

Análisis del comportamiento estructural de la presa de escollera del dique Campo Alegre, aplicando métodos numéricos

Analysis of the structural behaviour of the Campo Alegre rockfill dam, applying numerical methods

Ignacio Lopez Barutti

ignaciolopezbarutti@gmail.com

Paula A. Juarez

paulajuarez167@gmail.com

Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UCASAL

Resumen

La obra que se presenta es una presa de escollera, que se encuentra ubicada al norte del valle de Lerma a unos 5 km de la localidad de La Caldera. Es un elemento que forma parte de un conjunto de obras que conforman el dique Campo Alegre. Cumplen la función de captación, conducción y el embalse de aguas superficiales del río La Caldera.

La estructura mencionada posee dos problemas principales que afectan las condiciones de servicio por distintas causas posibles:

1. infiltraciones y filtraciones por juntas de pantallas impermeables;
2. asentamientos y desplazamientos horizontales en el cuerpo de la presa.

Se busca estimar la seguridad estructural mediante un análisis no lineal por etapas:

1. análisis no lineal con peso propio;
2. análisis no lineal con peso propio y presión hidrostática;
3. análisis sísmico mediante tiempo-historia.

De esa manera, se obtuvo un campo de tensiones y deformaciones para evaluar la plastificación y desplazamientos finales en la coronación.

Se obtuvieron los parámetros mecánicos y geométricos mediante mediciones realizadas en el lugar, ensayos de laboratorio, datos de la bibliografía disponible y el análisis de los planos originales de la presa. Se destaca, entre los ensayos, la utilización de métodos de prospección geofísica, MAM (Método de Análisis de Microtremores) y MASW (Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) para lograr estimar el módulo de elasticidad de los materiales que conforman la escollera y la fundación.

Se realizó un modelado 2D del corte transversal de la presa y mediante un análisis tiempo-historia, se concluyó que no hay colapso de la estructura, pero que sí se obtienen grandes deformaciones.

Palabras clave

Presa, análisis no lineal, escollera, prospección geofísica

Abstract

This project is a rockfill dam located north of the Lerma Valley, about 5 km from the town of La Caldera. It is part of a group of structures that make up the Campo Alegre reservoir, which serves to collect, transport and impound surface water from La Caldera River.

The aforementioned structure has two main problems that affect the service conditions due to different possible causes:

1. Infiltrations and filtrations by joints of waterproof shields
2. Settlements and horizontal displacements in the center of the dam.

The aim is to estimate the structural safety by means of a nonlinear analysis by stages:

1. Nonlinear analysis with self-weight
2. Non-linear analysis with self-weight and hydrostatic pressure
3. Time-History Analysis

A tension and deformation field were obtained to evaluate plastic deformation and final displacements at the crown.

The mechanical and geometrical parameters were obtained by means of on-site measurements, laboratory tests, bibliography and the original plans of the dam. The tests included the use of geophysical survey methods, MAM (Microtremor Analysis Method) and MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves method) to estimate the modulus of elasticity of the materials that make up the rockfill and the foundation.

A 2D modeling of the cross-section of the dam was performed by a time-history analysis, and it was concluded that there is no collapse of the structure but large deformations are obtained.

Key words

Dam, nonlinear analysis, rockfill, geophysical survey

Introducción

La presa está situada en la República Argentina, provincia de Salta, al norte del valle de Lerma a unos 5 km de la localidad La Caldera, con una elevación de 1421 m.s.n.m (coordenadas -24.57540, -65.36738). La presa de escollera [1],[2], que data de la década de los 70, fue construida sobre el cauce del río La Angostura con el objetivo de elevar el nivel del agua para así satisfacer una o varias necesidades, tales como el abastecimiento de agua, el riego, la recreación. Es una presa de materiales sueltos, es decir, de escollera arrojada. Se logró embalsar aproximadamente unos 24 hm³ de agua, obteniendo un espejo de 322 ha. Posee una altura desde la fundación hasta la coronación de 40 m, y esta tiene un largo de 110 m de estribo a estribo. Sus pendientes son de 1:1,25 aguas arriba y 1:1,3 aguas abajo. Además, el cuerpo de la presa es aproximadamente de 120.500 m³.

Al resolver un análisis tiempo-historia no lineal en un corte transversal por el eje del cauce natural del río La Angostura, se responderán algunas preguntas para lograr estimar la seguridad estructural: teniendo en cuenta las condiciones actuales de la presa ¿llegará a colapsar por un movimiento sísmico? En caso de que no haya colapso, ¿cuáles serán las deformaciones permanentes? Al situarse en una zona sísmica interesa conocer cuáles serán las deformaciones permanentes y no permanentes, y sobre todo la posibilidad de un colapso, ya que la localidad de La Caldera se sitúa aguas debajo de la presa.

1. Modelado 2D de la presa

La presa, como tal, se representó en una geometría 2D mediante los siguientes elementos estructurales:

1. escollera arrojada
2. roca acomodada
3. pantallas

4. plinto
5. relleno aluvial
6. estrato de roca
7. embalse
8. elementos de interfase.

