

**TENSIONES Y DEFORMACIONES EN PRESAS
GRAVITACIONALES DE HORMIGON BAJO ACCION
SISMICA CONSIDERANDO INTERACCION FLUIDO
ESTRUCTURA**

Jorge E. Crempien Laborie, Ph.D.
Profesor, Facultad de Ingeniería
Universidad de los Andes
Av. San Carlos de Apoquindo 2200
Las Condes, Santiago
jcrempie@uandes.cl

Palabras Clave: Embalse, Sismos, Dinámica

Resumen. En el presente trabajo se presenta una metodología para el análisis dinámico mediante elementos finitos de presas de embalses solicitadas por acciones sísmica considerando efectos de interacción suelo estructura y fluido estructura. El movimiento del agua embalsada es considerado a través de la ecuación de ondas para pequeñas deformaciones y fluido estacionario, el cual es acoplado al movimiento del muro de la presa a través de imponer condiciones de borde entre el fluido y la presa móviles. Por último el análisis sísmico es realizado mediante el método de superposición modal de la respuesta espectral del sistema. La metodología es aplicada a la presa de Ralco

1. INTRODUCCION

En el presente trabajo se muestra una forma de analizar el comportamiento sísmico de presas gravitacionales mediante el método de elementos finitos acoplado las ecuaciones de movimiento del muro y la roca de fundación, con las del movimiento del agua. En Chile la mayoría de las presas de proyectos hidroeléctricos se ubican en zonas de alta sismicidad, por lo que en el análisis este tipo de sollicitación debe ser considerada.

Varios autores han trabajado el problema de interacción fluido estructura para depósitos de agua, esto es con el agua inicialmente en reposo, algunos de ellos han considerado el agua como una masa asociada al muro de la presa, como es el caso de Housner¹ y de análisis acoplado mediante elementos finitos y elementos de frontera como el trabajo de Koh et al², El primer análisis considerando interacción a través de las ecuaciones del movimiento aplicada a presas corresponde a Chopra y Colaboradores^{3,4,5,6,7}, quienes desarrollan primeramente un modelo 2D para finalmente implementar modelos 3D con análisis de la respuesta sísmica del sistema muro roca de fundación y agua en el dominio de la frecuencia. En el presente trabajo se hace el análisis alternativamente mediante el método de superposición modal espectral.

2. ECUACIONES DE MOVIMIENTO

A continuación se presenta un resumen de las ecuaciones que determinan el comportamiento de la represa, considerando su interacción con el agua embalsada y con la roca de fundación.

2.1 Presa

Ecuaciones discretas para el movimiento de la presa se pueden construir por el método de los elementos finitos. En este caso se define una malla de elementos finitos que discretize el muro, de modo que en los nodos estén los grados de libertad que en este caso son los desplazamientos y las incógnitas del sistema de ecuaciones. En este caso la ecuación de movimiento del embalse es:

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -\{E\}a_g(t) - \{Q(t)\} \quad (1)$$

En esta ecuación $[m]$, $[c]$, y $[k]$ corresponde a las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura, $\{u\}$ y sus derivadas con respecto al tiempo corresponde al vector de desplazamientos nodales, la velocidad y la aceleración respectivamente. $\{E\}$ corresponde al vector de influencia de la aceleración del suelo inducida por el terremoto y por último $\{Q(t)\}$ corresponde a un vector de fuerzas hidrodinámicas generadas por la interacción del fluido y la estructura. Esta fuerza se genera solamente en la pared de aguas arriba en la zona donde el agua está en contacto con la pared de la presa, $a_g(t)$ corresponde a la aceleración del suelo

inducida por el terremoto.

Los desplazamientos nodales del muro del embalse se obtienen aproximadamente como una combinación lineal de los primeros modos de vibrar del sistema, esto es:

$$\{\mathbf{u}(t)\} = \sum_{i=1}^1 \{\Phi\}_i Y_i(t) \quad (2)$$

en que Φ_j es el vector i -ésimo vector modal y $Y_i(t)$ es la i -ésima coordenada modal. Los vectores modales salen de la ecuación de valores y vectores propios típica:

$$[-\omega^2[\mathbf{m}] + [\mathbf{k}]]\{\Phi\} = \{0\} \quad (3)$$

si se usa la transformación de la ecuación 2 en la ecuación 1 se tiene:

$$\mathbf{M}_i \ddot{Y}_i + \mathbf{C}_i \dot{Y}_i + \mathbf{K}_i Y_i = \mathbf{P}_i(t) \quad (4)$$

en que:

$\mathbf{M}_i = \{\Phi\}_i^T [\mathbf{m}] \{\Phi\}_i$, $\mathbf{C}_i = 2\xi_i \omega_i$, $\mathbf{K}_i = \omega_i^2 \mathbf{M}_i$. En cuanto a $P_i(t)$ está dado por:

$$\mathbf{P}_i(t) = -\{\Phi\}_i^T \{\mathbf{E}\} \mathbf{a}_g(t) - \{\Phi\}_i^T \{\mathbf{Q}(t)\} \quad (5)$$

y corresponde a la fuerza modal correspondiente. Las fuerzas hidrodinámicas del vector Q se generan mediante el método de los desplazamientos virtuales de la presión hidrodinámica sobre los desplazamientos virtuales del muro.

