

PARÁMETROS DE DEFORMACIÓN Y CORTE DE LAS GRAVAS DE LA PRESA PUCLARO

Cristián GÁLVEZ B.
Ingeniero Civil, EDIC Ingenieros

Juan Pablo CASTRO F.
Ingeniero Civil, EDIC Ingenieros

Guillermo NOGUERA L.
Ingeniero Civil, EDIC Ingenieros

CHILE

1.	<u>DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</u>	2
2.	<u>GEOLOGÍA</u>	3
3.	<u>EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FUNDACIÓN DE LA PRESA</u>	5
4.	<u>ASPECTOS SÍSMICOS</u>	5
5.	<u>INSTRUMENTACIÓN</u>	6
6.	<u>MODELACIONES NUMÉRICAS</u>	8
6.1	<u>PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS</u>	8
6.2	<u>ANÁLISIS ESTÁTICO</u>	9
6.3	<u>DEFORMACIONES REGISTRADAS EN CORONAMIENTO, TALUD DE AGUAS ABAJO Y EJE DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL</u>	11
6.4	<u>RETROANÁLISIS SEGÚN REGISTROS EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN</u>	12
6.5	<u>VERIFICACIÓN DE DATOS POST RETROANÁLISIS</u>	13
7.	<u>CONCLUSIONES</u>	14

PARÁMETROS DE DEFORMACIÓN Y CORTE DE LAS GRAVAS DE LA PRESA PUCLARO

Cristián GÁLVEZ B.
Ingeniero Civil, EDIC Ingenieros

Juan Pablo CASTRO F.
Ingeniero Civil, EDIC Ingenieros

Guillermo NOGUERA L.
Ingeniero Civil, EDIC Ingenieros

CHILE

RESUMEN

El presente trabajo pretende contrastar el comportamiento de las deformaciones de la presa de embalse Puclaro, durante la etapa de construcción y posterior llenado, con las obtenidas de los análisis realizados en las etapas de estudio del mencionado embalse.

La presa está constituida por gravas compactadas y posee una pantalla de hormigón en su talud de aguas arriba y una pared moldeada en el fluvial de fundación para disminuir las filtraciones por este suelo. La pantalla de hormigón y la pared moldeada están unidas mediante un plinto articulado.

La predicción del comportamiento se obtuvo de los diferentes informes de las etapas de estudios; mientras que los antecedentes reales se recopilaron de las mediciones de los instrumentos instalados en la presa.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

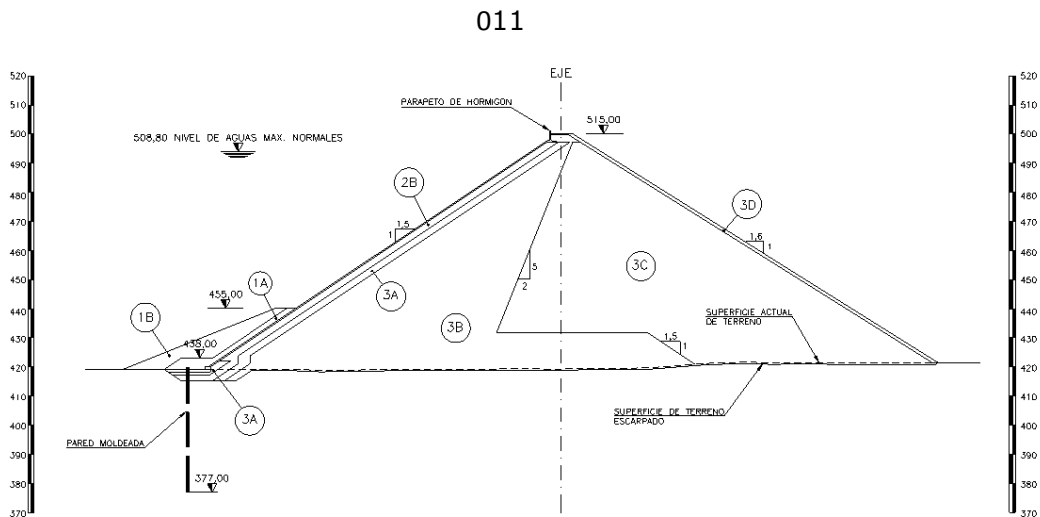
El embalse Puclaro se ubica en el río Elqui, 40 km al este de la ciudad de La Serena, 500 km al norte de Santiago. Se ubica a 435 m sobre el nivel del mar y su propósito es proveer agua de riego para 21.000 ha del valle de Elqui.