1.1. Materiales

Los parámetros mecánicos de los materiales se obtuvieron mediante ensayos, y otros se encontraron en la bibliografía. Se han realizado dos tipos de ensayos: un ensayo directo de laboratorio y otros ensayos de campo, aplicando MAM (método de análisis de microtremores) MASW (método de análisis multicanal de ondas superficiales) en la presa.

1.2. Métodos de prospección geofísica

Los métodos de prospección geofísica son un conjunto de técnicas físicas y matemáticas no destructivas de investigación utilizados en la exploración indirecta de los subsuelos. Algunos de estos son de fuente activa como el MASW y otros de fuente pasiva, como el MAM [3],[4],[5],[6].

Los métodos principalmente calculan el modo fundamental de la propagación de las ondas de Rayleigh, dentro del dominio de la frecuencia-velocidad. Esto se lleva a cabo con el fin de estimar un perfil de las velocidades de onda S en función de la profundidad y con ello obtener un modelo 1D de la configuración del suelo. De esta manera, se podrá calcular la variación según la profundidad del módulo de elasticidad de los materiales debido a que la velocidad de onda S depende de E, como se ve en la siguiente fórmula:

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)\rho_i}}$$

En donde ρ_i es la densidad del suelo según la profundidad, G es el módulo de elasticidad transversal, y μ es el coeficiente de Poisson.

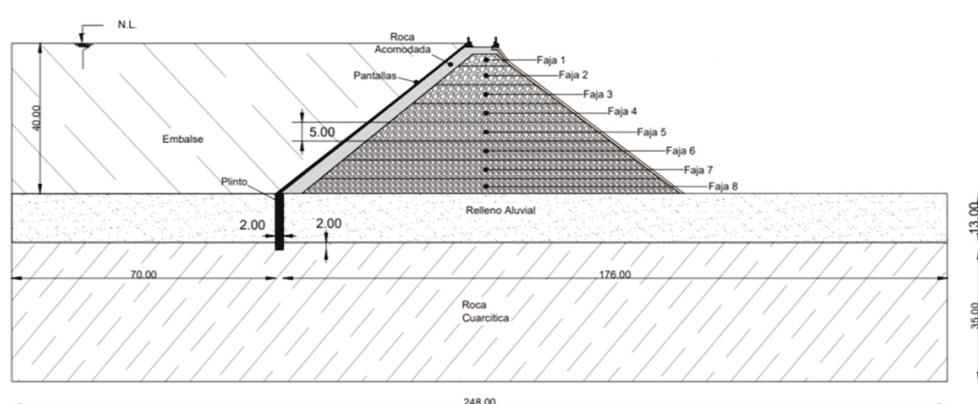


Figura 1: Modelo de la presa a analizar

La velocidad de onda S puede obtenerse al invertir la velocidad de fase de la onda superficial.

En el caso de un medio homogéneo, la onda Rayleigh no es dispersiva y viaja con una velocidad aproximada de 0,9194 Vs. En caso contrario, las ondas Rayleigh se convierten en dispersivas y, por lo tanto, mediante la inversión de los datos de dispersión de las ondas Rayleigh de alta frecuencia se pueden obtener velocidades de onda S.

Los registros se obtienen en el dominio de la frecuencia-velocidad porque es más fácil diferenciar todos los tipos de onda. De ese modo, es posible separar las ondas de superficie en donde se encuentran principalmente las ondas Rayleigh. La forma de registrar las ondas, el cálculo de los perfiles y su representación se realizan por medio de programas específicos.

Se ha logrado obtener resultados de velocidades de corte para el perfil transversal de la presa, importantes para el modelado (Tabla 1).

Se observó en los resultados del MASW que para profundidades mayores a 35 m los valores de Vs tienden a hacerse constantes. Esto es erró-

neo debido a que las velocidades crecen a mayor profundidad.

Por lo tanto, para los datos a partir de los 35 m, que es el límite de alcance aproximado del ensayo MASW que se observó en los resultados, se adoptaron las velocidades Vs obtenidas del ensayo MAM por tener resultados más coherentes en profundidades mayores a 35 m y porque en la bibliografía se especifica que el ensayo MAM tiene mayor alcance a mayores profundidades que el MASW debido a que trabaja con bajas frecuencias. Es por eso que en la columna de la Tabla 1 “Vs ADOPTADO”, los valores entre las profundidades de 0 a 31.648 m se tomaron de los valores obtenidos en el ensayo MASW. A partir de esa profundidad hasta los 48,57 m, se tomaron los valores del ensayo MAM para el cálculo final del módulo de elasticidad E.