2.2 Fluido

La presión hidrodinámica $p(x,y,z,t)$, aparte presión hidrostática, está gobernada por la ecuación de ondas, válida para desplazamientos pequeños, movimiento irrotacional del agua y efectos de viscosidad del fluido despreciables:

$$\nabla^2 \mathbf{p} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial t^2} \quad (6)$$

en que C es la velocidad de las ondas de compresión en el fluido. A lo largo de las fronteras con aceleración del fluido, la condición de borde de presión está dada por:

$$\frac{\partial p}{\partial n}(s, t) = \frac{w}{g} \mathbf{a}_n(s, t), \quad \mathbf{s} = s, s' \quad (7)$$

en que s y s' son coordenadas a lo largo de la superficie de interacción del fluido con la estructura y el fondo del embalse, w es el peso unitario del agua; g la aceleración de gravedad y $\mathbf{a}_n(s, t)$ es la componente normal a la superficie de interacción de la aceleración en la frontera. Despreciando las ondas en la superficie del agua, esto es para $y = H$, se tiene otra condición de borde:

$$p(x, H, t) = 0 \quad (8)$$

Además de las condiciones de borde anteriores las presiones deben satisfacer la condición de radiación para las regiones del agua que se extienden a infinito en el modelo, en la dirección de aguas arriba.

Las aceleraciones normales de la superficie de interacción entre la pared del muro y el agua, cuando la excitación es $a_g^l(t)$, son:

$$\mathbf{a}_n(s, t) = \underbrace{\varepsilon^l(s)}_{\text{rígido}} \mathbf{a}_g^l + \underbrace{\sum_{j=1}^J \phi_j^f(s)}_{\text{flexible}} \ddot{\mathbf{Y}}_j^l(t) \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_n(s', t) = \varepsilon^l(s') \mathbf{a}_g^l(t) \quad \text{Movimiento del fondo} \quad (10)$$

en que $\varepsilon^l(s)$, $s = s, s' = a$ es una función definida a lo largo de los bordes con aceleración que da la magnitud de la componente de un vector unitario l , en la dirección de la normal n ; y $\phi_j^l(s)$ es una función continua que representa la componente normal a la superficie de interacción fluido muro del modo de vibrar Φ_j^f .

En la ecuación los términos representan aceleraciones del las caras del fluido debido a aceleraciones $a_g^l(t)$ del suelo con el embalse rígido. El segundo término representa las aceleraciones debidas al movimiento del muro flexible moviéndose respecto de su base.

3. MODELAMIENTO DEL EMBALSE MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

El sistema correspondiente al embalse de Ralco está constituido por el muro de la presa, el

cual es de hormigón compactado mediante rodillo, se trata de un muro de tipo gravitacional. Otro componente del sistema es la roca de fundación que se define en una región relativamente extensa. Por último, el agua embalsada. Estos tres elementos deben ser tomados en cuenta en el análisis dinámico.

3.1 El Muro de la Presa

El muro es modelado como un conjunto de elementos finitos tridimensionales caracterizados por su módulo de Young, el módulo de Poisson y el peso del hormigón. Los elementos tridimensionales sólidos usados son elementos tipo prisma rectangular estándar de 20 nodos y prismas triangulares estándar de 15 nodos.

El mecanismo de disipación de energía vibratoria del muro se toma en cuenta a través de un factor constante de amortiguamiento histerético η_A . Un factor de amortiguamiento viscoso ξ igual para todos los modos de vibración del embalse en una fundación de roca rígida y el embalse vacío se adopta correspondiente a un factor de amortiguamiento histerético constante $\eta_0 = 2\xi$. Ensayos de vibración forzada en embalse indican que el rango del amortiguamiento viscoso esta entre un 1 y un 3 por ciento del amortiguamiento crítico y muy independiente del modo de vibrar. En este caso un amortiguamiento histerético $\eta = 0.1$ lo que conduce a un amortiguamiento modal de un 5% del crítico parece aceptable para respuestas de mayor desplazamiento pero lineales en un embalse.

3.2 La Roca de Fundación

La roca de fundación se ha modelado como un conjunto de elementos finitos tridimensionales, típicos, del mismo tipo de los usados para el hormigón de la presa. En este caso las características de tales elementos son el módulo de Young de la roca, su módulo de Poisson. Esta forma de modelar la roca de fundación es más conveniente que la modelación a través de buscar la impedancia d una espacio seminfinito utilizado en otras modelaciones. Ya que no produce buenos resultados en presas fundadas en cañones angostos cuya altura es superior a la altura del muro.