La presa es un relleno de gravas con pantalla de concreto, 83 m de alto, 640 m de largo y con un volumen de 4.630.000 m³ de relleno de gravas.

La capacidad del reservorio es 200 hm³ e inunda 760 ha.

El ancho del coronamiento es de 8 m y tiene un muro parapeto en L de 4 m de alto. El espesor de la pantalla de concreto de aguas arriba es de espesor variable entre 0,45 m en el plinto a 0,30 m en el coronamiento.

La zonificación para los distintos materiales, requerimientos de compactación y ubicación de filtros se muestra en la siguiente figura.



Zona	Material	Tamaño Máximo	Espesor de compactación
1A	Suelo no cohesivo	#8	20 cm
1B	Aleatorio	12"	40 cm
2A	Arena	#4	20 cm
2B	Grava	1 1/2"	30 cm
3A	Grava	6"	30 cm
3B	Grava	24"	60 cm
3C	Grava	24"	90 cm

Figura 1
Sección transversal embalse Puclaro y requerimientos de compactación

2. GEOLOGÍA

En el área del proyecto afloran rocas estratificadas de origen volcánico-sedimentario, depositadas todas, presumiblemente durante el período Cretácico. Estas rocas se encuentran intruidas por cuerpos de diversos tamaños y forma, graníticos, que se habrían emplazado en las rocas preexistentes durante el período Terciario temprano.

El basamento rocoso recién descrito se encuentra cubierto parcialmente por sedimentos no consolidados en las laderas de origen gravitacional y un potente depósito fluvial generado durante el período Cuaternario.

3. EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FUNDACIÓN DE LA PRESA

En los empotramientos se presenta una roca de matriz sana con un fracturamiento medio (5 a 10 fracturas/m) cubierta por una capa de escombros de falda que no superan los 2,0 m y que tienen una baja compacidad y una gran heterogeneidad, razones por la cual se removieron para fundar la presa.

En el empotramiento derecho se encontró un depósito formado preferentemente por gravas limosas con bolones y algunos bloques, todos de cantos angulares muy firmes, de baja compresibilidad y algo cementado en profundidad. Este depósito alcanza espesores de hasta 30 m y como posee una compresibilidad similar a la de los rellenos de la presa y el fluvial de fundación, no fue retirado para fundar el muro.

En el fluvial de fundación se observan dos horizontes con distintas propiedades geotécnicas:

- Horizonte superior: gravas arenosas sin o con escaso finos no plásticos y abundantes bolones de cantos subredondeados. Tiene un espesor medio de 25 m y muy baja compresibilidad.
- Horizonte inferior: subyace al anterior hasta la roca y consta de gravas arenosas con algunos bolones y algo de fino no plástico. Al igual que el estrato anterior tiene baja compresibilidad.

4. ASPECTOS SÍSMICOS

Chile se ubica en el contacto de las placas de Nazca y Sudamericana. El movimiento convergente de las placas a razón de 10 cm por año, resulta en la subducción en dirección este de la placa de Nazca bajo el continente Sudamericano. La tensión y deformación a lo largo de este desplazamiento es consecuencia del movimiento relativo entre placas, el cual origina casi todos los sismos en la región donde se emplaza el proyecto Puclaro.