Se determinó en el laboratorio que el peso específico de la roca cuarcítica es de 25,77 KN/m³, por lo que la densidad estimada del *rockfill*, suponiendo una variación de la relación de vacíos de 0,4 a 0,25, se calcula por la fórmula:

$$\rho_R = \frac{\gamma_R}{g} = \frac{\rho_{RC}}{g(1 + V_v)}$$

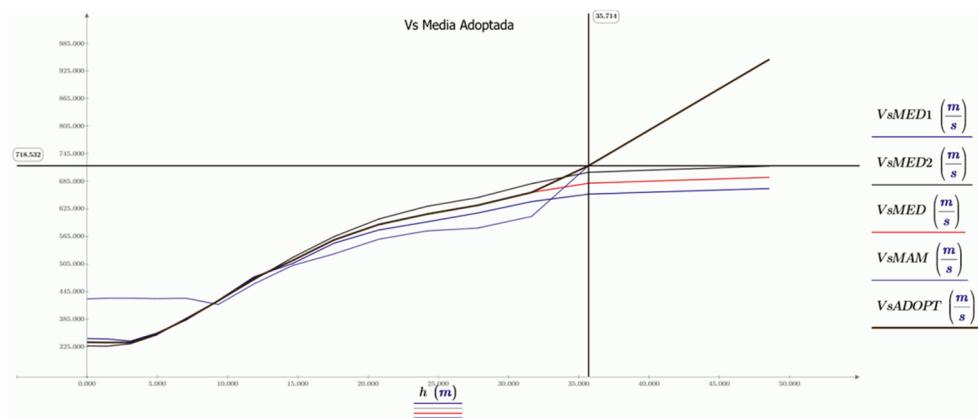


Figura 2: Velocidades de onda Vs

2. Análisis

Se optó por realizar un análisis bidimensional [7], por estado de deformación plana, usando el modelo elastoplástico de Drucker Prager y Mohr Coulomb por fases [8],[9]. Si bien la escollera es un medio discreto, la bibliografía remarca que a gran escala se comporta como un medio continuo. Es por ello que es válido analizar la presa mediante los modelos mencionados, pero al mismo tiempo se encuentra la limitante de que pierde validez luego de producido el colapso de la escollera.

El análisis por fases se aplicó con la intención de que el modelo físico se asemeje más a la realidad, respetando la secuencia con la que varían los campos de tensiones y deformaciones en el

tiempo. Esto implicó un análisis no lineal, es decir, no hay proporcionalidad entre las tensiones y deformaciones. En otras palabras, resulta incorrecto realizar el análisis estructural sobre la presa considerando en una única instancia la totalidad de las cargas que actúan sobre la totalidad de los elementos.

En una primera fase se asignaron los materiales de baja resistencia, el módulo elástico y el ángulo de fricción reducidos, de modo que plástifiquen ante la acción del peso propio y que la geometría deformada del modelo se asemeje a la geometría real de la presa. Luego en las fases siguientes se asignó un material más resistente de módulo elástico y de ángulo de fricción interna

Tabla 1: valores adoptados para E

h [=] m	Vs ADOPTADO [=] m/s	CALCULO DE MODOLO ELASTICO					
		h [=] m	Vs [=] m/s	Vv	$\rho [=] \text{Ns}^2/\text{m}^4$	G [=] Mpa	E [=] Mpa
0,000	334,807	POR INTERPOLACION	0	-	-	-	-
1,429	334,154		2,500	338,318	0,400	191,271	21,8925979 56,921
3,077	334,339		7,500	360,575	0,381	193,867	25,2055585 65,534
4,945	352,594		12,500	430,897	0,363	196,535	36,4910321 94,877
7,033	384,800		17,500	514,287	0,344	199,277	52,7071696 137,039
9,341	425,244		22,500	568,709	0,325	202,097	65,3644075 169,947
11,868	473,838		27,500	588,298	0,306	204,998	70,9488822 184,467
14,615	512,676		32,500	648,596	0,288	207,984	87,4939771 227,484
17,582	557,730		37,500	747,472	0,269	211,057	117,920771 306,594
20,769	591,262		40,000	795,693	0,250	214,223	135,630456 352,639
24,176	613,756		45,000	885,713	0,100	243,435	190,9722 496,528
27,802	633,005		-	-	-	-	-
31,648	660,263		-	-	-	-	-
35,714	718,532		-	-	-	-	-
48,571	950,014		-	-	-	-	-

mayores, simulando así el endurecimiento, es decir, el aumento de la resistencia debido al reacomodo de las partículas. Por lo tanto, esto último se trata de la plastificación en el modelo elastoplástico.

Se crearon los distintos materiales de acuerdo al siguiente criterio: con el fin de lograr que la deformación inicial del modelo se asemeje a la deformación medida en la coronación de la presa, se optó por reducir algunos parámetros mecánicos mediante un proceso iterativo, esto es, reducir la resistencia inicial, de modo que ante la carga de peso propio y presión hidrostática, las deformaciones se asemejen. Esto se logró al realizar un análisis por fases.

Los valores de coeficiente de Poisson, la relación de vacíos, la cohesión, ángulo de fricción interno, el ángulo de dilatancia y el coeficiente de presión de tierra en reposo K_0 (relación entre presión vertical sobre horizontal, que depende del ángulo de fricción interna) son valores extraídos de la bibliografía [10].

Los valores de la relación de vacíos se hicieron variar dentro de un rango de 0,4 a 0,2 para simular la variación de porosidad a medida que aumenta la profundidad.

Los valores del módulo elástico y la densidad se extrajeron de los ensayos que se detallarán a continuación, los cuales se descubrió que, como varían con la profundidad, se subdividió la presa en fajas de 5 m que tendrán el mismo valor que E en toda el área, por lo que se interpolan los valores de V_s para profundidades tales que corresponden a puntos medios de cada faja.