La decisión importante en la modelación mediante elementos finitos de la masa rocosa de fundación es cual es la extensión de esta y que tipo de condiciones de borde se le asignan. En casos donde la masa rocosa es similar en grandes extensiones a lo largo y ancho del cañón es conveniente colocar condiciones de borde con características de transmisibilidad de ondas de modo que el dominio rocoso presente en la modelación tenga las características de una región no limitada como sería en la realidad.

Las dimensiones de la zona rocosa están de acuerdo al parámetro R_f , que corresponde al radio de la zona cilíndrica que representa la zona rocosa. Este debe ser elegido lo suficientemente grande como para representar satisfactoriamente los efectos de flexibilidad del sistema de fundación. No se asignan fuerzas de inercia la zona rocosa, la cual solo influye

a través de su flexibilidad. La geometría de la roca de fundación es compatible con la de la presa y del agua embalsada.

3.3 Agua Embalsada

El embalse detrás de la presa usualmente es de forma compleja. En el caso de la presa de Ralco el canon sigue con una forma de U pos bastante distancia aguas arriba, lo cual simplifica bastante el modelo ya que factible suponer que se trata de un embalse de largo infinito, sin una zona de transición de geometría irregular. Sin embargo se define una zona cercana a la presa la cual se modela como la zona de transición a través de elementos finitos tridimensionales. Estos elementos finitos se definen de modo que su forma sea compatible con los elementos finitos de la cara de aguas arriba del muro de la presa. Estos elementos se caracterizan por las siguientes propiedades: la densidad del agua ρ y la velocidad de propagación de ondas de presión en el agua C .

3.4 Fronteras Absorbentes para los Lados y el Fondo del Canal

Las características de absorción de ondas de presión en el fluido por parte de los materiales en los lados y fondo del canal están caracterizados por el parámetro de reflexión α que corresponde a la razón entre la amplitud de la onda reflejada y la transmitida en los bordes del embalse. El caso de $\alpha = 1$ indica que las ondas de presión son completamente reflejadas y cuando $\alpha = 0$, significa que las ondas de presión son totalmente transmitidas. Los casos reales están entre estos dos valores límites y el coeficiente α se puede determinar a través de las propiedades de los materiales que forman las paredes del embalse de modo que:

$$\alpha = \frac{1 - k}{1 + k} \quad (19)$$

en que:

$$k = \frac{\rho C}{\rho_r C_r} \quad (20)$$

y

$$C_r = \sqrt{\frac{E_r}{\rho_r}} \quad (21)$$

en que ρ_r y E_r son las propiedades de los materiales que forman el fondo del embalse. Para embalses nuevos casi sin depósito de sedimento se recomienda valores de α entre 0.9 y 1. En tanto que para embalse viejos con depositación considerable de sedimentos los valores de α deben estar entre 0.75 y 0.9.

Esta metodología se aplicó al sistema formado por el muro gravitacional, la roca de fundación y el agua embalsada en la central hidroeléctrica de Ralco. En la figura 1 a continuación se pueden ver las mallas para los distintos elementos de la presa.

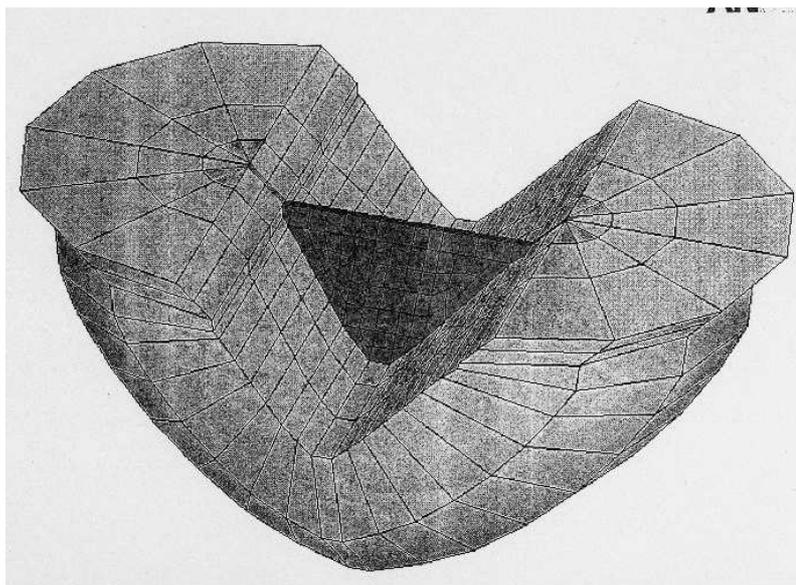


Fig. 1 Vista tridimensional del mayado de la presa y roca de fundación

Para el agua embalsada se consideraron las siguientes propiedades. La densidad del agua se supuso igual a $\rho = 1.0 \text{ ton/m}^3$. En cuanto a la velocidad de propagación de ondas de presión, esta tiene un valor $C = 1.438 \text{ m/seg}$.

