

## CRITERIOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DE LA CORTINA DE IMPERMEABILIZACIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PIRRÍS, COSTA RICA

Carlos Chaves & Asdrúbal Vargas

Centro de Servicio Exploración Subterránea, Área de perforación y servicios conexos, Instituto Costarricense de Electricidad  
E-mail: cchaves@ice.go.cr / avargasS@ice.go.cr

(Recibido 7/6/05; Aceptado 5/10/05)

**ABSTRACT:** The grout curtain is one of the most important civil works at the Pirris Hydropower Plant. The main objective of the grout curtain is to reduce seepage of the reservoir, conformed by a compacted concrete dam 113 m in height. For the design of the grout curtain, geological and hydrogeological studies were carried out, such as water pressure test and cement penetration test. Moreover, laboratory and field tests were made to evaluate the features of the appropriate mixture water/cement.

The sealing treatment of the curtain requires the injection of a mixture of water and cement at a length of approximately one hundred meters within both margins. The final design of the grout curtain includes 42 000 m of holes, where 5 500 tons of cement will be injected.

The injections are made directly in the river bed and in galleries located at both margins of the dam. The galleries are constructed in four levels, with a total length of 800 m. The cement injection is realized at different stages, begins in the lower stage of the foundation, located at the elevation 1105 m.a.s.l., finishing in the level 1210 m.a.s.l. The maximal injection pressure used is 20 kg/cm<sup>2</sup>, twice the maximum load of the water in the reservoir. It is strongly recommended an individual treatment of sectors with weak and geomechanically poor rock conditions or the fault zones.

**Keywords:** Pirris dam site, grouting of sedimentary rocks, hydrogeology in power plants, water pressure test.

**RESUMEN:** La cortina de inyección es una de las obras civiles de mayor importancia del Proyecto Hidroeléctrico Pirris y tiene como propósito, garantizar la estanqueidad de las aguas embalsadas por la construcción de una presa de concreto compactado con rodillo de 113 m de altura. Para la elaboración del diseño final de la cortina de inyección, fueron necesarios diversos estudios geológicos e hidrogeológicos, pruebas de agua a presión, pruebas de inyectabilidad, además de ensayos de laboratorio y de campo para valorar las características de las mezclas agua/cemento.

El tratamiento de impermeabilización de la cortina se llevará a cabo con inyecciones de agua/cemento y abarcará aproximadamente 100 metros dentro de ambos estribos. Serán necesarios cerca de 42 000 m de perforación, por medio de los cuales se pretende inyectar al macizo rocoso unas 5 500 toneladas de cemento. Las perforaciones se harán directamente en el cauce y desde galerías excavadas en los estribos, las cuales se disponen en cuatro niveles, sumando una longitud total de 800 m. La inyección iniciará en el nivel más bajo situado en la cota 1 105 m.s.n.m., finalizando a los 1 210 m.s.n.m.

La presión de inyección que se utilizará será de 20 kg/cm<sup>2</sup>, casi el doble de la carga máxima del embalse y se recomienda tratar de forma independiente los sectores de roca geomecánicamente de baja resistencia y las zonas de falla que son de fácil inyección.

**Palabras clave:** Proyecto hidroeléctrico Pirris, cortina de inyección, hidrogeología en proyectos hidroeléctricos, prueba de permeabilidad.

## INTRODUCCIÓN

El Proyecto Hidroeléctrico Pirris es propiedad del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y se encuentra en su fase constructiva. Está localizado en la zona de Los Santos y pretende aprovechar las aguas del río Pirris, por medio de la construcción de una presa de gravedad construida en concreto compactado con rodillo (RCC, por sus siglas en inglés). Tendrá 113 m

de altura y creará un embalse con un volumen útil de 30 Hm<sup>3</sup>, que generará una potencia máxima de 128 MW, como resultado de una caída bruta de 874 m. El sitio de construcción de la cortina de inyección está estrechamente relacionado con el sitio de presa, el cual se encuentra localizado en las coordenadas 399250 de latitud Norte y 451800 de longitud Oeste de la hoja topográfica Dota, editada por el Instituto Geográfico Nacional a escala 1:50 000 (Fig. 1).

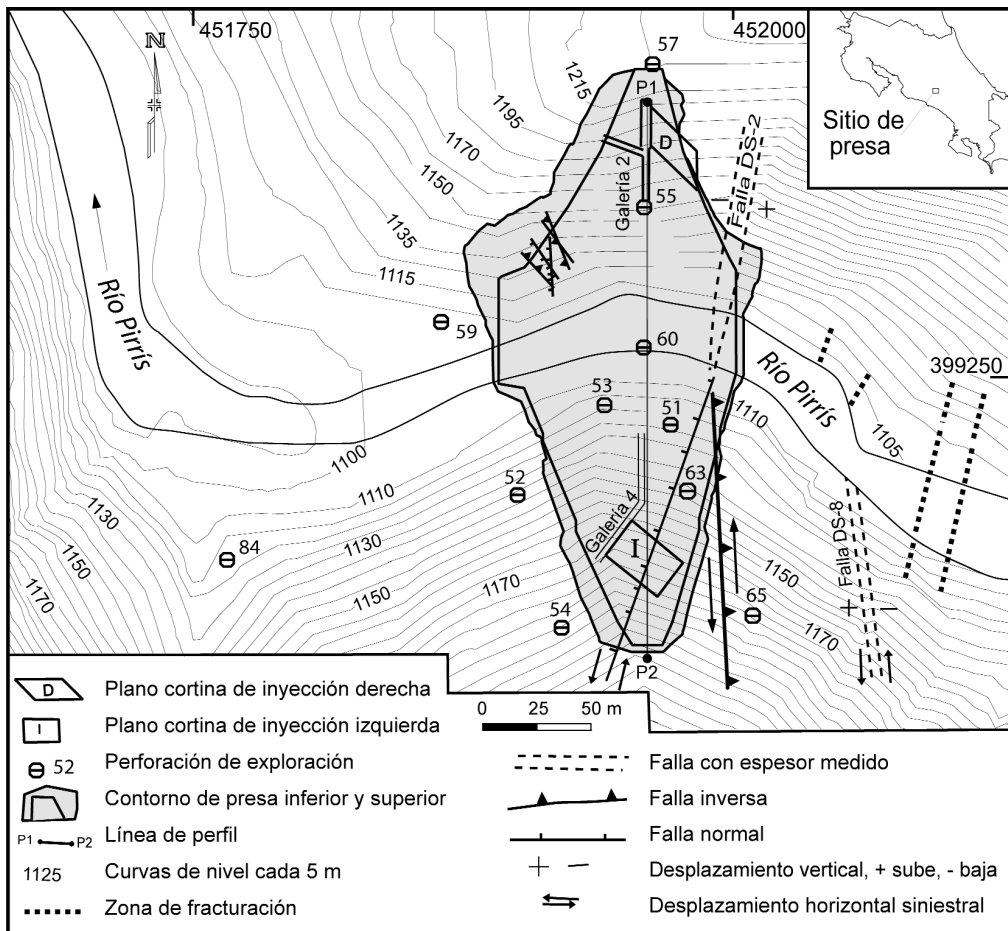


Fig. 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

En el presente artículo se describe el diseño de la cortina de inyección más adecuado para la presa del P.H. Pirris, tomando en cuenta las características geológicas e hidrogeológicas del macizo rocoso que servirá de fundación para la presa. Además, se pretende ilustrar el proceso de diseño de la cortina en cada una de sus etapas.

