

Apoyo de la investigación a la solución de los fallos de la cortina de la presa “Lebrije”

Por

OSMANY RUIZ ANGERÍ, NELDO P. SAN ROMÁN Y TOMÁS S. DÍAZ PÉREZ
EMPRESA DE INVESTIGACIONES, PROYECTOS E INGENIERÍA DE VILLA CLARA

¿Qué ocurrió?

El control y buen funcionamiento de todas las obras hidráulicas en Cuba es una de las tareas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), aún más en el caso de las presas que presentan asentamientos poblacionales y objetivos económicos aguas abajo en su radio de peligro, por lo que deben tener un alto grado de confiabilidad desde el punto de vista técnico. Este fue el caso de la presa “Lebrije”, que al sufrir daños en su cortina precisó de una rápida reparación que contara con una base investigativa adecuada, que le permitiera solucionar los problemas que originaron tales fenómenos.

La presa “Lebrije” se encuentra situada en el municipio de Jatibonico, aproximadamente a 10 km al norte de la ciudad del mismo nombre, dentro de los límites de la provincia de Sancti Spíritus. La presa tiene una capacidad de almacenaje de 128 000 000 m³ para su nivel de aguas normales, aunque está diseñada para alcanzar volúmenes mayores en su nivel de aguas máximas. Las corrientes fluviales principales que la alimentan son los ríos Jatibonico del Sur y Manacas. Su cortina es de tipo homogénea, estando conformada por arcilla de origen aluvial, con una altura en su punto más alto de 36 m, una longitud de 400 m, con un dentellón de 5 m de profundidad. El mayor volumen de entrega del embalse está destinado fundamentalmente al consumo de las industrias locales, como el combinado de

papel “Panchito Gómez Toro” y el complejo agroindustrial “Uruguay”, además del abasto de agua a la ciudad de Jatibonico y, en menor grado, al riego de zonas de cultivos varios y la generación de energía eléctrica para zonas rurales cercanas a la obra.

En esta presa ya se habían ejecutado trabajos de reparación debido a problemas de estabilidad presentados en algunos sectores de la cortina, dándoseles solución eventual, pero que no lograron eliminar la causa que los provoca.

En el mes de junio del 2002, después de un período de intensas lluvias debidas a una depresión tropical que afectó la zona central del país, muchas de las presas en el territorio alcanzaron altos niveles de embalse, siendo también el caso de la presa “Lebrije”, la cual llegó a almacenar los volúmenes más altos desde su construcción en 1973. Este incremento en los niveles indujo a situaciones que hicieron peligrar la estabilidad de su cortina, detectándose deslizamientos locales en la margen derecha y un aumento ostensible de las filtraciones en ambas márgenes, por lo que la dirección del INRH decidió inmediatamente tomar una serie de medidas que incluían la reparación de la cortina en las zonas afectadas mediante una banquetta de tierra que aumentara el ancho y espesor de la berma, la construcción de un aliviadero fusible con el objetivo de disminuir con rapidez el nivel del embalse y hacer un estudio que determinara las causas que originaron estos fe-

nómenos, con el objetivo de acometer una solución final.

La investigación tuvo tres objetivos:

- Determinar si con las medidas tomadas se garantizaba totalmente la reparación de la obra.
- Determinar el origen de los fallos (mal estado del dique o fenómenos presentes en el estrato base).
- Proponer, una vez conocidas las causas del problema, medidas efectivas para una total reparación que garantizara la estabilidad futura de la obra y su longevidad.

Pasos dados en la investigación

Como en toda investigación, el primer paso consistió en la revisión de toda la información de archivo que permitiera el mayor acercamiento posible al conocimiento de las características de su base, en lo referente a su geología, tectónica, parámetros físico-mecánicos de los suelos, hidrogeología, etc. A partir de esta consulta se conoció, como datos más importantes, la conformación de la base geológica por litologías de las formaciones Siguaney y Taguasco, con una elevada complejidad tectónica, caracterizada por una gran cantidad de manifestaciones plicativas y disyuntivas en la zona donde se encuentra enclavada la cortina, el marcado buzamiento de los estratos de la base y los altos índices de permeabilidad de algunas litologías.