4. CARACTERÍSTICAS DE LA SOLICITACIÓN SISMICA.

La solicitación sísmica a la que se ven sometidas obras de esta naturaleza corresponde a la actividad típica de la zona central de Chile. Esta actividad sísmica es producto de la interacción entre la placa de Nazca y la placa continental a través de un proceso de subducción a lo largo de la costa chilena.

Como excitación de análisis se han elegido las aceleraciones registradas en la zona de emplazamiento de la central hidroeléctrica Rapel para el terremoto que afectara la región el 3 de marzo de 1985. Este sismo tuvo una magnitud $M_S = 7.8$ en la escala de Richter y su epicentro está ubicado en las cercanías de la misma central Rapel. Estos registros corresponden a los obtenidos en Quintay, Las Tórtolas al pie de la Cordillera de los Andes, y Rapel. El estudio sísmico de la represa se hizo mediante un análisis espectral, para lo cual se calcularon los espectros de respuesta de las seis horizontales de los registros mencionados. Los espectros obtenidos se muestran en la figura 2, en tanto que el promedio de los espectros

se muestra en la figura 3. Para éste espectro promedio se obtuvo la respuesta estructural de la presa, calculando los desplazamientos y las tensiones.

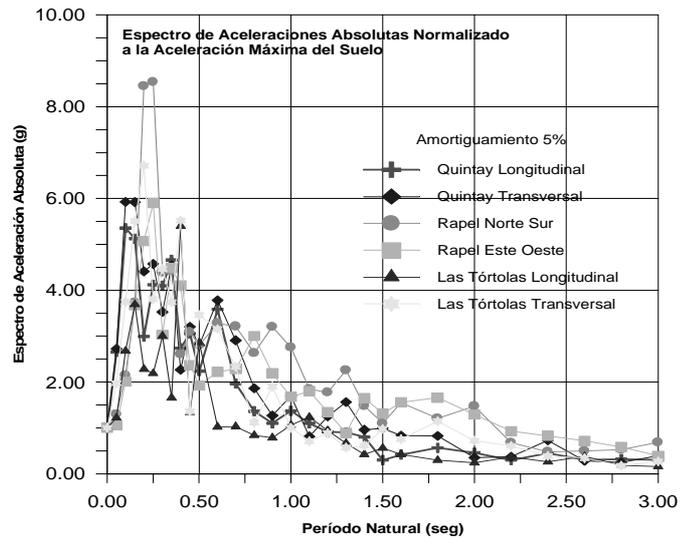


Fig. 2. Espectro de aceleraciones absolutas para las componentes de Quintay, Las Tórtolas y Rapel.

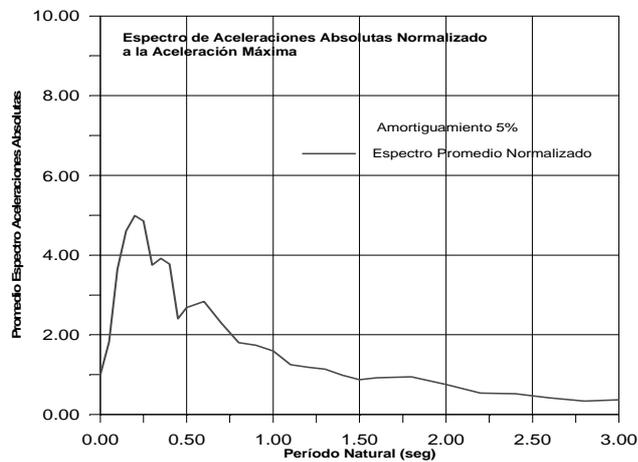


Fig. 3. Espectro de aceleraciones absolutas promedio normalizado

5. ANALISIS DE DEFORMACIONES

La figura 4 muestra las aceleraciones horizontales máximas y mínimas obtenidas en una línea vertical que pasa por el centro de la presa y en la cara de aguas arriba. En esta figura se

muestran las aceleraciones desde el coronamiento hasta la fundación. Como es lógico la mayor aceleración se encuentra en el coronamiento. Esto da una medida de las fuerzas de inercia por unidad de masa máximas que ocurren en la presa. Por su parte en la figura 5 se muestran las aceleraciones máximas y mínimas verticales a lo largo de la misma línea anterior. También las aceleraciones máximas ocurren en el coronamiento.

La figura 6 muestra los desplazamientos horizontales máximo en la cara de aguas arriba. También como cabe de esperar, el máximo se produce en el coronamiento y corresponde a 0.05 m. que en la zona superior corresponde a una desangulación por corte de aproximadamente 0.0025.