Para llegar a definir el diseño de la cortina de inyección se realizaron en primera instancia investigaciones geológicas e hidrogeológicas por medio de perforaciones y cartografiado de campo en el sitio de presa. Seguidamente se realizaron dos cortinas de prueba, utilizando las galerías de investigación ubicadas en ambos márgenes del sitio de presa. Estos ensayos permitieron seleccionar el diseño de lechada agua/cemento más apropiado. Después del análisis de los resultados obtenidos se propuso el diseño final de la cortina de inyección, incluyendo la geometría de la cortina en los estribos y bajo el nivel del cauce del río, además del cálculo de metros de perforación y el consumo de cemento, entre otros aspectos.

Este trabajo surge como una necesidad de normalizar el diseño de una cortina de inyección. Las características geológicas del sitio de presa fueron investigadas por Rodríguez (1997) y complementadas por Avila (1999), quien investigó varias anomalías con métodos geofísicos. Por otra parte, la evaluación de la estanqueidad del embalse y la amenaza por deslizamientos fue evaluada por Barrantes (2000). Más recientemente, se hizo una revisión de la geología, hidrogeología y los aspectos estructurales.

## MARCO GEOLÓGICO

La presa será fundada sobre un macizo constituido por rocas sedimentarias de origen marino, correlacionables con la Formación Térraba de edad Oligoceno-Mioceno. Se trata de una secuencia estratificada de lutitas y areniscas, con intercalaciones de areniscas brechosas, de color gris claro a gris oscuro, con mucho aporte volcánico y cemento carbonatado. Los estratos tienen espesores centimétricos a métricos y presentan variadas estructuras sedimentarias y algunas estructuras biogénicas. Cuando se meteorizan,

desarrollan abundantes óxidos de hierro y una destacada alteración esferoidal.

Dentro de la secuencia están intercaladas también estratos con diferentes grados de silicificación. Este tipo de alteración fue producto de la circulación de fluidos hidrotermales ricos en sílice, a través de estratos que originalmente debieron de haber sido más porosos y permeables. La alteración provocó el reemplazamiento del cemento carbonatado por sílice, transfiriéndole a la roca una mayor dureza y un cambio de coloración bastante notorio (color gris claro). Los niveles más intensamente silicificados poseen espesores métricos y corresponden con las granulometrías más gruesas.

El buzamiento general varía entre 15° y 20° en dirección al noroeste (azimut 290°), es decir hacia aguas abajo del eje de presa. Esta disposición estructural de los estratos, determina la configuración geomorfológica del valle, caracterizado por un perfil asimétrico con pendientes relativamente suaves en la margen izquierda (buzamiento) y muy abruptas en la margen derecha (Fig. 2).

Las pendientes fuertes de la margen derecha, han favorecido la formación de amplios afloramientos, donde se observa un marcado fracturamiento de alto ángulo, que se desarrolla mejor en ciertos paquetes de estratos. De manera general, el macizo está afectado por cuatro familias de fracturas y al menos dos fallas principales, además de varias zonas de fracturamiento, con orientaciones preferenciales Norte-Sur (tendencia paralela al eje de presa).

Por otra parte, el proceso natural de evolución de las laderas y la acción dinámica del río, han dado como resultado la formación de depósitos de coluvio y aluviones, que representan los últimos eventos geológicos del Sitio de Presa. Estos depósitos están compuestos por materiales inconsolidados y de granulometría variada, derivados casi en su totalidad de la meteorización y desintegración de las rocas sedimentarias subyacentes. Los coluvios son los depósitos dominantes y se encuentran mejor desarrollados en la margen izquierda, como resultados de la inclinación favorable del buzamiento. Mantienen una condición de estabilidad precaria y podrían experimentar

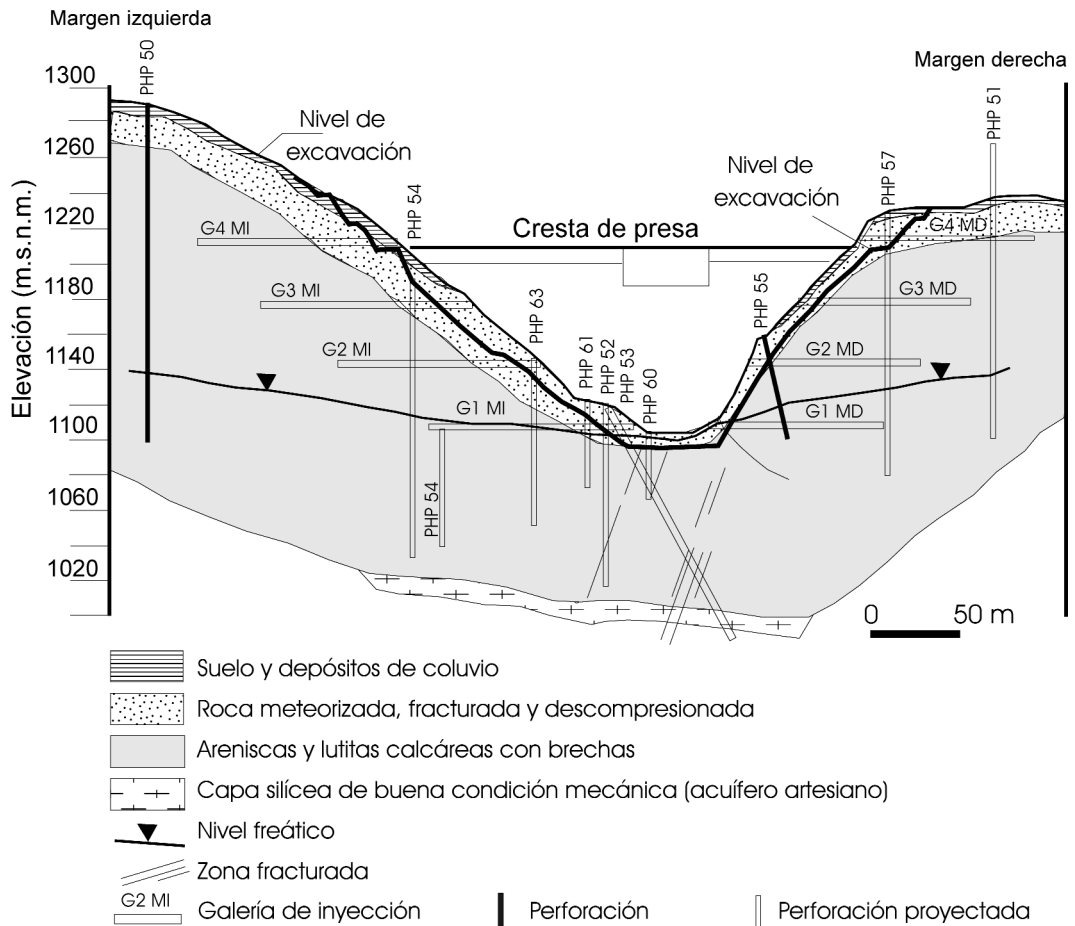


Fig. 2: Perfil geológico esquemático mostrando perforaciones, nivel freático y límite de permeabilidad.

fenómenos de deslizamiento en caso de ser alterados por factores antrópicos (excavaciones, mal manejo de aguas de escorrentía superficial, entre otros). Para efectos de la fundación de la presa deben de ser removidos, al igual que los depósitos de aluvión.

### CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

La información obtenida en las diferentes campañas de perforación, confirman la existencia de dos acuíferos de características y génesis distintas. Uno de ellos está sometido a la gravedad

y muestra influencia regional y el otro es de extensión local y presenta artesianismo surgente en algunas perforaciones.

En ambos casos, las propiedades intrínsecas de la roca sedimentaria, constituida por una matriz impermeable, no favorecen el paso del agua. Esto ocurre principalmente a través de fisuras asociadas con fallas y zonas de intenso fracturamiento, desarrolladas a partir de la deformación frágil de la roca, producto de los esfuerzos tectónicos que han afectado la región. En menor grado de importancia, se ha observado que la formación de delgadas fallas estratigráficas subordinadas a las fallas de rumbo, permiten

la comunicación hidráulica con las fracturas tectónicas y en algunos casos constituyen sellos.

En el caso del acuífero libre, los niveles de agua medidos en los pozos perforados sobre cada margen del Sitio de Presa, indican que la superficie freática se encuentra por encima del nivel del río, provocando que el flujo de agua subterránea drene hacia el cauce (acuífero efluente), con gradientes hidráulicos muy bajos, del orden de 0,11 ( $\approx 6^\circ$ ) en la margen izquierda y 0,23 ( $\approx 13^\circ$ ) en la derecha.

Gradientes hidráulicos bajos, son representativos de un macizo permeable. No obstante, la prevalencia de valores de permeabilidad bajos en las pruebas de agua sugieren una condición contraria, determinada posiblemente por factores morfológicos, topográficos, climáticos y antropogénicos, típicos del sitio de presa y zonas aledañas. En particular, la existencia de filas alargadas y de divisorias estrechas, delimitadas por laderas de fuerte pendiente, aunado a la deforestación y la existencia de horizontes de suelo arcilloso, podría estar propiciando más la escorrentía superficial y flujo hipodérmico, que la percolación profunda y consecuente recarga del acuífero. Prueba de este hecho, se refleja en la escasa variación del nivel freático en los diversos puntos de observación, entre una estación y otra (seca y lluviosa).

La existencia del acuífero artesiano, se detectó por primera vez en la margen izquierda mediante la perforación PHP 52 SP, confirmándose posteriormente en nueve perforaciones más. La manifestación del artesianismo se correlacionó con la presencia de una capa de roca de 13 a 15 m de espesor, intercalada en la secuencia sedimentaria y con propiedades muy particulares. Esta se localiza a unos 85 m de profundidad, bajo el eje de presa y sobresale por su coloración clara, a diferencia del color oscuro de las rocas carbonáticas. Se caracteriza por una silicificación intensa, con desarrollo de minerales sulfurosos (pirita), algunos silicatos (clorita y epidota) y arcillas. Este acuífero confinado se encuentra separado del acuífero libre por la misma secuencia sedimentaria, pero de menor conductividad hidráulica lo que provoca el confinamiento. Además, la porosidad que presenta es de tipo secundaria por fracturamiento.

## TRATAMIENTO DE IMPERMEABILIZACIÓN

En el informe Geológico-Geotécnico de Factibilidad del Sitio de Presa N°2 publicado por la Dirección de Ingeniería Civil (DIC, 1997), se abarcó el tema de las obras de impermeabilización, enfocado a la necesidad de construir una cortina de inyección para asegurar la estanqueidad del embalse y solucionar también problemas de filtración a través de la fundación de la presa (pérdida de agua y tubificación). Esta cortina debería homogenizar la permeabilidad del macizo rocoso a un valor de 5 unidades Lugeon (5 U.L.). Para llegar a establecer la intensidad y magnitud del tratamiento, fue necesario investigar por varios años las características geoestructurales, geotécnicas, hidrogeológicas, hidrogeoquímicas y geofísicas del sitio de presa. Asimismo, se realizaron dos cortinas de prueba en cada margen para valorar la inyectabilidad del macizo y diversos ensayos de laboratorio y de campo dirigidos al estudio de diferentes mezclas de lechada considerando además aditivos.

## CORTINAS DE PRUEBA

Se realizaron dos pruebas de inyectabilidad de la roca sobre el eje de presa, aprovechando las galerías excavadas para investigaciones geológico-geotécnicas. El diseño y los procedimientos a utilizar se establecieron con base en la experiencia, aplicando el método de inyección denominado "GIN" Lombardi & Deere (1993).

### Macizo rocoso ensayado

El macizo rocoso ensayado está constituido por rocas sedimentarias afectadas por varias familias de discontinuidades (fracturas y planos de estratificación) y de fallas. Considerando los resultados de las pruebas de agua a presión se determinó que la matriz de la roca se considera impermeable, por lo que el flujo del agua ocurre a través de las fisuras, siguiendo el principio de vasos comunicantes. En vista del control fisural,

fue necesario determinar los patrones de discontinuidades de manera previa a los ensayos, a fin de orientar adecuadamente las perforaciones de prueba, en procura de interceptar la mayor cantidad de fisuras. El cuadro 1, presenta las tendencias estadísticas de las familias encontradas en cada margen.

Cuadro 1

Familias de discontinuidades del sitio de presa (P.H. Pirris)				
Fam.	Galería 2 margen derecha		Galería 4 margen izquierda	
	Dir.	Buz.	Dir.	Buz.
J-1	110°	54°	1 (a) 096° 1 (b) 266°	70° 85°
J-2	303°	20°	268°	15°
J-3	068°	87°	065°	66°
J-4	015°	82°	000°	82°

Fam.= familia; Dir.= Dirección; Buz.= Buzamiento.  
Tomado de Chaves & Zumbado, 1999.

### Localización y diseño de las cortinas de prueba

En la margen derecha, la cortina se ejecutó en la Galería No. 2 (entre setiembre y diciembre de 1998), a una elevación de 1155 m.s.n.m. y a 55 m sobre el lecho del río, mientras la de margen izquierda se realizó en la Galería No. 4 (entre enero y diciembre de 1999), situada en la cota de 1120 m.s.n.m. y a 20 m por encima del cauce (Fig. 2).

Sobre la margen derecha, las perforaciones de inyección se orientaron con un azimut de 135°, inclinadas 53° respecto a la horizontal y con longitudes de 40 m. Las primarias se ubicaron cada 6 metros, con cierre progresivo de secundarias y terciarias a distancias intermedias. En la margen izquierda, el plano de cortina se configuró con perforaciones direccionadas a 130°, 45° de inclinación y 45 m de longitud, con distancias entre primarias de 5 m, colocando las secundarias y terciarias siguiendo el mismo principio que en margen derecha. Los ensayos de inyección se programaron en tramos descendentes de 5 m de

profundidad, dejando los 5 m iniciales como cobertura de protección.

### Determinación de la permeabilidad y método de inyección

La permeabilidad se determinó por medio de las pruebas de agua a presión tipo Lugeon ("water pressure tests") e interpretadas según los principios de Houslyby (1990). Para la inyección se utilizó el método "GIN" ("Grouting Intensity Number", propuesto y descrito por Lombardi, G. & Deere, D., 1993), que consiste en el uso de una lechada estable con una única relación agua/cemento para todo el proceso, inyectada gradualmente hasta alcanzar una presión máxima o volumen máximo, o bien, un valor intermedio, definido por la representación gráfica de la intensidad seleccionada.