El segundo paso consistió en un análisis de los focos de filtración, haciendo un balance entre los registros de los gastos obtenidos antes y después de suceder los fallos, llegándose a la conclusión de que las filtraciones fueron un factor determinante en la ocurrencia de estas anomalías.

El siguiente paso estuvo encaminado a la utilización de la geofísica de superficie, con la aplicación de los métodos de Sondeo Eléctrico Vertical y Campo Eléctrico Natural, trazándose perfiles por la corona, berma, pie de talud y dique del aliviadero, determinándose con el primero zonas anómalas por debajo de la superficie que pudieran estar vinculadas a las filtraciones, y con el segundo, los sectores de la cortina donde existen flujos de agua.

Al conjugar ambos métodos se pudo conocer de forma indirecta las zonas más propensas al origen de los fallos y hacia que puntos debía concentrarse la investigación.

Conjuntamente a la utilización de los métodos indirectos se realizó el levantamiento ingeniero-geológico, básicamente encaminado a establecer el buzamiento de los estratos, dada la complejidad tectónica del lugar. Se emplearon la perforación rotaria y la penetración estándar, la primera para la documentación del corte, ejecutar las pruebas hidrogeológicas y el muestreo de las capas, y la segunda, para definir el estado técnico del cuerpo de la cortina. Las pruebas hidrogeológicas consistieron en inyecciones de agua a presión, aforos y cubeteos, obteniéndose los coeficientes de filtración y absorción específicos de las capas que conforman la base y el cuerpo como tal de la cortina, cuyos resultados mostraron valores no significativos de la permeabilidad en el terraplén y sí en la base, los que fueron confirmados al conjugarse estas pruebas con el método geofísico de Pozo de Resistivimetría con Salinización, que mostró bajas velocidades del flujo a través del terraplén y zonas con altas velocidades y marcada presión del agua en la base. A todas las muestras obtenidas durante la perforación se le realizaron los ensayos de laboratorio que permitieron establecer las características físico-mecánicas de los materiales presentes y su composición química.

Los resultados esclarecen

Teniendo en cuenta los pasos seguidos durante el desarrollo de la investigación, se dividen los resultados entre seis aspectos:

- Análisis de los focos de filtración.
- Métodos geofísicos de superficie.
- Corte ingeniero-geológico general y de las secciones afectadas de la cortina.
- Pruebas hidrogeológicas.
- Resistivimetría con salinización.
- Geotecnia.

Análisis de los focos de filtración

Este análisis permitió observar que después de las lluvias de junio del 2002 ocurre un incremento sustancial de las filtracio-

nes. Analizando la variación del gasto en el tiempo, se observó que posterior a este mes, con niveles similares en el embalse, los gastos se incrementan en un alto por ciento, hecho que pudo ser vinculado al deterioro de las condiciones en la base de la obra, y al cual se asocian los deslizamientos de la cortina.