Basado en los registros instrumentales disponibles, la razón magnitud – frecuencia y la atenuación de aceleraciones, se concluye que para la zona de La Serena las aceleraciones máximas son las siguientes:

Tabla 1
Aceleraciones Máximas para el Embalse Puclaro

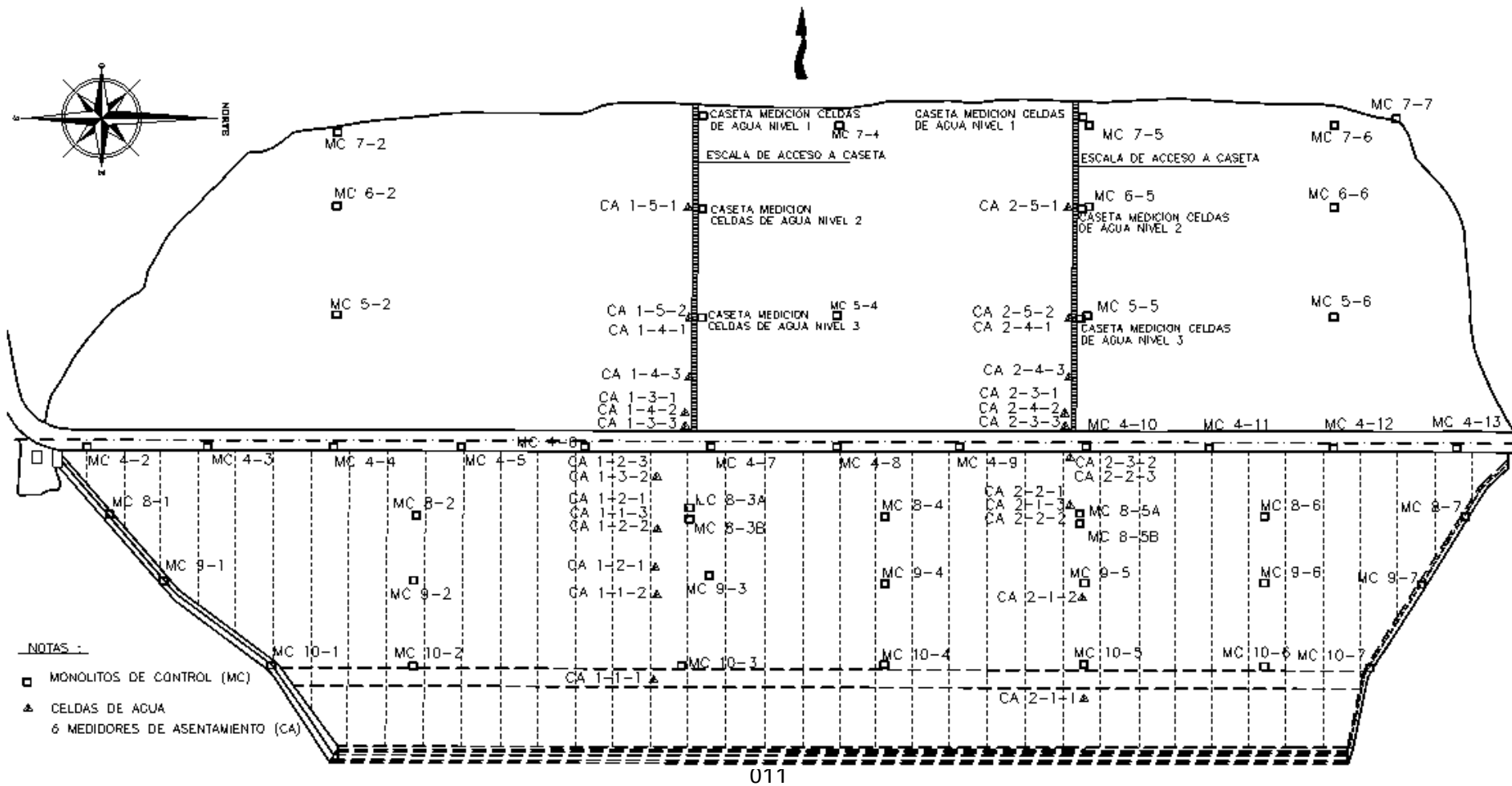
Evento	Periodo de retorno (años)	Aceleración Máxima Puclaro
Sismo de Diseño	100	0,25 g
Sismo Máximo Posible	500	0,54 g

5. INSTRUMENTACIÓN

Debido a que las celdas de agua y las casetas de medición con que cuenta la presa entregan deformaciones en el cuerpo de la presa y en el talud de aguas abajo respectivamente, se utilizarán estas mediciones para compararlas con las deformaciones teóricas según se explicará más adelante.