En las pruebas se utilizaron las envolventes limitantes de 500 bar\*l/m ( $P_{max.}=15$  bares y  $Vol_{max.}=100$  l/m) para el tramo inicial de 5 a 10 m y de 1000 bar\*l/m ( $P_{max.}=20$  bares y  $Vol_{max.}=150$  l/m), para los tramos restantes. La permeabilidad residual a obtener, se estableció en 5 unidades Lugeon considerando que con esta permeabilidad se reducen las filtraciones a niveles bajos.

### Diseño de lechada agua-cemento

Con base en ensayos de campo, se seleccionó para la margen derecha una relación de agua/cemento (A/C) = 0,67:1. Se utilizó cemento portland IP ECOLCEM 246, fabricado por Industria Nacional de Cemento (INCSA), con finura Blaine de 4200 cm<sup>2</sup>/gr y sin uso de aditivos fluidificantes. La lechada obtenida se caracterizó por viscosidades de cono entre 29 y 31 segundos, sedimentaciones entre 5 y 6 %, peso específico de 1,42-1,50 gr/cm<sup>3</sup> y una cohesión relativa de 0,17mm.

En la margen izquierda se aceptó una relación (A/C) = 0,67:1, con adición de fluidificante CRF-2 al 0,2% por peso de cemento. De esta manera, se obtuvo en la mezcla resultante una viscosidad de 37 segundos, sedimentación del 5%, densidad de 1,6 gr/cm<sup>3</sup> y una cohesión relativa de 0,04 mm.

## Resultados

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas son muy diferentes. En la margen derecha, todos los ensayos se realizaron sobre el nivel freático y no fue necesario prolongarlos hasta una fase terciaria, debido a permeabilidades sumamente bajas (Cuadro 2), excepto en la perforación secundaria PS5 donde los valores varían de 4 a 16 U.L. En la margen derecha las aceptaciones de cemento fueron variables. En la perforación primaria 1, la aceptación varió de 9 a 19 l/m, con valores más frecuentes sobre los 10 l/m (Cuadro 3).

Cuadro 2

Resultados de pruebas de permeabilidad en perforaciones de la galería 2 (margen derecha)

Tramo (m)	PP1	PS5	PP2	PS6	PP3	PS7	PP4
5-10	10,0	16,0	n.p.	1,0	4,6	9,0	3,0
10-15	8,3	9,0	0,5	2,0	0,6	4,0	0,8
15-20	12,0	4,0	0,1	1,0	3,0	2,0	0,0
20-25	4,5	13,0	0,9	0,1	0,0	2,0	0,4
25-30	2,4	6,0	0,4	0,2	1,8	0,2	0,1
30-35	3,4	3,9	0,2	0,1	0,1	0,6	0,0
35-40	1,9	5,0	2,4	0,1	0,3	2,1	0,3

PP= perforación primaria, PS= perforación secundaria, n.p.= tramo no probado.

Tomado de Chaves & Zumbado, 1999.

Cuadro 3

Resultados de aceptación de lechada (l/m) en perforaciones de la galería 2 (margen derecha)

Tramo (m)	PP1	PS5	PP2	PS6	PP3	PS7	PP4
5-10	12	20	n.i.	7	3	35	4
10-15	9	13	n.i.	12	8	6	n.i.
15-20	11	13	n.i.	5	11	9	n.i.
20-25	19	9	8	4	n.i.	27	10
25-30	10	17	12	12	25	6	n.i.
30-35	13	25	n.i.	27	n.i.	6	n.i.
35-40	12	15	13	5	11	6	11

PP= perforación primaria, PS= perforación secundaria, n.i.= tramo no inyectado.

Tomado de Chaves & Zumbado, 1999.

Cuadro 4

Resultados de pruebas de permeabilidad (U.L.) en perforaciones de la galería 4 (margen izquierda)

Intervalo (m)	PP 1	PS 6	PT 10	PP 2	PT 11	PS 7	PT 12	PP 3	PT 13	PS 8	PT 14	PP 4	PT 15
5-10	33	14	27	>50	9	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
10-15	34	40	32	>50	42	>50	5	>50	41	>50	>50	43	50
15-20	20	21	4	>50	0	1	11	45	12	>50	24	35	15
20-25	18	32		9,0		45		>50	12	>50	26	28	4
25-30	>50	15		>50		>50		32	2	28	0	23	0
30-35	33	26		>50		7		35	0	4	0	3	0
35-40	2	17		>50		10		>50	48	>50	7	>50	46
40-45	3	6		0,2		0,1		9	0	2		8	

PP= perforación primaria, PS= perforación secundaria, PT= perforación terciaria.

Tomado de Chaves & Zumbado, 2000.

En contraste, la mayor parte de los ensayos sobre la margen izquierda se llevaron a cabo por debajo del nivel freático, registrándose durante las fases primaria y secundaria, permeabilidades en extremo elevadas (36% de los ensayos >50 UL, Cuadro 4), coincidentes con volúmenes altos de aceptación (máximo 307 l/m). A pesar de esta situación, no se corroboró una eficiente difusión horizontal de la lechada. Las pruebas de agua en la fase terciaria se ensayaron en 39 tramos, algunos de los cuales muestran una reducción significativa de la permeabilidad, no obstante, dentro de aquellos sectores catalogados como más permeables en

las fases anteriores, los valores elevados persisten (18% de los ensayos >50UL, Cuadro 4).

Con el avance de las fases de inyección se notó que los tramos inyectados registraron aceptaciones de lechada relativamente bajas (Cuadro 5). De acuerdo con las observaciones, los valores de permeabilidad y aceptación elevados, están normalmente relacionados con zonas de baja calidad física de la roca, caracterizadas por un fracturamiento intenso y evidencias de falla.

### Interpretaciones y utilidad práctica de los resultados

Al relacionar la calidad física de los núcleos recuperados con los resultados de los ensayos, se constató una buena correspondencia entre las

zonas fracturadas y valores elevados de permeabilidad y aceptación. Por otra parte, los tramos afectados por fracturas aisladas (asociables con las familias J1, J3 y J4), son, por lo general, cerradas, con superficies rugosas onduladas y rugosas escalonadas, con escaso desarrollo de pátinas de hierro y en muy contadas ocasiones con decoloración de las paredes y se caracterizaron por reducidas permeabilidades y aceptaciones. Un porcentaje alto (entre 20 y 30%) muestra rellenos de calcita. Estas características permiten categorizar la roca en diferentes grados de sanidad, según se presenta en el cuadro 6.

Según el análisis realizado, la cortina de prueba de la margen derecha se realizó en un sector del macizo rocoso sedimentario, de regular a excelente calidad física (roca muy sana a sana), poco afectado por zonas de fracturas y en consecuencia con

Cuadro 5

Resultados de aceptación (l/m) de lechada en perforaciones  
Galería No. 4 de margen izquierda

Intervalo (m)	PP 1	PS 6	PT 10	PP 2	PT 11	PS 7	PT 12	PP 3	PT 13	PS 8	PT 14	PP 4	PT 15
5-10	14	16	8	30	13	213	18	20	28	102	26	29	41
10-15	12	8	7	54	11	41	8	11	9	40	27	8	23
15-20	19	8	20	155	n.i	4	n.i.	78	13	44	14	25	14
20-25	97	9		27		22		74	21	58	27	62	11
25-30	74	26		154		146		154	5	60	n.i.	70	n.i.
30-35	21	41		307		37		153	n.i.	15	n.i.	18	n.i.
35-40	15	22		153		49		120	23	154	8	128	25
40-45	27	n.i		9		n.i		49	n.i.	13		24	

PP= perforación primaria, PS= perforación secundaria,  
PT= perforación terciaria, n.i.= tramo no inyectado.  
Tomado de Chaves & Zumbado, 2000.