Primeramente se analizó la presa con todos sus elementos, sin el embalse, sometida a su peso propio, en donde en una zona intermedia (fajas muy comprimidas), se introdujo un material "Escollera R", el cual es similar a la escollera, pero de resistencia reducida, de modo que se pudo simu-

lar en esta primera etapa el reacomodo de las partículas. Luego en una segunda fase se agregó el embalse, es decir, la presión hidrostática. Con el fin de contemplar el efecto de las redes de flujo en la fundación se redujo la resistencia del relleno aluvial, asignándose un material "Relleno Aluvial R". A la zona de la escollera, cuya resistencia inicial se vio reducida, se le asignó "Escollera A", un material más resistente que en el resto de la escollera, simulando así el endurecimiento del material.

2.1. Condiciones de borde

Al modelo se le asignaron las siguientes condiciones de borde:

Cargas solicitantes

Se comenzó por las cargas solicitantes, las cuales fueron: carga muerta, presión hidrostática, acción sísmica y reacción del suelo (fundación). Se tomaron estas cargas, ya que el análisis dinámico de la presa se realiza en un periodo de tiempo corto, que es el tiempo de duración del sismo. Entonces, se consideraron las cargas cuyos valores son elevados y constantes en ese periodo de tiempo.

Al realizar un análisis tiempo-historia, se debe utilizar un acelerograma que sea representativo de un sismo máximo posible de ocurrir en la zona de emplazamiento de la obra analizada. El acelerograma se obtuvo de la base de datos del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research), en donde se seleccionó un acelerograma de un grupo de registros representativos posibles de ocurrir en las distintas zonas sismogénicas de Salta.

Interfaces

El objetivo de los elementos de interfaces es brindar al modelo, un comportamiento estructural que se asemeje a la realidad, representando,

por ejemplo, la no linealidad que se da en la interacción de dos elementos. Es por esto que utilizamos la interfaz de interacción fundación-presa, la interacción fluido-estructura, la interfaz en juntas, y las interfaces de borde, las cuales fueron ondas superficiales, la radiación sommerfeld y la absorción inferior del fondo del embalse.

Mallado

Se optimizó el mallado en lugares donde se necesitaba mayor precisión, tales como los elementos pequeños (por ejemplo, el plinto). Mientras que en los lugares que no se requería de mucha precisión, se optimizó el mallado, utilizando elementos más grandes.

2.2. Relevamiento topográfico

Consistió en hacer un levantamiento de puntos en la coronación por el eje de la presa. Se utilizaron estacas que ya se encontraban en el lugar y que estaban distanciadas cada 5 m.

Los resultados consisten en medidas horizontales y verticales relativas al punto P1 donde se estacionó el instrumento.

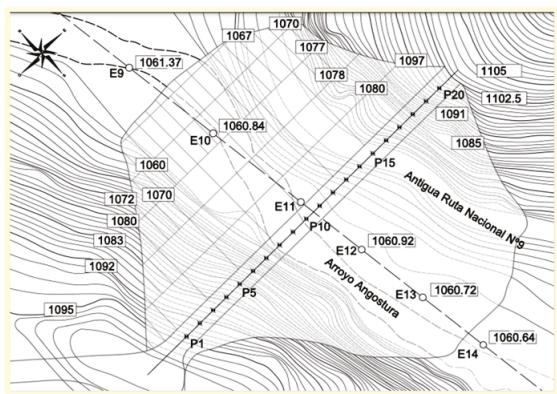


Figura 3: Vista en planta de la presa, y curvas de nivel

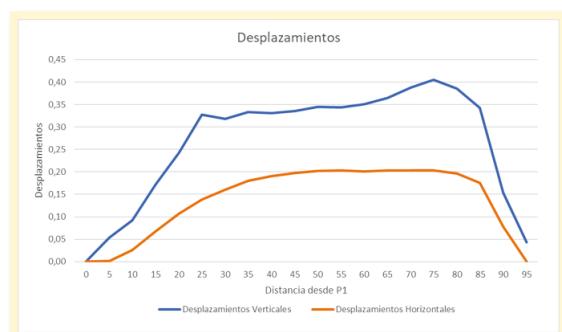


Figura 4: Desplazamientos verticales y horizontales en coronación.

Los resultados de interés son los que se obtuvieron entre los 45 y 55 m debido a que es por ese

intervalo por donde se interpreta que pasa el eje del cauce del río, adoptando un desplazamiento objetivo horizontal de 20 cm y vertical de 35 cm para el corte transversal ingresado al modelo.

2.3. Análisis estructural

Este se llevó a cabo mediante cinco pasos, estos son:

- Paso 1: consiste en un análisis lineal elástico;
- Paso 2: análisis no lineal, en dos fases;
- Paso 3: análisis de vibración libre;
- Paso 4: cálculo de los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh;
- Paso 5: análisis tiempo-historia.