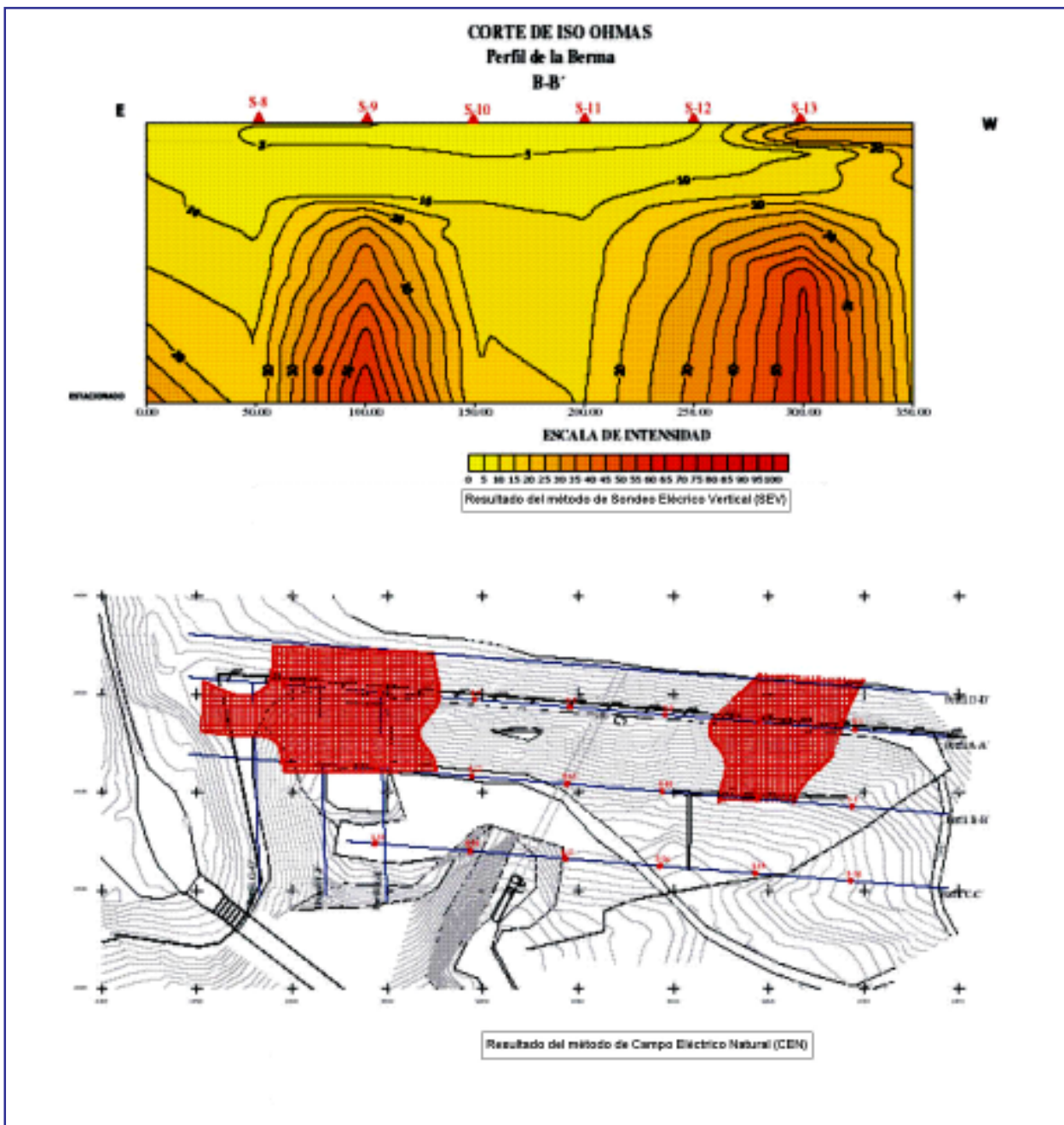
Métodos geofísicos de superficie

Con la aplicación de estos métodos se detectaron anomalías que se vincularon a

las capas más permeables, a través de las cuales ocurrieron las filtraciones de mayor envergadura en la base de la cortina, e intervalos donde se registraron flujos de agua significativos (Fig. 1). Conjugando estos resultados se pudo localizar con bastante exactitud las zonas de mayor riesgo, desde el punto de vista de las filtraciones.

En el corte de ISO OHMAS, B-B' (perfil de la berma) se observan contrastes notables en los registros. Se aprecia que el cuerpo de la cortina ofrece valores bajos aso-