Para controlar las deformaciones que sufrirá el coronamiento y la superficie de la presa se instalaron 61 monolitos de control, los que se dispusieron en 7 líneas paralelas al eje longitudinal de la presa. Tres de estas líneas se dispusieron en el talud de aguas arriba, una en el coronamiento y 3 en el talud de agua abajo.

A fin de determinar las deformaciones verticales que sufren los rellenos durante la construcción y el llenado posterior de la presa, se instalaron 26 celdas de agua, las que se distribuyeron por partes iguales en dos secciones transversales de la presa. En cada sección se dispusieron las celdas en 3 niveles distintos, que corresponden a las cotas 440, 464 y 490 m s.n.m. Esta distribución se puede ver en la siguiente figura 2.



011

Figura 2
Esquema Instrumentación

6. MODELACIONES NUMÉRICAS

El objetivo de este punto es mostrar un resumen de los supuestos empleados y los resultados arrojados por el análisis de elementos finitos frente a las solicitaciones provocadas por el peso propio considerando la construcción del muro de presa por etapas.

6.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Para representar el comportamiento de los suelos en el modelo de elementos finitos, se usó una relación tensión-deformación no lineal representada por hipérbolas basado en los estudios de Duncan et al. (1980).

Para la presa de Puclaro se adoptaron los parámetros detallados en la siguiente tabla:

Tabla 2
Parámetros para modelación numérica

Parámetro	Fluvial de fundación	Relleno			Hormigón	
		3B	3C	2B, 3A	H25	H8
γ [ton/m ³]	1,30	2,35	2,30	2,25	2,30	2,20
K	650	1.400	1.200	500	202.000	120.000
K _{ur}	650	1.400	1.200	500	202.000	120.000
N	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00
c [ton/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00	460	165
ϕ_0	45	50	45	40	37	37
D ϕ	5	9,50	8	5,00	0,00	0,00
R _f	0,70	0,70	0,70	0,70	0,00	0,00
K ₀	0,30	0,33	0,33	0,33	0,25	0,25
K _b	400	900	770	320	112.000	67.000
M	0,50	0,16	0,16	0,16	0,00	0,00

En la tabla anterior:

- γ : Peso unitario efectivo del suelo o del hormigón.
- K, n : Parámetros adimensionales que definen el módulo de elasticidad inicial a través de la relación $E_i = K \cdot p_a \cdot (\sigma_3/p_a)^n$
- p_a : Presión atmosférica.
- K_{ur} : Parámetro adimensional que define el módulo de elasticidad de recarga a través de la relación $E_{ur} = K_{ur} \cdot p_a \cdot (\sigma_3/p_a)^n$
- c : Cohesión.
- $\phi_0, D\phi$: Ángulo de fricción inicial y variación del ángulo de fricción con la presión de confinamiento a través de la relación $\phi = \phi_0 - D\phi \cdot \log_{10}(\sigma_3/p_a)$
- R_f : Parámetro adimensional que relaciona el esfuerzo desviador último con el derivado del criterio de ruptura de Mohr-Coulomb.
- K₀ : Coeficiente de empuje en reposo.
- K_b, m : Parámetros adimensionales que relacionan el módulo de elasticidad volumétrico, con la presión de confinamiento a través de la relación $B = K_b \cdot p_a \cdot (\sigma_3/p_a)^m$

6.2 ANÁLISIS ESTÁTICO

El objetivo del análisis estático es obtener el estado de tensiones de la presa al término de su construcción. Interesan en particular los desplazamientos de la pantalla de hormigón y cuerpo de la presa.

La sección considerada como representativa para el análisis tiene 80 m de altura de presa, el fluvial tiene 63 m de espesor y la abertura entre la cota inferior de la pared moldeada y la roca tiene 9 m.