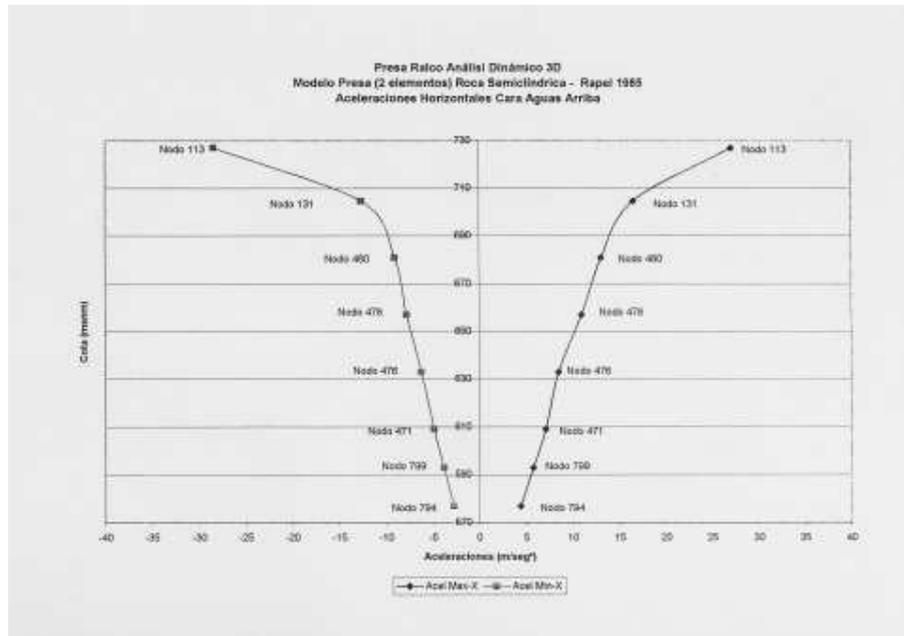


Fig. 4. Aceleraciones horizontales en la presa, cara de aguas arriba

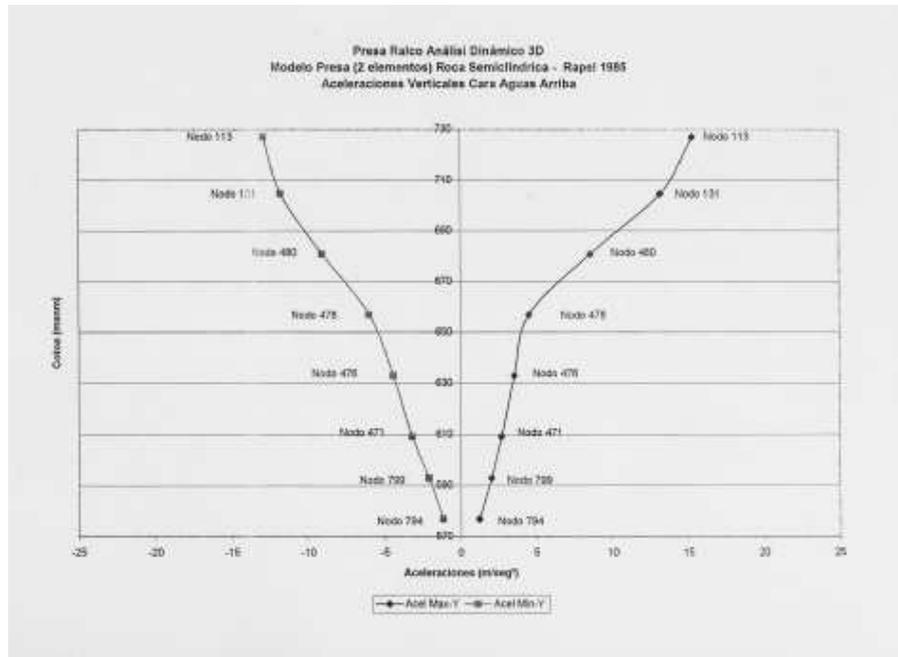


Fig. 5 Aceleraciones verticales en la presa cara de aguas arriba

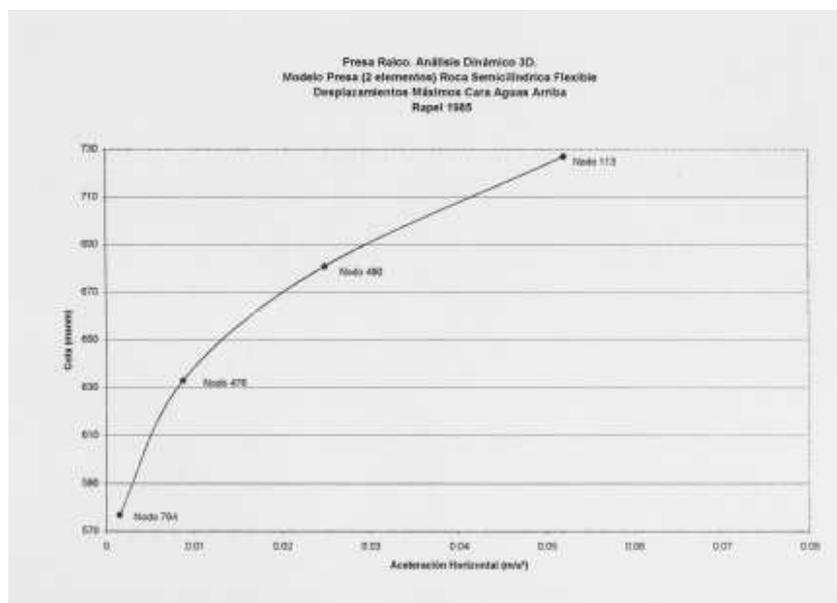


Fig. 6. Desplazamientos máximos cara de aguas arriba

6. ANALISIS DE TENSIONES EN LA PRESA

Los resultados del análisis sísmico de la presa de Ralco incluyeron la evaluación de las tensiones que experimenta el hormigón de la presa durante el sismo. En las figuras 7 a 12.