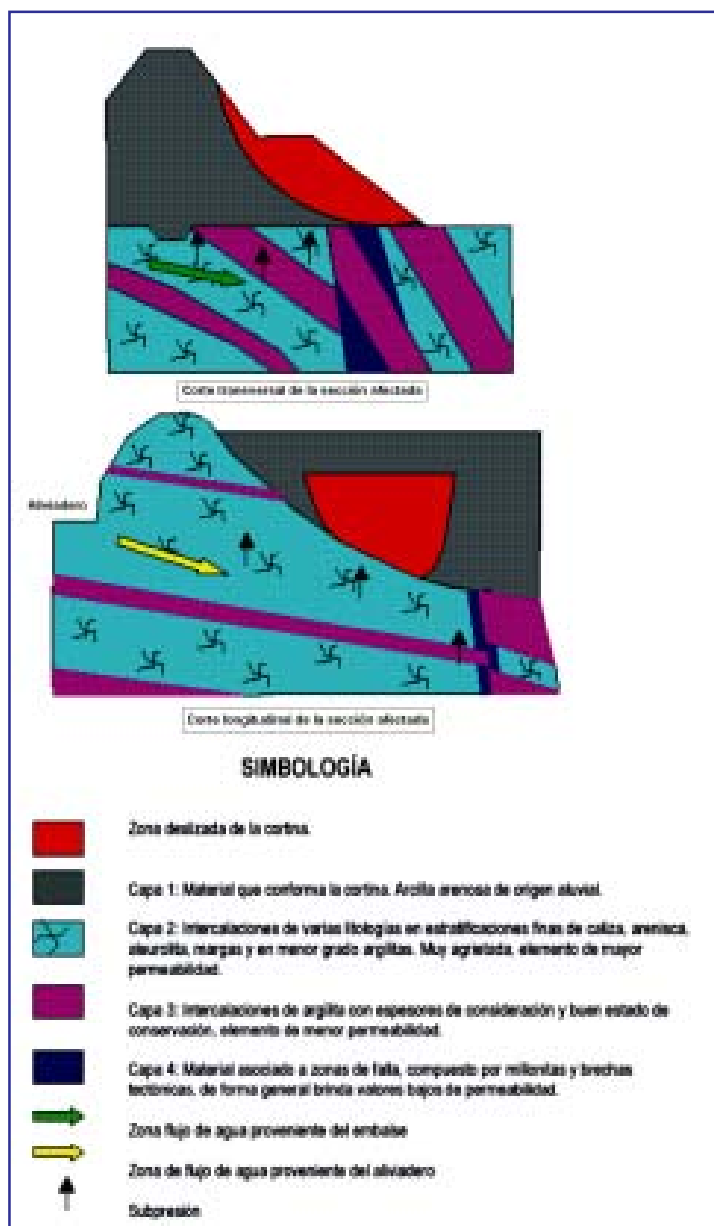
Fig. 1. Resultados de la aplicación de los métodos geofísicos.



ciados a materiales finos, arcillosos. A mayor profundidad en el corte, los valores se incrementan de forma general, pero se pueden delimitar con claridad dos zonas anómalas en los sondeos 9 y 13 (S-9 y S-13), donde los registros son de mayor magnitud (Fig. 1).

En la gráfica del Campo Eléctrico Natural se señalan en color rojo las franjas de valores negativos, vinculadas a la presencia de flujos, coincidentes de forma clara con las zonas anómalas detectadas por el Sondeo Eléctrico Vertical. En la franja izquierda se puede notar un área que se prolonga hacia el aliviadero, indicando la pre-

Fig. 2.
Cortes ingeniero-geológicos de las secciones afectadas de la cortina.



sencia de movimiento de agua en dicha dirección (Fig. 1).

Cabe destacar que dada la claridad de los resultados obtenidos con ambos métodos, disminuyó notablemente el nivel de incertidumbre. Estos resultados fueron verificados además con el empleo de los métodos directos.

Corte ingeniero-geológico general y de las secciones afectadas de la cortina

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, las consultas con los proyectistas y el levantamiento ingeniero-geológico, aplicado al mismo tiempo que los métodos geofísicos, se ubicaron las calas de forma tal que permitieran obtener rápidamente la mayor información posible sobre la conformación del corte ingeniero-geológico, sobre todo en la base de las áreas afectadas.

En el ambiente geológico de la base de la obra se destacan dos aspectos relevantes:

–La aparición de una secuencia estratigráfica de origen terrígeno carbonatada, que muestra una serie de estratos que se hallan en superposición e interdigitación.

–Las afectaciones tectónicas que se han producido sobre la estratigrafía primaria, que han provocado la presencia de numerosos pliegues y fallas, alterando así la yacencia original y las condiciones físicas de estos materiales, llevando incluso a la aparición de millonitas y brechas tectónicas en las zonas falladas.

Durante la investigación se definieron cuatro elementos ingeniero-geológicos o capas, atendiendo sobre todo al contenido de suelos finos y la permeabilidad (Fig. 2):

Capa 1.- El material fundamental que conforma la cortina, que se describe como una arcilla arenosa, de media plasticidad, en ocasiones con mayor contenido de arena. Presenta gravas de diferentes litologías, de color pardo carmelitoso a amarillento, en algunos intervalos con presencia de materia orgánica que le da una coloración más oscura. En ocasiones presenta nódulos de carbonato, de origen aluvial y que en general es poco permeable.