La sección analizada fue modelada por una malla compuesta por 436 nudos y 403 elementos de aproximadamente 7 m de altura. Un detalle de la sección central de dicho modelo se muestra en la siguiente figura.

0

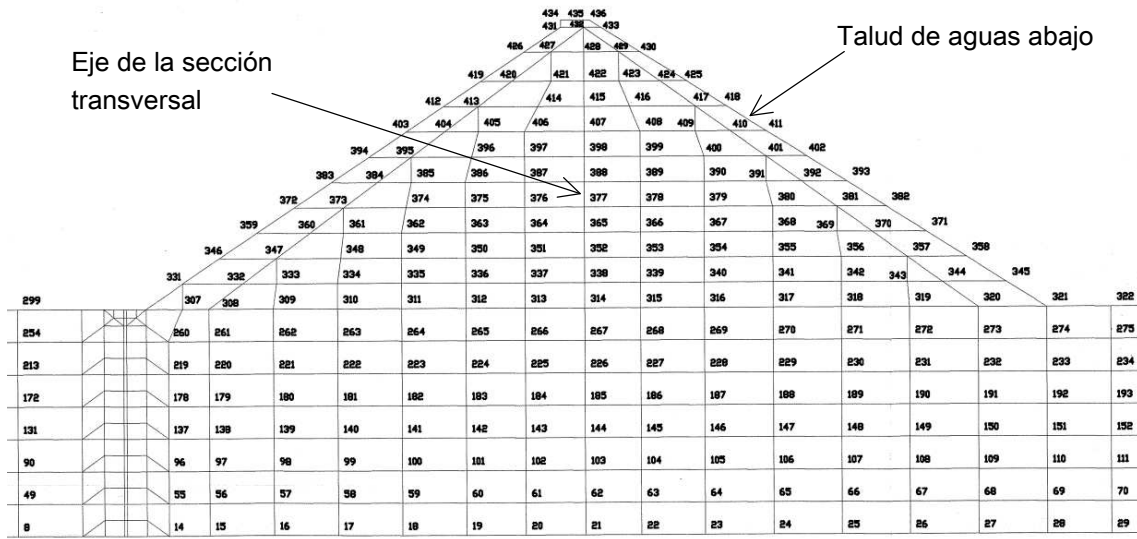


Figura 3
Esquema del modelo numérico

En la figura siguiente se muestran los asentamientos, desde la roca basal hasta el coronamiento para el fin de la construcción, de los nodos ubicados en el eje vertical de la sección transversal que se utilizó como modelo numérico y para los nodos del talud de aguas abajo.

El gráfico representa desde la cota 372 m s.n.m. hasta la cota 435 m s.n.m. el fluvial de fundación, mientras que desde la 435 m s.n.m. hasta la 515 m s.n.m., los rellenos de la presa.