2.3.1. Paso 1: análisis lineal

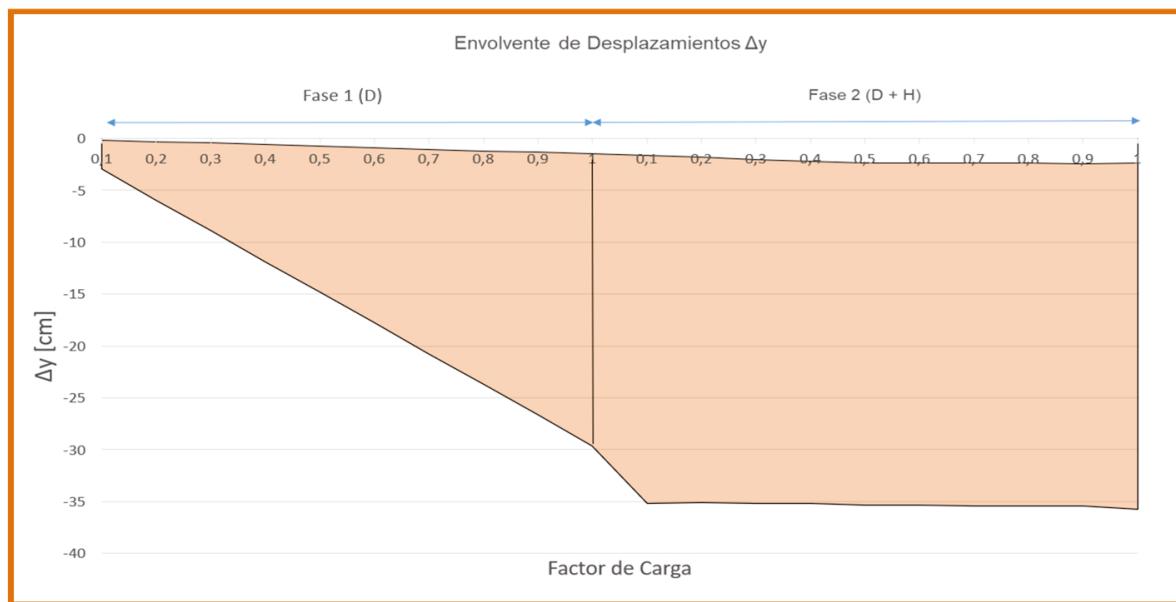
Consiste en un análisis lineal elástico. El objetivo es verificar que el modelo se creó correctamente y que no tiene errores de dibujo, de asignación de condiciones de borde (cargas y apoyos), etc.

2.3.2. Paso 2: análisis no lineal

En este paso el objetivo es llegar a la configuración deformada que se obtiene del relevamiento topográfico. Esto se logró mediante un proceso iterativo en el cual se redujo la rigidez de los materiales. Se aplicó un análisis no lineal en dos fases. En la primera fase solo se aplica el peso propio y sobre esta deformación se carga el modelo con la presión hidrostática que conforma la segunda fase. Se debe obtener una configuración deformada tal que el conjunto de nudos que pertenece a la coronación muestre desplazamientos verticales y horizontales similares a los obtenidos en el relevamiento topográfico.

Es aquí entonces donde se revisan estos valores y se reduce progresivamente la rigidez de los materiales para en una próxima iteración asemejarse lo más posible a la deformación objetivo. En el espaldón aguas abajo se observa una zona de la escollera acomodada, la cual se encuentra comprimida, evidenciando un asentamiento del cuerpo de la presa a esa altura. Esta situación se suma como otro objetivo más a cumplir para obtener la deformación inicial. Esto se logró al reducir el ángulo de fricción interna en las fajas 2, 3 y 4.

En la Figura 6 se observa la envolvente de desplazamientos nodales en la dirección vertical en cm por cada paso de carga. Se muestra en la primera fase un comportamiento lineal sin plastificación, mientras que en la segunda fase se genera el comportamiento no lineal, es decir, se plastifica en la fase 2. Se observan los desplazamientos en un intervalo de 0 a -35 cm.

**Figura 6: Envolvente de desplazamientos verticales**

Plastificación

En la Figura 6 se observa la plastificación como resultado del segundo estado de cargas ($D+H$). Esta plastificación representa las distorsiones permanentes (giros relativos de los nodos).

La mayor plastificación se da en las fajas, en las cuales se redujo el ángulo de fricción interna.