Cuadro 6

Relación entre la calidad física de la roca y la permeabilidad

Categoría	% Recuperación	% RQD	No. Frac.	Tipo	K (U.L)	AC (l/m)
Muy sana	>90 (ex.)	>75 (b-exc)	0-3	1	0-6	0-15
Sana	>85 (b-exc)	40-75 (reg.-b)	3-10	1, 2	1-25	10-50
± Sana	70-90 (reg-b)	0-40 (mp-p)	5-15	1, 2	10-50	25-75
Zona de Falla	0-80 (b-reg)	0-20 (mp)	>15	1,2, 3	>30	>50

No. Frac.= Número de fracturas por metro lineal, K= permeabilidad, AC= aceptación, exc= excelente, b= buena; reg= regular, mp= muy pobre; p= pobre.

1- Fracturas cerradas (<0,5 mm), rugosas, con pátinas de óxidos de hierro.

2-Fracturas ligeramente abiertas (0,5 a 1 mm), con óxidos de hierro y manganeso.

3-Fracturas abiertas (<10 mm), con mucho óxidos de hierro y manganeso, a veces con meteorización avanzada.

Tomado de Chaves & Zumbado, 1999.



un bajo grado de permeabilidad. En contraste, la cortina de margen izquierda se llevó a cabo en rocas sedimentarias de condición física variable (incluye las 4 categorías), en donde predominan las zonas de fracturación, con recuperación baja, RQD muy pobre y por lo general con altas permeabilidades.

De acuerdo con las interpretaciones del modelo geológico (Rodríguez, 1997), el plano de cortina de margen izquierda intercepta, entre los 5 y 35m de profundidad, una zona fracturada y fallada de alto ángulo, conformada por una serie de ramificaciones orientadas al NNE y que se asocian con la Falla DS-2.

A lo largo de las 3 fases llevadas a cabo en la prueba de margen izquierda, estas estructuras han mostrado una alta permeabilidad en comparación con la roca muy sana a sana. Dicha permeabilidad no es homogénea a lo largo de las estructuras y se caracteriza por una preferencia básicamente vertical, evidenciada por el sentido de difusión de la lechada inyectada. Además, se determinó una tendencia de aumento de la permeabilidad natural, provocada por el lavado de rellenos limo-arcillosos y limo-arenosos, durante las pruebas de agua de la fase primaria y secundaria.

Por otra parte, la ocurrencia de fracturas paralelas a la estratificación no es común (familia J2), debido a una fuerte unión entre los estratos. No obstante, en la fase terciaria se encontraron, de manera muy localizada, algunas fracturas estratigráficas rellenas de lechada, que aparentemente son de poca extensión y fácilmente inyectables.

Se concluye que las categorías de roca sana y muy sana, se pueden considerar como impermeables para efectos prácticos y no son inyectables. Por consiguiente, la impermeabilización del Sitio de Presa debe estar dirigida al tratamiento de los sectores afectados por un mayor grado de fracturación y zonas de falla.

## DISEÑO FINAL DE LA CORTINA DE INYECCIÓN

### Consideraciones preliminares

Durante su visita en 1999, el consultor internacional Dr. Andrew Merritt avaló la ejecución

de una cortina de inyección, que podría ser hecha mediante perforaciones inclinadas hacia aguas arriba, desde diferentes niveles de galerías. Asimismo, recomendó que el tratamiento fuera sistemático en ambas márgenes y en caso de ser necesario, complementado con perforaciones dispuestas en abanico, hacia la parte final de las galerías. Los objetivos de dicha cortina serían reducir la permeabilidad y consolidar el macizo rocoso evitando procesos de erosión o tubificación.

Una vez establecida la necesidad de una cortina y los parámetros requeridos, se procedió al análisis de diferentes posibilidades para el diseño geométrico. Se tomaron en cuenta, entre otros aspectos: la topografía, el bajo gradiente hidráulico, la profundidad del acuífero artesiano y las limitaciones de los equipos de perforación e inyección. Inicialmente, se planteó excavar 4 galerías en la margen derecha y 5 en la margen izquierda, orientadas hacia aguas arriba. Bajo el nivel de fundación de la presa, se propuso prolongar la cortina hasta el techo del acuífero artesiano, requiriéndose para este fin la excavación de un pozo y una galería situada a 27,50 m de profundidad. No obstante, se recomendó estudiar con mayor criterio la profundidad de este cierre.

En el año 2001, el diseño se modificó por recomendación de la consultoría colombiana INTEGRAL, reduciendo de 5 a 4 galerías en la margen izquierda, a fin de lograr coincidencia de elevación con respecto a 2 galerías de enfriamiento, dispuestas dentro del cuerpo de la presa.

Hacia finales del 2001 e inicios del 2002, se excavaron las dos primeras, localizadas una en cada margen a la elevación de 1105 m.s.n.m. (5 m sobre el cauce del río). Conjuntamente, se procedió a la ejecución de varias perforaciones, que tuvieron como propósito principal interceptar el acuífero artesiano y determinar la profundidad adecuada para el cierre de fondo de la cortina. Algunas de estas perforaciones formarán parte de la instrumentación de la presa.

### Criterio de cierre de la cortina en los estribos

Ewert, (1985) recomienda que una cortina de inyección debe extenderse lateralmente, hasta

que el nivel máximo del embalse intercepte la superficie freática. Sin embargo, dicho criterio no es aplicable en este caso, debido a los bajos gradientes hidráulicos encontrados en ambas márgenes, que obligarían a la construcción de una cortina excesivamente extensa y económicamente no viable.

En vista de esta situación se optó por prolongar la cortina lateralmente una longitud equivalente a la altura máxima de la carga de agua. Por consiguiente, el largo de las galerías de inyección sería de al menos 100 m, longitud suficiente para que los niveles inferiores alcancen una frontera virtual, por debajo de la cual la permeabilidad se reduce significativamente. Este límite se estableció con base en los resultados de las pruebas de agua hechas en las diferentes perforaciones de investigación del sitio de presa.

Con la aplicación de esta medida, también será posible garantizar una adecuada impermeabilización de las principales estructuras geológicas que afectan el sitio de presa y que podrían permitir la comunicación hidráulica entre el embalse y el sector aguas abajo de la presa. De igual manera, se forzaría al flujo de agua que se infiltre desde el embalse, a realizar un recorrido mayor dentro del macizo para lograr bordear el plano de cortina, con lo que se aumentan las pérdidas de carga, con una consecuente reducción de la filtración.

Para obtener un buen control del proceso de perforación e inyectado, el Dr. Merritt recomendó una separación vertical de 30m entre galerías. De acuerdo con este parámetro y considerando las diferencias en la permeabilidad de ambas márgenes, que resultaron de las cortinas de prueba, se dispuso en un inicio una separación de 36,67 m entre las galerías de la margen derecha y de 27,50 m en la margen izquierda. Sin embargo, luego de la consultoría de INTEGRAL, las separaciones en ambas márgenes se igualaron a 35 m, mediante la eliminación de una galería en la margen izquierda.