Capa 2.- Aparece en la base, donde se agrupa el paquete rocoso conformado por litologías con mayor agrietamiento y que abarca calizas, areniscas, aleurolitas, y en menor grado argilitas. Este paquete se intercala con la denominada *Capa 3*.

Capa 3 y 4.- Presenta (*Capa 3*) una menor permeabilidad asociada a un menor agrietamiento, y mayor presencia de materiales finos, arcillosos, representados sobre todo por las argilitas. En ella aparecen otras litologías de menor importancia, que no influyen sobre su comportamiento respecto a las filtraciones. Se aprecia el buzamiento marcado de ambas capas (2 y 3), y como la *Capa 3* sobreyace e infrayace la de mayor permeabilidad, sirviendo así de frontera impermeable, lo que provoca su confinamiento y con ello, el efecto de las subpresiones, fenómeno que se incrementa con la presencia de zonas de fallas que desplazan las capas en sentido vertical, causando el efecto de barreras hidrogeológicas en sentido horizontal que interrumpen el flujo, provocando además la aparición de materiales originados por la fricción (*Capa 4*), como millonitas y brechas tectónicas, de permeabilidad baja la primera y heterogénea la segunda.

Como se observa en los cortes esquemáticos (Fig. 2), las rocas que conforman la base presentan un alto grado de agrietamiento, lo que permite el paso del agua a través de ellas con facilidad, desde el embalse y desde el aliviadero durante el vertido, apareciendo algunas litologías intercaladas que, por su menor permeabilidad, fungen como pantalla impermeable natural que conlleva a que éstas suban por subpresión hacia la superficie, hasta alcanzar el nivel piezométrico, con el consiguiente deterioro del comportamiento físico-mecánico de los materiales que conforman la cortina.

Pruebas hidrogeológicas

Los resultados obtenidos corroboraron los altos valores de permeabilidad que se presentan en la base, asociados a la *Capa 2*, registrándose coeficientes de filtración superiores a $1,5 \text{ m/d}$ y valores más pequeños en correspondencia con la presencia de ma-

teriales finos, como los de la *Capa 3* y los de la *Capa 4*. Esta última presentó pequeñas permeabilidades en la millonita (menores que $0,1 \text{ m/d}$), y variables para la brecha (menores que $0,1$ hasta $0,6 \text{ m/d}$). Los resultados en el cuerpo de la cortina mostraron K_f de impermeable a poco permeable.

Resistivimetría con salinización

La comprobación de los intervalos de flujo de agua, tanto en el cuerpo de la cortina como en la base, utilizando la Resistivimetría con Salinización en algunas de las calas perforadas durante la investigación, demostró la veracidad y confiabilidad de los resultados obtenidos hasta el momento, apreciándose la no presencia de flujos significativos en el cuerpo de la cortina y sí valores altos de velocidad de infiltración a través de la base (Fig. 3).

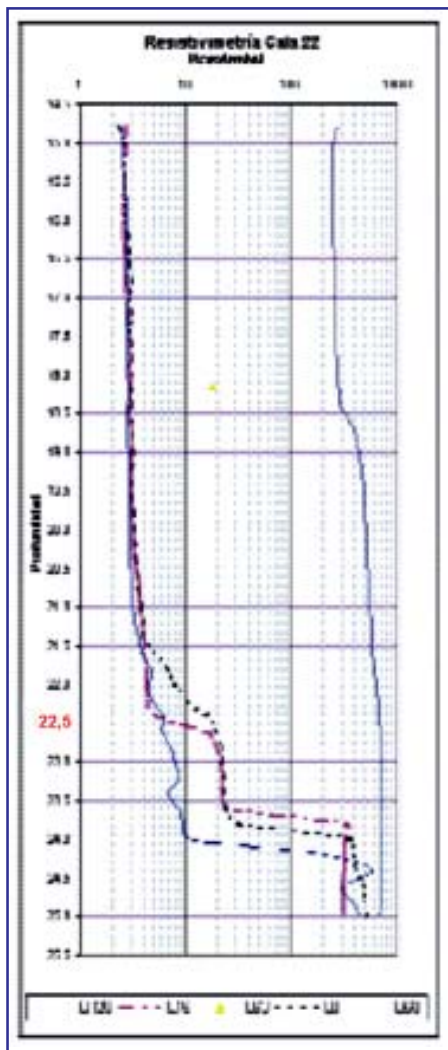


Fig. 3. Resistivimetría cala 22 perforada en la cortina.