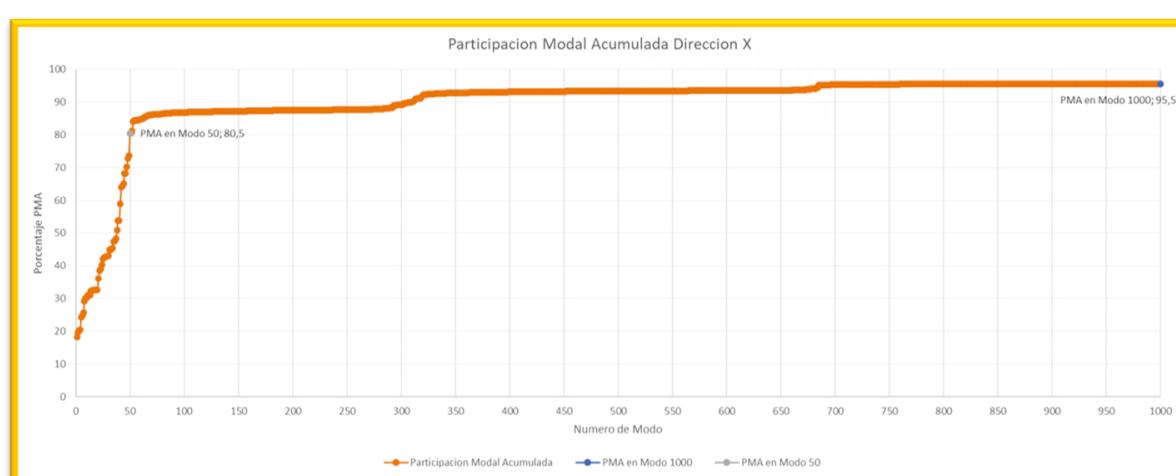
2.3.3. Paso 3: análisis de vibración libre

Se realiza el análisis de vibración libre del modelo para conocer los modos de vibración y la participación modal acumulada. Tanto para utilizar en el análisis tiempo-historia como para el cálculo de los coeficientes de amortiguación, se necesita conocer la cantidad de modos de vibración en la dirección e para que la participación modal acumulada (PMA) sea mayor o igual al 90 % en cada

dirección. Se debe encontrar cuál es entonces la cantidad de modos de vibración que se debe calcular para el análisis. Para ello, primero se propone un valor elevado de modos de vibrar para que el software calcule la PMA, y mediante la observación de los porcentajes de participación, se ajusta mediante un proceso iterativo, ya sea al reducir o al aumentar el número de modos de vibrar hasta encontrar el valor deseado.

Con el propósito de ver el comportamiento de la presa, se propuso el valor de PMA para 1000 modos de vibrar y así se encontró que se alcanza un 87,88 % para la dirección x y un 95,58% en y.

En la Figura 7 se ve la participación acumulada para los 1000 modos.

**Figura 7: Participación modal acumulada**

Se puede observar para la dirección x una elevada pendiente hasta los 50 modos de vibrar. Luego se puede notar que, por más que se incrementen los modos, la PMA no aumenta de forma considerable. Por lo tanto, al observar el gráfico de la Figura 7, se decidió colocar 50 modos de vibración para el cálculo de tiempo historia, obteniendo un 80,5 % de PMA, a fin de ahorrar memoria y tiempo de cálculo. Si se considera como en el gráfico mencionado 350 modos para llegar al 90 %, se requiere de una elevada memoria y tiempo de cálculo. Por ende, con 50 modos se obtiene 80 % de PMA y se puede considerar un valor bastante aceptable.

2.3.4. Paso 4: cálculo del coeficiente de amortiguamiento de Rayleigh

Esta fórmula sirve para simular el amortiguamiento de la estructura a partir de un coeficiente que afecta a la matriz de masa y a la matriz de rigidez. Dicho coeficiente se calcula a partir de la frecuencia fundamental, la frecuencia en modos superiores (el modo a partir del cual la PMA es mayor a 90 %) y la relación de amortiguamiento que se adopta en 5 %.

$$C_{Rayleigh} = b_0 \cdot M + b_1 \cdot K$$

$$b_0 = \zeta \frac{2\omega_1 \cdot \omega_n}{\omega_1 + \omega_n} \quad b_1 = \zeta \frac{2}{\omega_1 + \omega_n}$$

ζ es relación de amortiguamiento

ω_n es frecuencia fundamental.

ω_1 es frecuencia en modos superiores.

Para este paso, se modificó la cantidad de modos de vibrar para que llegue la PMA a 90 % debido a que este procedimiento no requiere de mucha memoria y tiempo. De ese modo, el software obtiene 1961 modos de vibrar, observando una PMA de 91,5 %.

La frecuencia fundamental que se obtiene es 0,78 Hz, y la frecuencia en modos superiores es 65,48 Hz, obteniendo así:

$$b_0 = 0.48832 \text{ y } b_1 = 0.00024017$$

2.3.5. Paso 5: análisis tiempo-historia

Se visualiza en la Figura 8, la historia de desplazamientos Δy para 16 segundos del acelerograma en centímetros, en el nodo de la coronación. Se observan desplazamientos en un rango de 35 cm a 50 cm.

La historia de desplazamientos Δx para 16 segundos del acelerograma en centímetros en el nodo de la coronación se visualiza en la Figura 9.

Se obtuvieron desplazamientos en un rango de 20 cm a 45 cm.

La envolvente de la historia de distorsiones plásticas para el cuerpo de la presa se muestra en la Figura 10.

3. Conclusiones

Si se observa la Figura 10, a medida que se avanza en el acelerograma, se incrementa la plastificación, por lo que el material se deforma buscando su propio equilibrio y generando nuevas distribuciones de tensiones. Esto hace posible que a medida que se avanza en el tiempo, en algún instante, el material se deforma sin lograr su estabilidad, provocándose así el colapso. Esta situación de colapso no se observa, debido a que las distorsiones se mantienen en cierto rango, sin incrementarse de forma súbita. Además, en cada segmento de tiempo, el método numérico logra la convergencia. Esto significa que el material sí logra su propia estabilidad global. Gracias a este análisis se estima, entonces, que no hay colapso estructural de la presa analizada bajo las condiciones mencionadas.