Según el diseño final, en cada uno de los estribos se excavarán 4 galerías, situadas a las elevaciones: 1105, 1140, 1175 y 1210 m.s.n.m. (Fig. 3). Estas se han dispuesto, de tal forma que las perforaciones de inyección de un mismo nivel, finalicen contra el techo del nivel inferior, haciendo posible la continuidad vertical de la cortina. En general, las perforaciones mantendrán una dirección sistemática de 130°, variando su inclinación de 53° en margen derecha a 45° en margen izquierda (excepto el primer nivel que tendrá una inclinación general de 53°). Estos parámetros, más la geometría de la presa, determinan azimutes de 033° para las galerías de margen derecha y de 167° en margen izquierda (Fig. 4).

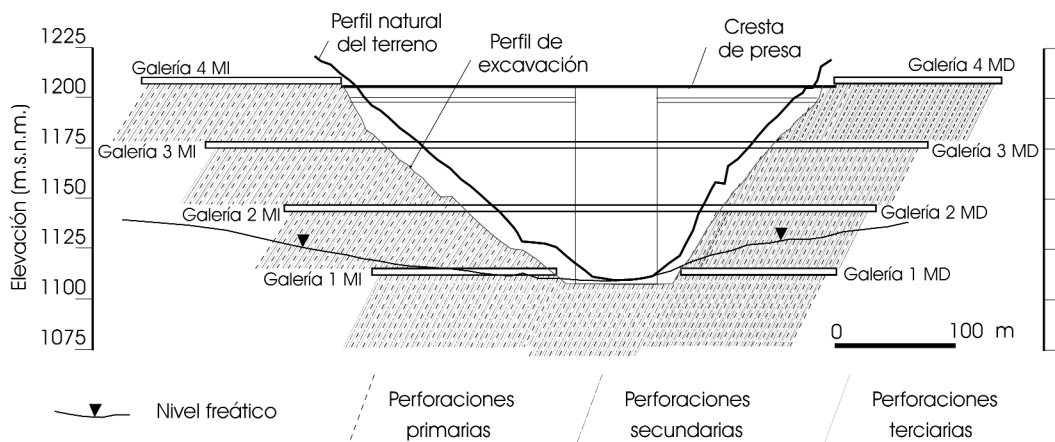


Fig. 3: Perfil de la cortina de inyección en el sitio de presa.

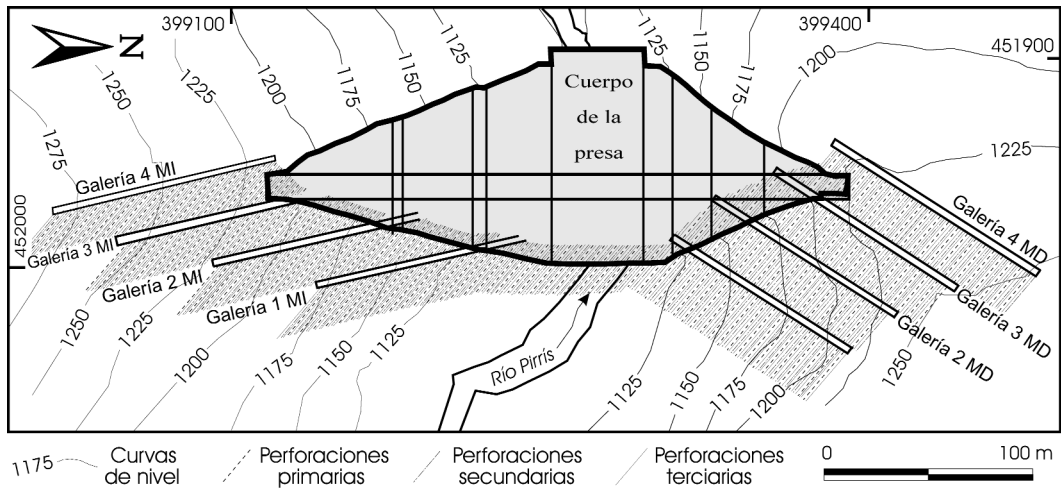


Fig. 4: Planta de la cortina de inyección en el sitio de presa.

### Criterio de cierre de la cortina debajo de la fundación

Los núcleos recuperados en 3 perforaciones, evidenciaron la existencia de una zona de roca meteorizada y fracturada de unos 30 m de espesor, situada inmediatamente bajo el lecho del río y que coincide con valores de permeabilidad elevados según las pruebas Lugeon. En gran parte, este comportamiento se debe a la descompresión de la roca y a la erosión de los rellenos en las fracturas por efectos del río, que promueven un aumento de la permeabilidad, con valores representativos mayores a 50 UL. A profundidades mayores, la roca se caracteriza por una mejor calidad física y permeabilidades bajas a muy bajas, hasta alcanzar el acuífero artesiano.

A pesar de esta condición aparentemente favorable, se acordó considerar la prolongación del tratamiento hasta el techo del acuífero artesiano (profundidad promedio de 85 m), hasta tanto no se cuente con más información de respaldo. Con este fin, se retomó el estudio y modelado del acuífero confinado, teniendo como objetivo determinar la ubicación y espesor de la capa sello, que vendría a proporcionar el criterio de cierre de fondo de la cortina.

En los años 2000 y 2001, se hizo una revisión de la información suministrada por las

perforaciones artesianas, acompañada de mediciones periódicas de las presiones manométricas, muestreos hidrogeoquímicos, cartografiado geológico de la zona de recarga y pruebas con trazador colorante. Esta labor dio como resultado, el refinamiento del modelo del acuífero artesiano y el establecimiento de una zona de 40 a 50 m de espesor, constituida por rocas sedimentarias de buena calidad física que conforman por sí mismas el sello confinante.

Entre el 2001 y el 2002, se excavaron las dos primeras galerías de inyección, ubicadas en la elevación 1105 m.s.n.m. Las condiciones geotécnicas, geofísicas e hidrogeológicas encontradas en estas galerías, se ajustan bien al modelo geológico-geotécnico y ofrecen un panorama bastante optimista en relación con la magnitud e intensidad del tratamiento.

El conocimiento actual del sitio de presa, proporciona evidencias suficientes que confirman la existencia de una zona de considerable espesor, con permeabilidades suficientemente bajas como para garantizar el confinamiento del acuífero artesiano (capa silícea). Esta zona se localiza entre 30 y 40 m de profundidad bajo el cauce del río (1100 m.s.n.m.) y vendría a constituir la frontera impermeable contra la cual finalizaría la parte inferior de la cortina de inyección. De acuerdo con la propuesta de perforar a 53° de

inclinación, las perforaciones de inyección deberían profundizar por debajo del cauce al menos 50 m, con el fin de alcanzar y lograr penetrar lo suficiente en la zona impermeable. Por lo tanto se deshecho el criterio de perforar hasta una profundidad de 85 m en el techo del acuífero artesiano.

### **Metodología de inyección**

En las cortinas de prueba se identificaron sectores muy fracturados (zonas fracturadas y fallas) que aceptan grandes volúmenes de lechada, sin llegar a saturarse adecuadamente y, por otra parte, sectores bastante sanos en los que predominan las fracturas finas y de superficies rugosas, que muestran fuerte resistencia a la penetración de una lechada estable.

De acuerdo con Lombardi (1996), en cortinas de inyección es usual seleccionar una presión equivalente a dos o tres veces la presión de la carga de agua esperada sobre el lugar a tratar. En el caso de P.H Pirrís, se ha demostrado que el empleo de una presión de inyección de 20 kg/cm<sup>2</sup> (20 bares), casi el doble de la carga máxima del embalse, no ocasiona efectos indeseables sobre el medio rocoso, por lo tanto puede utilizarse como base para el tratamiento.