Se observa que a partir de la profundidad de 22,50 m (Fig. 3), ya en el interior de la base, hay un sustancial incremento de las velocidades de flujo, reflejados en la brusca disminución de la concentración de sal, lo que no ocurre a menores profundidades.

Geotecnia

Los resultados geotécnicos permitieron caracterizar las capas desde el punto de vista físico-mecánico, lo que mostró una elevada correspondencia con los resultados obtenidos con los métodos anteriores. Se comprobó que los materiales que conforman la cortina presentaban buenas condiciones desde el punto de vista técnico, sin deterioro de sus propiedades físico-mecánicas, respecto a datos obtenidos en la investigación realizada en 1984 (Tabla 1), por

Tabla 1.
Estado
de la Capa 1
de la cortina
en 1984
y en el 2002.

COMPARACION GEOTECNICA DE LA CAPA 1 EN DIFERENTES INVESTIGACIONES				
CAPA			Capa 1	
			2002	1984
Gravas	G	%	9	3
Arena	A	%	40	33
Limo	L	%	24	29
Arcilla	A	%	28	35
Límite líquido	LL	%	43,2	53,2
Límite plástico	LP	%	21,8	19,2
Índice plástico	IP	%	21,3	34,1
Índice de consistencia	ic		0,67	0,81
Peso específico relativo	Gs		2,76	2,74
Humedad natural	w	%	27,7	25,1
Densidad húmeda	γ	ρ/cm^3	1,886	1,931
Densidad seca	γ_d	ρ/cm^3	1,476	1,543
Relación de vacíos	e		0,874	0,780
Saturación	s	%	88	89
Densidad saturada	γ_{sat}	ρ/cm^3	1,939	1,977
Densidad sumergida	γ_{sumerg}	ρ/cm^3	0,939	0,977
Humedad óptima	w _o	%	20,8	19,80
Densidad húmeda máxima	γ	ρ/cm^3	1,979	2,010
Densidad seca máxima	γ_{dmax}	ρ/cm^3	1,640	1,681
Relación de vacíos mínima	e		0,683	0,630
Saturación máxima	s	%	84	86
Dens. saturada compactada	$\gamma_{sat,comp}$	ρ/cm^3	2,045	2,067
Dens. sumergida compactada	$\gamma_{sum,comp}$	ρ/cm^3	1,045	1,067
Cohesión	C	kg/cm^2	0,22	0,28
Ángulo de fricción	ϕ	"Sex	15	13
Coefficiente de compresibilidad	a_{vB}	cm^2/kg	0,0155	
Módulo de deformación	E_s	kg/cm^2	125	120
Coefficiente de consolidación	c_{vB}	cm^2/seg	0,00078	
Sales solubles totales	SST	%	0,07215	
Carbonato	CaCO ₃	%	21,5	
Materia Orgánica	MO	%	1,33	

lo que el estado de la cortina, fuera del área deslizada, no presentaba deterioro en sus condiciones.

Cuáles fueron las recomendaciones

Aunque la reparación de las zonas afectadas con una banquetta redujo significativamente las situaciones de peligro, al concluir las investigaciones y según sus resultados, se realizaron una serie de recomendaciones encaminadas a la solución del problema:

–La colocación de filtros en la ejecución de la banquetta, que garanticen el drenaje, para disipar los efectos de la subpresión.

–Tomar medidas para garantizar el drenaje en la base de la cortina, en las partes donde se produce la subpresión.

–Impermeabilizar la sección de flujo de agua proveniente del aliviadero hacia la cortina, utilizando la inyección de lechada de cemento, pared de suelo cemento, delantales impermeables, etc.

–La construcción de un nuevo aliviadero, más abajo del hombro de la presa, lo que aumentará el recorrido del agua hasta la cortina, causando un efecto positivo desde el punto de vista de la estabilidad.

–Establecer un riguroso control del nivel piezométrico y las filtraciones, sobre todo en puntos elevados del dique. **VH**