Resulta relevante reiterar la problemática que existe sobre la Presa de Escollera del dique Campo Alegre. La misma posee considerables deformaciones observables a simple vista, incluyendo infiltraciones en el espaldón aguas abajo. Además, se destaca la importancia de la obra, tanto para el pueblo de la Caldera como para la ciudad de Salta Capital. Por lo tanto, es importante realizar un diagnóstico general de la obra para así identificar en lo posible los problemas estructurales en el presente y prevenir conflictos de serviciabilidad en un futuro y estimar la seguridad estructural.

La intención del proyecto fue resolver esta problemática desde la perspectiva antes mencionada, realizando un análisis dinámico, debido a que los sismos son un problema de importancia estructural para la presa, el cual puede implicar desde la pérdida de funcionalidad, hasta su colapso.

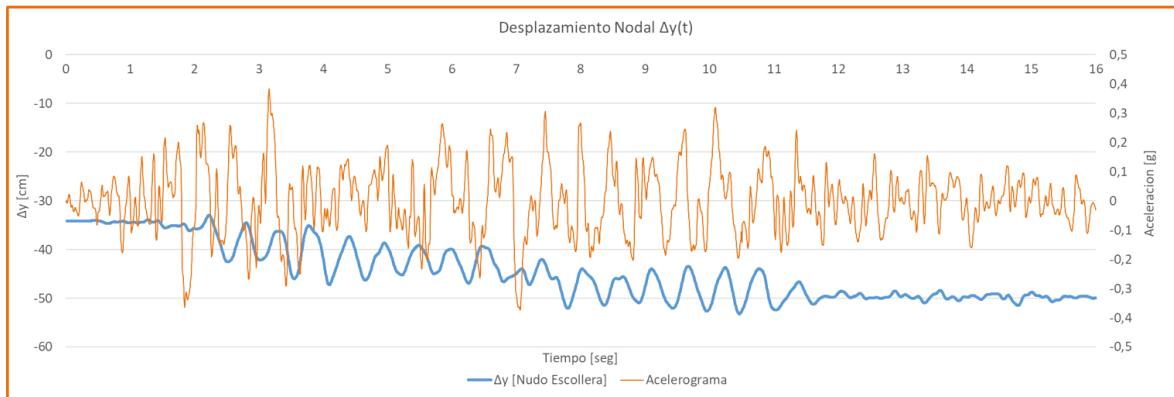


Figura 8: Desplazamiento absoluto en dirección vertical

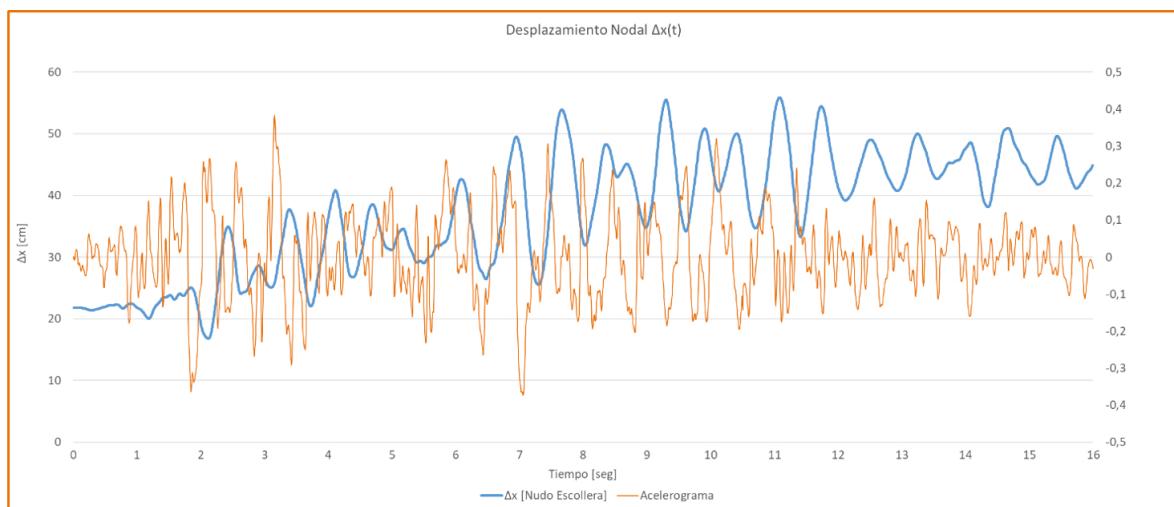


Figura 9: Desplazamiento absoluto en dirección horizontal

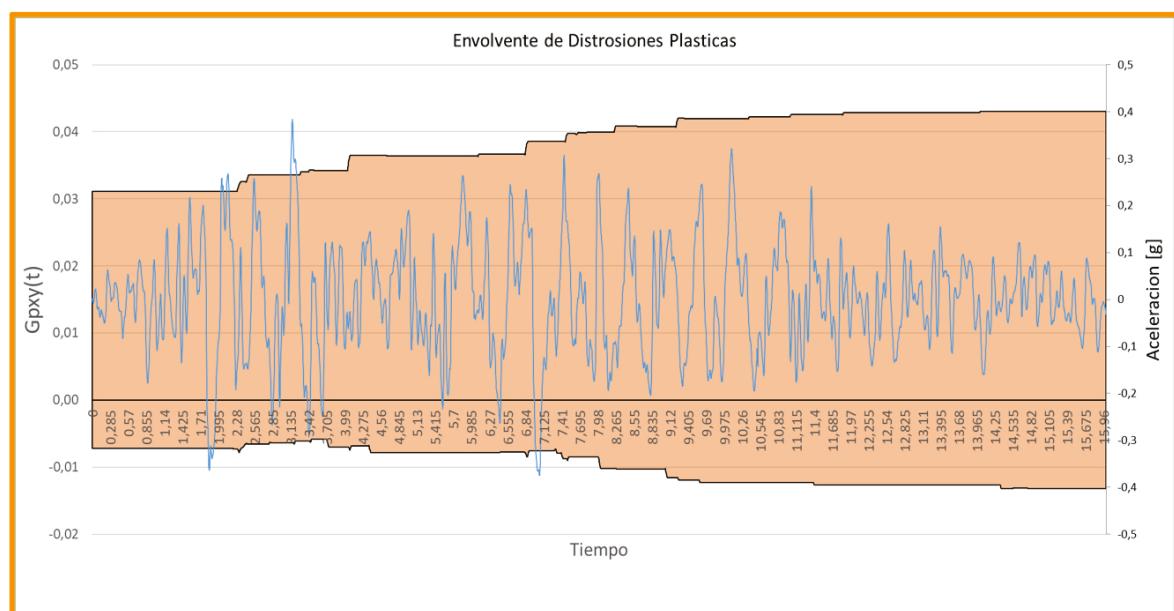


Figura 10: Envolvente de distorsiones plásticas

Se recuerda que, si bien el análisis dinámico consiste en obtener la respuesta estructural en términos de tiempo, para lograr esto se necesita cierta información, la cual se debe obtener a partir de instrumentos de auscultación, estudios topográficos, geotécnicos, geológicos, hidrológicos, entre otros, realizados *in situ* y en gabinete. Los estudios requieren equipos e instrumentación sofisticada, lo cual para el contexto del presente trabajo no se dispuso en su totalidad. Por lo tanto, los alumnos se remitieron a realizar una investigación bibliográfica para la obtención de aquellos parámetros necesarios para el análisis mencionado. Sin embargo, no toda la información se halló en las bibliografías, por lo que se improvisó cómo obtener los parámetros con las herramientas disponibles. De esa manera, los resultados del proyecto se analizaron mediante bibliografía orientada en ingeniería de presas, geotecnia, plasticidad, métodos numéricos, mecánica de rocas, dinámica estructural, proyectos finales similares, entre otros, para establecer un procedimiento a seguir.