Tomando en cuenta que el sitio de presa no es igualmente inyectable en toda su extensión, se recomienda tratar por separado los sectores de roca buena (pobremente inyectables) y las zonas de falla (inyectables con altas aceptaciones). En consecuencia, la aplicación del método "GIN", según su definición, no cumpliría con este objetivo, puesto que una lechada estable con relación agua/cemento de 0,67, inyectada a una presión de 20 kg/cm<sup>2</sup>, no penetraría eficientemente en las fisuras más finas (< 0,4 mm) y por otra parte, un volumen máximo de 150 l/m no sería suficiente para sellar las zonas de muy alta aceptación, como quedó demostrado en las cortinas de prueba. Por otra parte, la aplicación estricta de dicho método requiere de un equipo computarizado, que proporcione registros continuos de la presión, la velocidad de flujo, el volumen inyectado y la penetrabilidad contra el tiempo, cuya compra representaría una erogación importante para

el ICE y del que no habría certidumbre sobre su buen funcionamiento y vida útil en condiciones de alta humedad.

En vista de lo anterior y con el propósito de obtener buenos resultados, deberá ser necesario implementar una variante combinada entre el "GIN" (intensidades de 500 y 1000 bar\*l/m) y el método tradicional de inyección que considera la presión de rechazo de la inyección. Esta variante consistirá en el empleo de lechadas con diferentes relaciones agua/cemento, adecuadas a los diferentes sectores e inyectadas bajo parámetros (presión-volumen) regulados por el principio del método "GIN". Por ejemplo, los sectores sanos con fracturas finas se inyectarán con una lechada suficientemente fluida, hasta alcanzar la presión máxima de la intensidad "GIN" seleccionada. En los sectores de alta aceptación, se inyectarán lechadas progresivamente más viscosas, efectuando los cambios según volúmenes determinados, hasta alcanzar una presión de rechazo o presión máxima establecida por el "GIN".

La inyección se hará en tramos descendentes de 5 m de longitud. En el caso de las perforaciones primarias, se efectuará antes de la inyección la respectiva prueba de agua (WPT), mediante la cual se tomará la decisión de inyectar o no el tramo. Además, en aquellos tramos que requieran inyección y estén ubicados sobre la superficie del nivel freático, será necesario inyectar previamente agua para saturar parcialmente la roca y reducir el riesgo de pérdida del agua de la lechada, que provocaría un bloqueo prematuro.

### **Características físicas y reológicas de la lechada agua-cemento**

Según los resultados de las cortinas de prueba, se consideró pertinente dedicar esfuerzos en la determinación de un procedimiento que normalice la preparación de las lechadas durante el tratamiento. Asimismo es importante establecer composiciones de mezclas que garanticen estabilidad y fluidez, ante las diferentes condiciones geológicas del medio.

Con este propósito, se realizaron en el mes de marzo del 2000, diversos ensayos en el

Laboratorio de Materiales del P.H. Angostura, cuyos resultados indican que ninguna de las suspensiones analizadas, será efectiva en el tratamiento de la roca sana (representada por la prueba de margen derecha). Por su parte, las zonas permeables (representadas por la prueba de margen izquierda) podrían tratarse con una suspensión A/C=0,67, con cemento Ecolcem y 0,4% de CFR-2.

Entre el 2001 y 2002 se llevaron a cabo otra serie de ensayos de laboratorio y de campo, utilizando una gran variedad de cementos y aditivos ofrecidos por el mercado nacional. Los ensayos tuvieron como objetivo valorar los diferentes productos y combinaciones, en procura de seleccionar los más apropiados desde el punto de vista técnico y económico. Se partió de la necesidad de definir un tipo de cemento para el tratamiento de los sectores con mayor permeabilidad y otro con finura alta, cercana a los 5000 cm<sup>2</sup>/g, para los sectores de roca sana afectada por fisuras finas. Respecto a los aditivos, su uso pretende reducir la viscosidad y cohesión de la lechada, para mejorar su trabajabilidad durante el tratamiento y favorecer una buena penetración en las fisuras finas.

### Cálculo de metrajes y estimación del consumo de cemento

De conformidad con los criterios descritos anteriormente, se procedió al cálculo de metrajes de excavación y perforación (Cuadro 7). Para inyectar adecuadamente el sitio de presa será necesario excavar en cada margen 4 galerías, todas de 100 m de longitud. Para la inyección se tomó en cuenta la realización de un tratamiento sistemático, complementado por tratamientos localizados, especialmente en aquellos sectores afectados por una densa fracturación. Ambos tratamientos serán llevados hasta una etapa terciaria, partiendo de perforaciones primarias separadas 5 m.

Según la geometría descrita antes, el tratamiento sistemático demandará 975 perforaciones y más de 41 000 metros de perforación (Cuadro 7). Por su parte, se estima que el tratamiento localizado requerirá de 189 perforaciones y más de 8 000 metros de perforación. También se harán al menos 45 perforaciones de verificación, para un total de 2 025 metros.

Cuadro 7

Resumen de metrajes de perforación de cortina de inyección. Cortina simétrica

Perforación	Tratamiento Sistemático						Tratamiento Localizado						P.V.		Totales		
	PP		PS		PT		PP		PS		PT						
	L	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M
Gal. 4MI	45	24	970	23	942	46	1886	6	270	5	225	10	450	5	225	119	4968
Gal 3 MI	45	24	949	23	920	47	1850	6	270	5	225	10	450	5	225	120	4889
Gal 2MI	45	25	972	25	952	50	1905	6	270	5	225	10	450	5	225	126	4999
Gal 1 MI	50	17	850	18	900	36	1800	6	300	5	250	10	500	5	250	97	4850
Gal 4 MD	40	24	914	24	934	47	1830	6	240	5	200	10	400	5	200	121	4717
Gal 3 MD	40	22	855	21	831	42	1658	6	240	5	200	10	400	5	200	111	4384
Gal. 2 MD	40	20	801	21	821	41	1601	6	240	5	200	10	400	5	200	108	4263
Gal. 1 MD	50	20	1000	19	950	38	1900	6	300	5	250	10	500	5	250	103	5150
CA	50	11	550	11	550	22	1100	6	300	5	250	10	500	5	250	70	3500
Totales	187	7861	185	7799	369	15530	54	2430	45	2025	90	4050	45	2025	975	41719	

L= Longitud (m), PP= perforación primaria, PS= perforación secundaria, PT= perforación terciaria, M= metraje, P.V.= perforaciones de verificación, C= cantidad de perforaciones, M= metros de perforación, CA= perforaciones en el cauce del río Pirris. Nota: La dirección de perforación es de 130° y la inclinación varía entre 45° y 53°. La longitud de la galería es de 100 m.

El cálculo del cemento se basó en los consumos promedio registrados en la cortina de prueba de margen izquierda, a fin de obtener resultados dentro de un ámbito conservador. Bajo esta premisa, se estableció para ambos tratamientos (sistemático y localizado) un consumo promedio de 4 sacos por metro en primarias, 3 sacos/m en secundarias y 2 sacos/m en terciarias. En total se estima un consumo de casi 110 000 sacos de cemento, equivalentes a unas 5 500 toneladas (Cuadro 8). De estos totales, es probable que el 75% corresponda a cemento corriente Tipo I (MP) y el restante 25% a cemento fino.

