, armado con malla, cumple con las especificaciones de resistencia y con la permeabilidad que habitualmente tienen los canales revestidos con hormigón.

Considerando como valor de permeabilidad promedio:

- hormigón lanzado = $2,90 \times 10^{-5}$ m/s
- hormigón proyectado = $3,04 \times 10^{-9}$ m/s

Para 10 km de canal la diferencia de caudal perdido por filtraciones a través de los taludes resulta igual a $1,16 \text{ m}^3/\text{s}$.

La elección de construir el revestimiento mediante hormigón convencional con moldaje u hormigón proyectado depende de un estudio económico que considere los plazos de construcción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Hidroeléctrica Guardia Vieja S.A. la autorización y facilidades para la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

Edic Ingenieros Ltda. 2001. Proyecto Central Chacabuquito Servicios de Ingeniería Obras de Aducción.

Guy Fipps and Craig Pope -Internet 2004. Irrigation district efficiencies and potencial water savings in the lower rio Grande Valley of Texas.

Oklahoma Water Resources Research Institute. Nofziger DL.1979. The influence of canal seepage on groundwater in Lugert Lake irrigation area

USB. 1963. Linings for irrigation canals.

APÉNDICE DE FOTOS



Foto 1 Hormigón lanzado manualmente con pala



Foto 2 Alisado con regla vibratoria



Foto 3 Construcción mediante hormigón proyectado



Foto 4 Tramo de canal terminado



Foto 5 Canal Mayo 2005