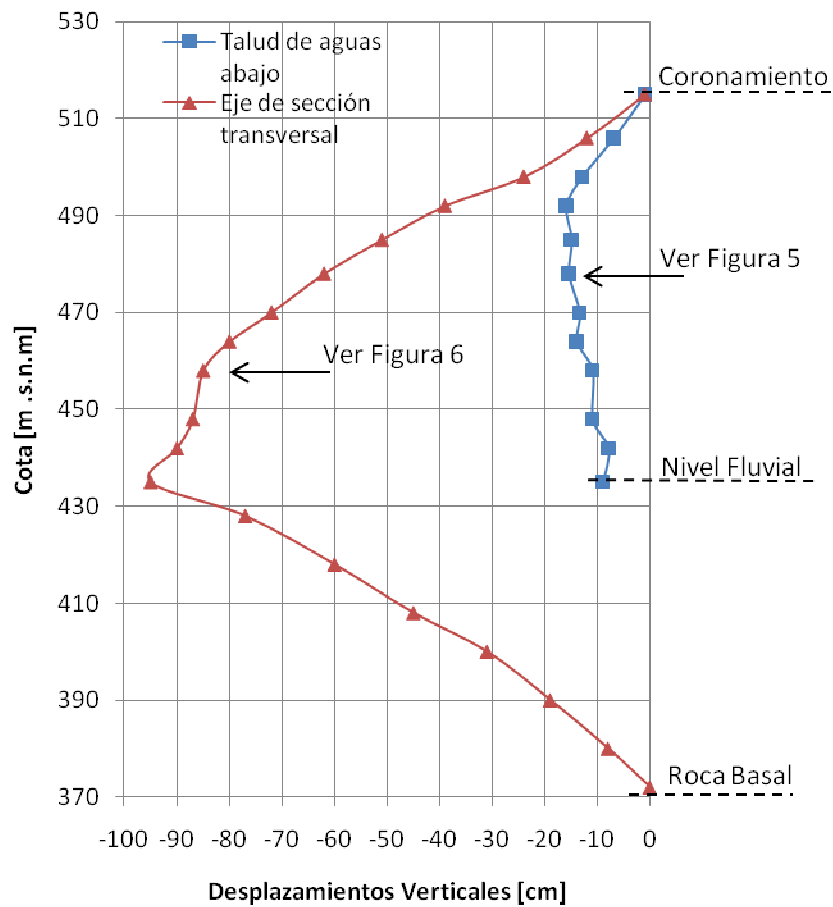


Figura 4

Desplazamientos verticales deducidos del análisis estático al final de la construcción para el eje de la sección transversal y el talud de agua abajo de la presa.

6.3 DEFORMACIONES REGISTRADAS EN CORONAMIENTO, TALUD DE AGUAS ABAJO Y EJE DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Una vez recopilados los registros de las mediciones de los monolitos de control (para el coronamiento y el talud de aguas abajo de la presa) y de las celdas de agua (para el eje de la sección transversal), se han comparado con los resultados teóricos arrojados por el análisis de elementos finitos. Lo anterior se muestra en las siguientes figuras.