### Costos del tratamiento

Se estima que en promedio el 50% del macizo puede mostrar condiciones físicas similares a las encontradas en la prueba de margen izquierda. Esta sería la condición más crítica a encontrar, por consiguiente se tomó como marco de referencia para el cálculo de materiales y costos del tratamiento en general. En la práctica podría ocurrir que los requerimientos de cemento y perforación fueran menores, incidiendo favorablemente en una reducción de costos de la cortina. Con base en la magnitud del tratamiento descrito arriba y la necesidad de revestir las galerías para su funcionalidad durante la vida útil del proyecto, se estima que el costo total de la cortina podría ascender preliminarmente a unos ocho millones de dólares estadounidenses.

### Acceso a las galerías de inyección

Debido a la presencia de rellenos no inyectables y potencialmente erosionables, Merritt (1999) recomienda que las galerías de inyección sean revestidas y que permanezcan accesibles durante toda la vida útil del proyecto. De esta manera se garantizará un adecuado auscultamiento y de ser necesario, la realización de eventuales labores de reinyección.

### Monitoreo del acuífero artesiano

Se considera que la presión que pueda ejercer el acuífero, antes y después del llenado del embalse, no tendrá influencia significativa sobre la estabilidad de la presa, por cuanto la misma será contrarrestada por la buena condición de la roca, la cual tiene una cobertura vertical promedio de 85 m entre el nivel de fundación y el techo del acuífero. Sin embargo, se dispuso la construcción de dispositivos de auscultación (piezómetros) en las dos galerías de inyección excavadas y en otros sectores del sitio de presa, los cuales permitirán el monitoreo periódico del comportamiento del acuífero (presión y caudal), antes, durante y después del llenado. En este sentido, se espera que una vez construida la presa y lleno el embalse, el mismo proceso natural de colmatación de sedimentos, producto del nuevo nivel base artificial del río, impermeabilice con el paso del tiempo la zona de recarga del acuífero

Cuadro 8

Consumo de cemento en tratamientos sistemático (TS) y localizado (TL), cortina de inyección simétrica

Características	Tratamiento sistemático			Tratamiento localizado			Totales
	PP	PS	PT	PP	PS	PT	
Perforaciones.	187	185	369	54	45	90	930
Metraje	7861	7799	15530	2430	2025	4050	39694
Kgs cemento/m	200	150	100	200	150	100	450 Kgs
Sacos cemento/m	4	3	2	4	3	2	9 sacos
Consumo (kg)	1572102	1169868	1552954	486000	303750	405000	5489674
Sacos cemento	31442	23397		9720	6075	8100	109793
Cons. (kg/m)		138			140		138
Cons. sacos/m		2,75			2,81		2,77

artesiano, localizada a unos 700 m aguas arriba del eje de presa, reduciendo con ello las presiones y los caudales registrados en los piezómetros de monitoreo. Así mismo es conveniente establecer un monitoreo sobre las filtraciones esperadas en función del diseño de la cortina de inyección.

## CONCLUSIONES

El diseño de la cortina de inyección requirió la ejecución de una cortina de prueba, donde se definió la permeabilidad inducida del macizo rocoso, el diseño de la lechada y las presiones de inyección. Como parte del diseño de la cortina de inyección se sugiere la inyección de lechada, por medio de perforaciones primarias, secundarias y terciarias.

Tomando en cuenta que el sitio de presa no es igualmente inyectable en toda su extensión, se recomienda tratar por separado los sectores de roca buena (pobremente inyectables) y las zonas de falla. Así mismo deberá ser necesario implementar una variante de inyección que resulta de la aplicación del método GIN y el método tradicional de inyección. Esta variante consistirá en la aplicación de lechadas con diferentes relaciones de agua-cemento.

El largo de las galerías de inyección será de al menos 100 m, longitud suficiente para alcanzar una frontera en la cual la permeabilidad se reduce significativamente, según los resultados de las pruebas de agua hechas en diferentes perforaciones de investigación en el sitio de presa. Además, con la aplicación de esta medida, es posible garantizar una adecuada impermeabilización de las principales estructuras geológicas que afectan el sitio de presa.

El conocimiento geológico-geotécnico actual del sitio de presa proporciona evidencias suficientes que confirman la existencia de una zona de considerable espesor localizada entre 30 y 40 m por debajo del cauce del río, con permeabilidades bajas para constituir una frontera impermeable contra la cual finalizará la parte inferior de la cortina de inyección.

Para inyectar adecuadamente el sitio de presa será necesario excavar en cada margen 4 galerías, todas de 100 m de longitud. Para la inyección se tomó en cuenta la realización de un tratamiento sistemático, complementado con tratamientos localizados especialmente en aquellos sectores afectados por una densa fracturación. El tratamiento sistemático demandará 975 perforaciones y 41 000 metros de perforación. El tratamiento localizado requerirá de 189 perforaciones y más de 8000 m de perforación.

## REFERENCIAS

- AVILA, M., 1999: Mapa preliminar de anomalías geofísicas en la margen izquierda del Sitio de Presa, P.H. Pirris. - Inst. Cost. Electricidad, UEN – Proyectos y Servicios Asociados. San José [Informe interno].
- BARRANTES, J., 2000: Valoración de la estanqueidad del embalse y macrozonificación de la amenaza por deslizamiento del P.H. Pirris. - 76 págs. Inst. Cost. Electricidad, UEN – Proyectos y Servicios Asociados. San José [Informe interno].
- CHAVES, C. & ZUMBADO, R., 1999: Informe preliminar de resultados e interpretaciones geológicas de las pruebas de impermeabilización hechas en el Sitio de Presa del P.H. Pirris. - 29 págs. Inst. Cost. Electricidad, UEN – Proyectos y Servicios Asociados. San José [Informe interno].
- CHAVES, C. & ZUMBADO, R., 2000: Resultados de la fase terciaria de la prueba de impermeabilización, hecha en la margen izquierda del Sitio de Presa del P.H. Pirris. - 8 págs. Inst. Cost. Electricidad, UEN – Proyectos y Servicios Asociados. San José [Informe interno].
- DIC., 1997: Informe geológico-geotécnico de factibilidad del sitio de presa No 2. - 49 págs. Inst. Cost. Electricidad, UEN – Proyectos y Servicios Asociados. San José [Informe interno].
- ESTRADA, J., 1998: Manual de procedimientos para la ejecución de la cortina de inyección de prueba en Galería No. 2, Sitio de Presa – P.H. Pirris. - 10 págs. Inst. Cost. Electricidad, UEN – Proyectos y Servicios Asociados. San José [Informe interno].
- EWERT, F.K., 1985: Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites. - 428 págs. Springer, Berlin.
- HOULSBY, A.C., 1990: Construction and desing of cement grouting: a guide to grouting in rock foundations. - 442 págs. John Wiley, New York.

- LOMBARDI, G., 1996: Selecting the grouting intensity. - *Hydropower and Dams*, 4: 62-66.
- LOMBARDI, G. y DEERE, D. 1993: Grouting design and control using the GIN principle. - *Water Power and Dam Construction*, 1993: 15-22.
- MERRITT, A. H., 1999: Pirris hidroelectric project power tunnel and dam foundation.- 6 págs. San Marcos de Tarrazú [Informe interno].
- RODRIGUEZ, C. 1997: Geological and geotechnical map, dam site. Escala 1:1000. - Dep. Geol. P. H. Pirris. San Marcos de Tarrazú.