Los textos de plasticidad expresan que existen teorías para analizar medios discretos y continuos. Si bien la escollera es un medio discreto, la bibliografía remarca que a gran escala la misma se comporta como un medio continuo. Es por ello que es válido analizar la presa mediante el modelo de Mohr Coulomb y Drucker Prager, pero al mismo tiempo se encuentra el limitante de que el modelo pierde validez luego de producido el colapso de la escollera.

Referencias

- [1] M. E. Espinosa. "Ingeniería de Presas de Escollera", Universidad Nacional de Cuyo, 2010.
- [2] E. Vallarino Cánovas del Castillo. *Tratado básico de presas*, 4º edición. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1998.
- [3] C.D. Hubert. "Caracterizaciones dinámicas del suelo utilizando la técnica de MASW y microtremor en zonas urbanas". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba, Escuela de Geología: Facultad de ciencias exactas, físicas y naturales. 2016.
- [4] M. Modenesi. "Estudio de sensibilidad de técnicas de microtremores y su aplicación para caracterización de geología urbana". Universidad Nacional de Córdoba, Escuela de Geología. Facultad de ciencias exactas, físicas y naturales. 2015.
- [5] Geometrics Inc. *SeisImager: Manual Software de Windows para análisis de ondas superficiales y análisis de sísmica de refracción*, 2009.
- [6] H. Flores, C. Lomnitz, S. Yussim. "Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtremores con el método SPAC". Tesis. Departamento de sismología, Instituto de geofísica, UNAM; UNAM, 2004.
- [7] O. C. Zienkiewicz, and R. L. Taylor, *El método de los elementos finitos*, 4º edición, Vol. 1. Barcelona: CIMNE, 1994.
- [8] Hai-Sui Yu. *Plasticity and Geotechnics*, 1º edición. Nueva York: Springer, 2006.
- [9] P. Pere. *Ecuaciones constitutivas, elasticidad y plasticidad*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Barcelona, 2006.
- [10] K. Terzaghi. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3º edición. New York: John Wiley and Sons, INC.