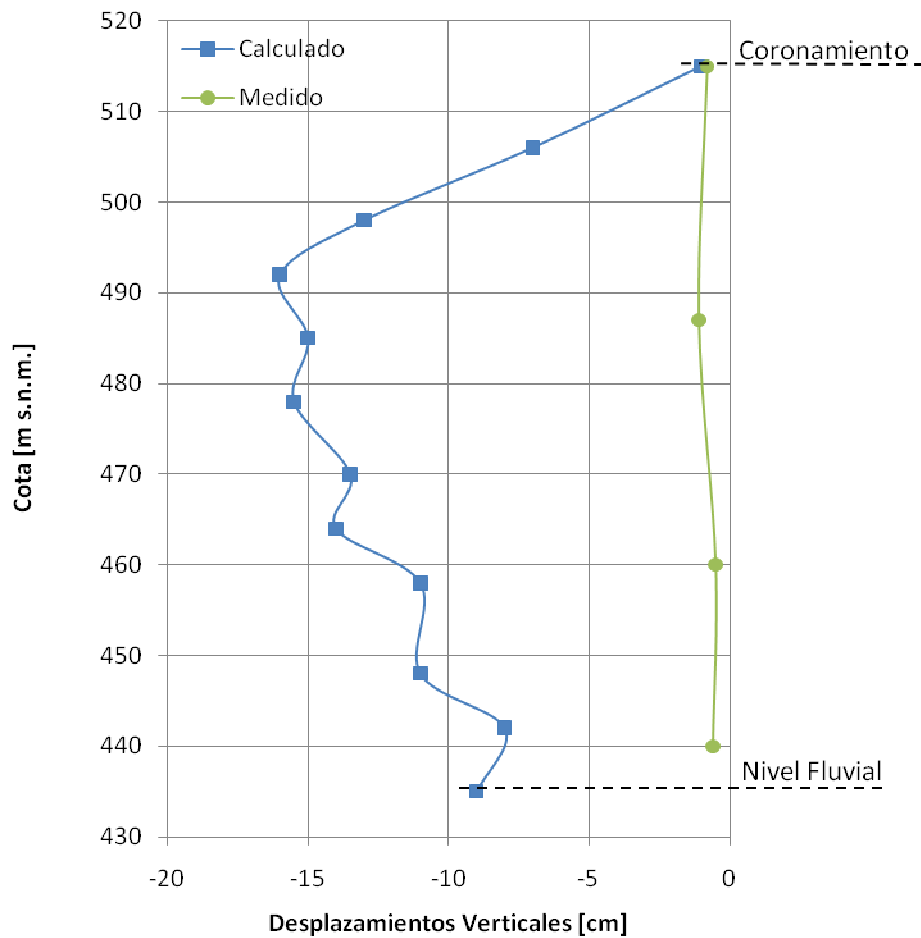


Figura 5
Desplazamientos verticales medidos y calculados al final de la construcción para el talud de aguas abajo de la presa.

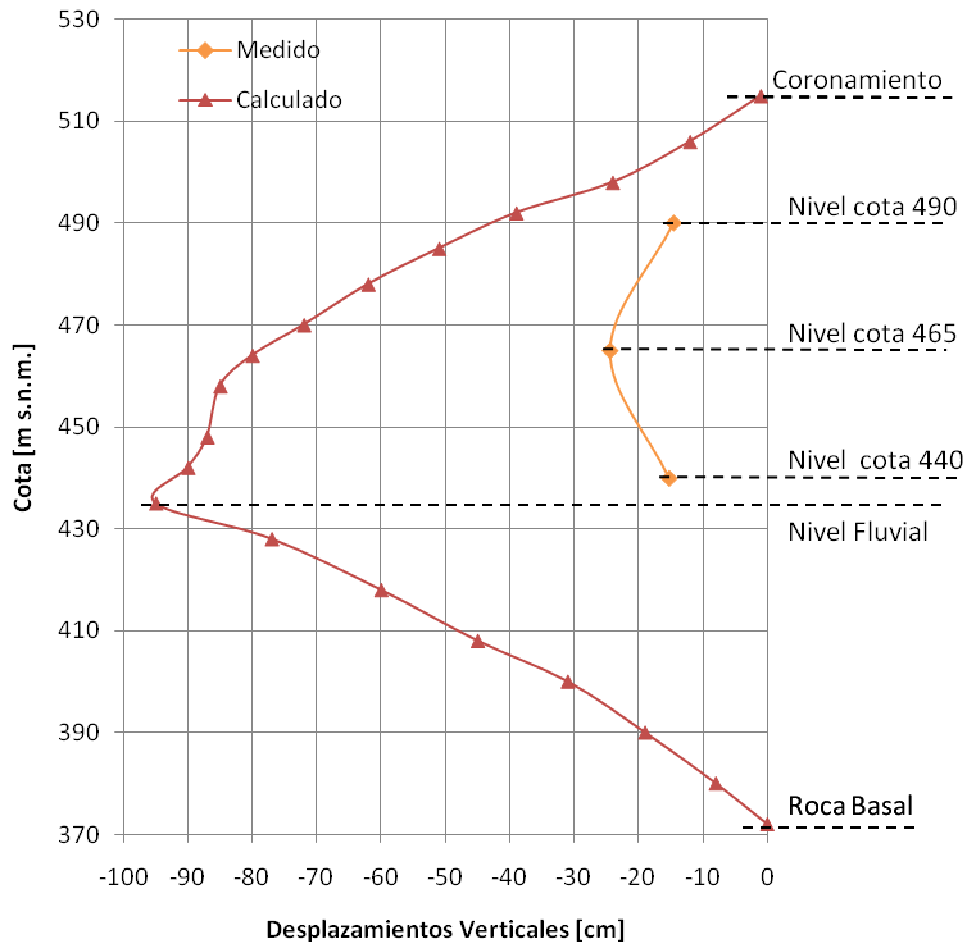


Figura 6

Desplazamientos verticales medidos y calculados al final de la construcción para el eje de la sección transversal estudiada.

6.4 RETROANÁLISIS SEGÚN REGISTROS EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

En este punto se calibran los parámetros de rigidez de suelo de fundación y de los rellenos para disminuir la diferencia entre los asentamientos medidos y estimados durante la construcción de la presa.

Previo al retroanálisis se realiza un ajuste a los parámetros K_0 del fluvial de fundación, ϕ y $D\phi$ del fluvial de fundación, relleno 3B y relleno 3C.

Una vez definidos los parámetros iniciales se procede a la calibración del modelo, modificando los coeficientes K , K_{ur} y K_b del fluvial de fundación y de los rellenos 3B y 3C solamente.

La siguiente tabla resume las consideraciones anteriores.

Tabla 3
Parámetros iniciales usados en el retroanálisis

Parámetro	Fluvial	Relleno			Hormigón	
		3B	3C	2B, 3A	H25	H8
γ [ton/m ³]	1,30	2,35	2,30	2,25	2,30	2,20
N	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00
c [ton/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00	460	165
ϕ_0	53	53	53	40	37	37
D_ϕ	4	8	6	5	0,00	0,00
R_f	0,70	0,70	0,70	0,70	0,00	0,00
K_0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	0,25
M	0,50	0,50	0,50	0,16	0,00	0,00
K	2.541(*)	2.917(*)	2.500(*)	500	202.000	120.000
K_{ur}	4.066(*)	4.667(*)	4.000(*)	500	202.000	120.000
K_b	2.118(*)	1.944(*)	1.667(*)	320	112.000	67.000

(*) Parámetros que se modifican en las iteraciones sucesivas. El resto permanece constante.

Luego del proceso de iteración y debido a la minimización de la diferencia con los asentamientos medidos, se puede decir que los parámetros K, K_{ur} y K_b del suelo de fundación y de los rellenos 3B y 3C que mejor representan el comportamiento de la presa son los siguientes:

Tabla 4 – Resumen del retroanálisis

Fluvial			Rellenos 3B			Rellenos 3C			Descensos Eje		
K	K_{ur}	K_b	K	K_{ur}	K_b	K	K_{ur}	K_b	Cota	Cota	Cota
2990	4784	2492	1826	2923	1217	1566	2505	1044	440	465	490
									16,3	21,8	14,5

Con los valores indicados en la tabla anterior se obtiene que la diferencia entre los descensos medidos y calculados, para las cotas 440, 465 y 490 m s.n.m. son respectivamente -15, -1 y 0 mm.

6.5 VERIFICACIÓN DE DATOS POST RETROANÁLISIS

Finalmente, a modo de verificar los parámetros de rigidez obtenidos, en la siguiente tabla se comparan los asentamientos registrados por las celdas de agua ubicadas en el paramento de aguas arriba de la presa para la carga hidráulica de 35 m, con los arrojados por el programa FEADAM, al cual se le ingresaron como datos de entrada los parámetros encontrados en el retroanálisis y la mencionada carga hidráulica aplicada en 3 etapas: una de 7 m y dos de 14 m. Todos los asentamientos de la tabla siguiente tienen descontados los asentamientos sufridos durante el período de construcción.

Tabla 5
Comparación de asentamientos para carga hidráulica de 35 m

Celda de agua		Asentamientos Observados [cm]	Asentamientos Calculados [cm]
Sur-440	(Celda 1-1-1)	2,2	3,4
Norte-440	(Celda 2-1-1)	3,4	
Sur-465	(Celda 1-1-2)	6,5	1,7
Norte-465	(Celda 2-1-2)	1,7	
Celdas 490		Sin Información	0,6

Como se puede observar los asentamientos medidos están relativamente cercanos a los calculados, salvo el de la celda Sur-465 (6,5 cm), diferencia que se podría atribuir a que para estos desplazamientos no solo influye la rigidez de los rellenos masivos sino también la interacción entre la pantalla de hormigón y los rellenos de transición involucrados.

7. CONCLUSIONES

Los asentamientos registrados son considerablemente menores a los predichos por el modelo de elementos finitos.

Por lo anterior, las gravas usadas para el relleno son mejores que las supuestas inicialmente en el proyecto.

Los valores obtenidos en el retroanálisis permitirán calibrar mejor los parámetros de futuras presas en Chile.