En la figura 7 se muestran las tensiones S_1 a la cota 722 del muro a lo largo de la presa. Se han graficado las tensiones máximas positivas y negativas teniéndose máximo del orden de 140 Ton/m^2 , en tanto que en la figura 8 se muestra para la misma cota la distribución longitudinal de tensiones S_2 horizontales máximas, teniéndose máximos del orden de: 60 Ton/m^2 tanto en una dirección como en la otra.

En la figura 9 se muestra la distribución de las tensiones horizontales S_1 para distintas alturas de la presa, incluyéndose información de máximos y mínimos. Por otra parte, en la figura 10 se muestra la distribución en altura de las tensiones verticales S_2 . De estas figuras se puede concluir que como era de esperar las tensiones en la base son mínimas y las tensiones máximas se producen a $1/6 h$ desde el coronamiento en el caso de las tensiones horizontales S_1 y a $2/6h$ desde el coronamiento para las tensiones verticales S_2 . Los valores máximos son del orden de 70 Ton/m^2 .

En las figuras 11 y 12 se puede apreciar las curvas de isotensión para el caso de la tensión S_1 y S_2 , las que se han graficado para la cara de aguas arriba. En estas figuras se puede tener una clara idea de la distribución de tensiones sísmicas de la presa.

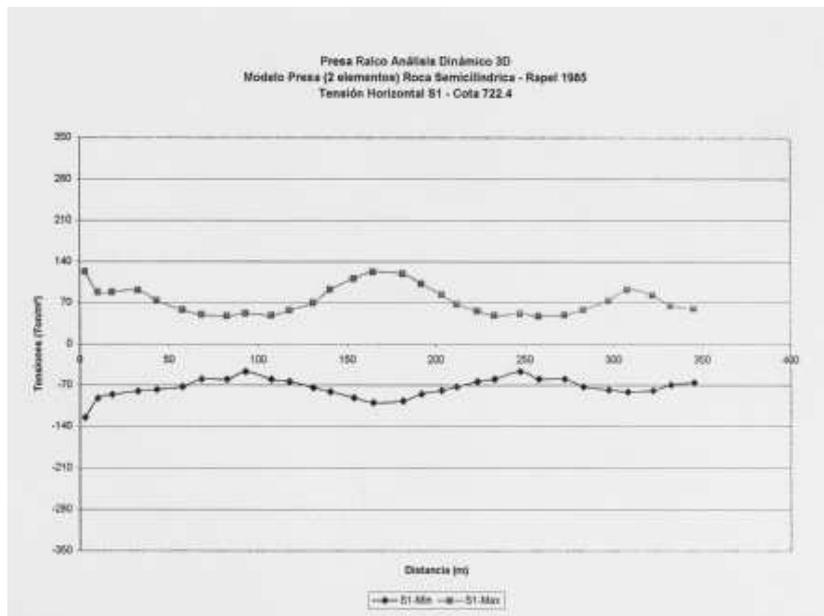


Fig. 7. Tensión horizontal S1

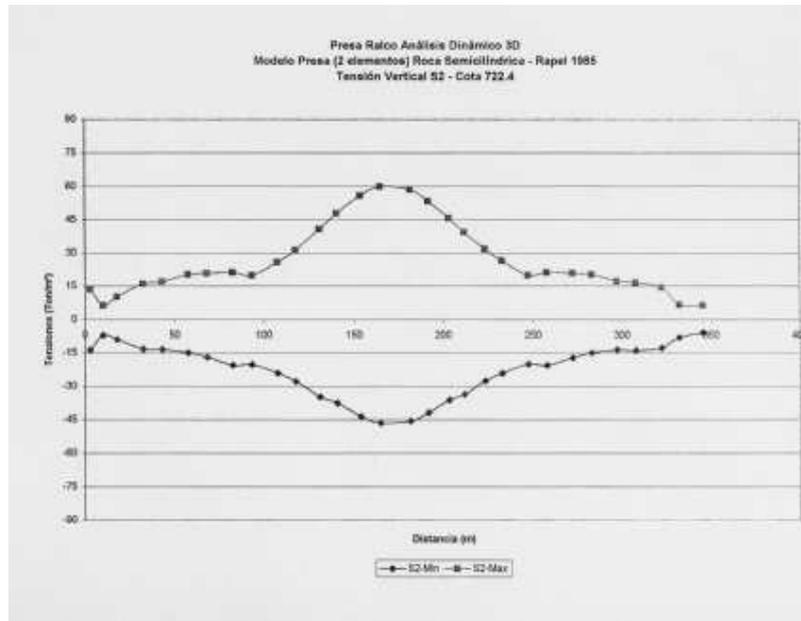


Fig. 8. Tensión vertical S2

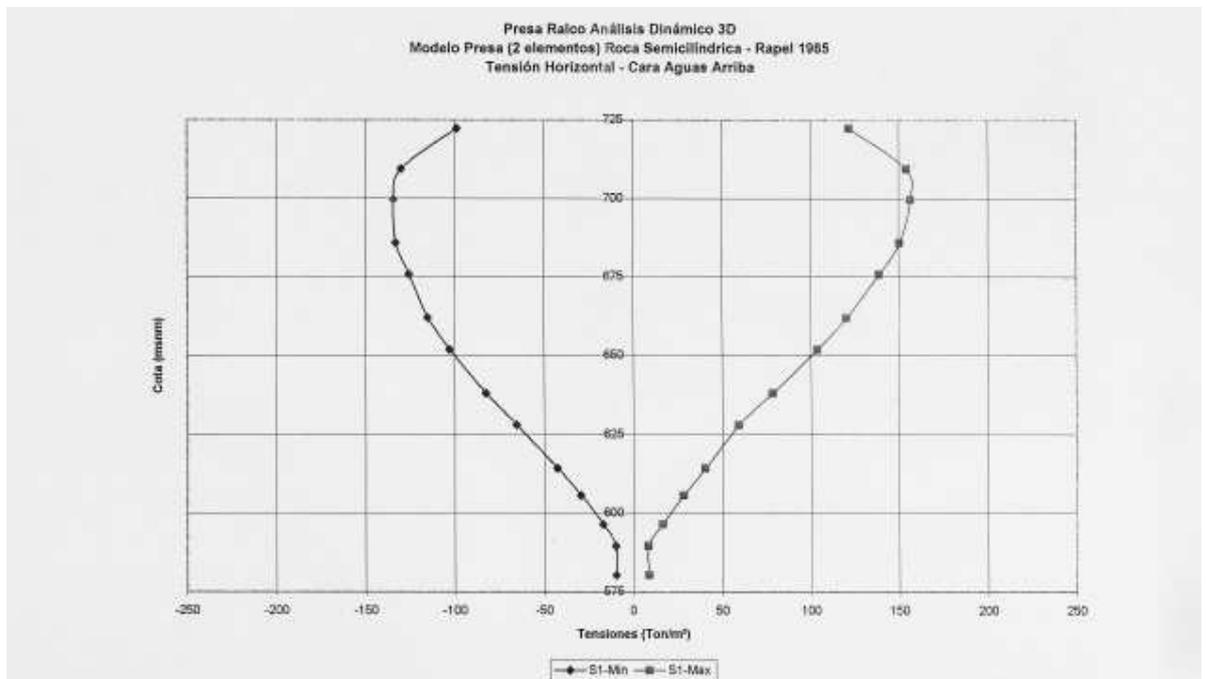


Fig. 11. Tensión horizontal cara de aguas arriba

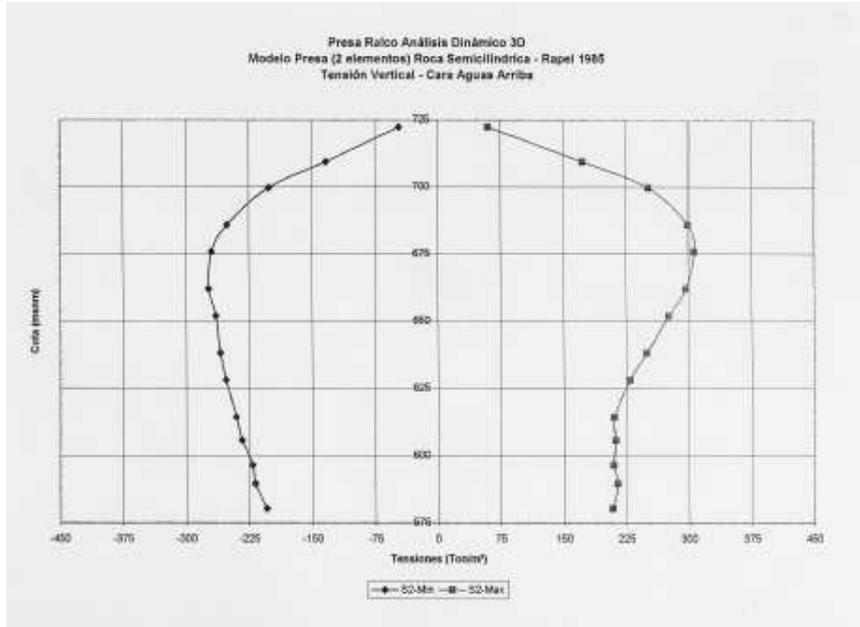


Fig. 12. Tensión vertical cara aguas arriba

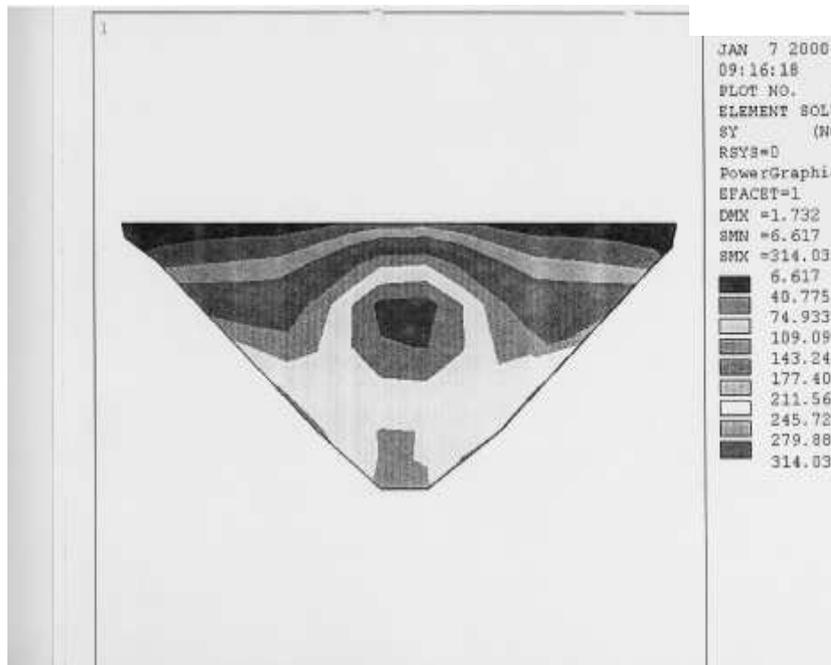


Fig. 13. Tensiones en cara de aguas arriba

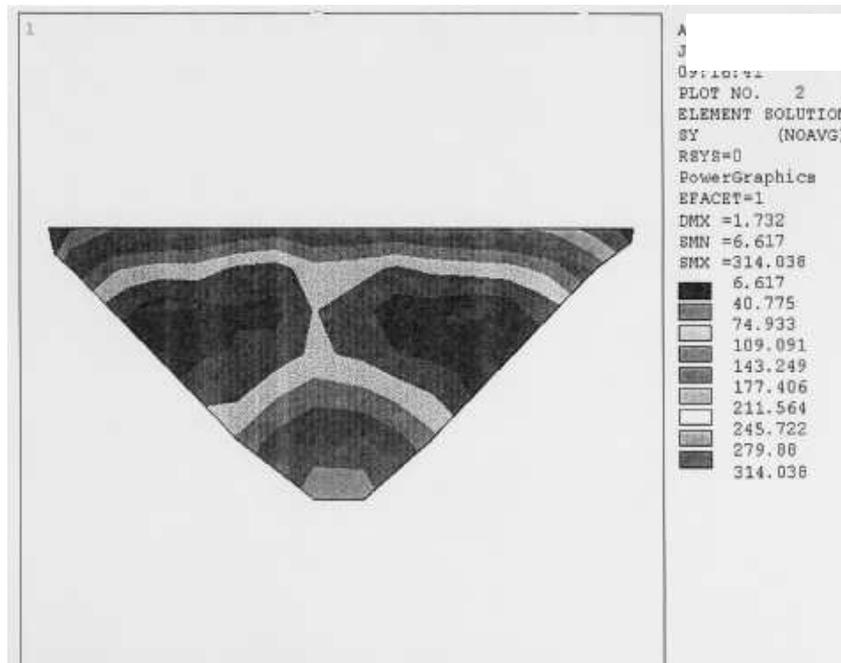


Fig. 14. Tensiones en cara de aguas abajo.

8. REFERENCIAS

1. Housner G., Seismic Behavior of Tanks Considering Fluid Interaction. Report 10/67 Caltech. 1967.
2. H.M.Koh, J.,K.,Kim, J-H, Park, “ Fluid-Structure Interaction of 3-D Rectangular Tanks by a Variationally Coupled BEM-FEM and Comparison with Test Results”, EESD Vol. 27, pp. 109-124, 1998.
3. Chacrabarti P., y Chopra, A., “Earthquake Analysis of Gravity Dams Including Hydrodynamic Interaction”, EESD, Vol. 2, pp. 143-160. 1973
4. Hall, J.,F., y Chopra, A., “Two Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams and Embankment Dams Including Hydrodynamic effects”, EESD Vol. 10, pp. 305-332, 1982.
5. Fenves G., y Chopra, A. “Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction and Reservoir Bottom Absorption,” EESD, Vol. 12, pp. 663-680, 1984.
6. Chopra, A., “Earthquake Behavior of Reservoir-Dam Systems,” JEMD, ASCE, Vol. 94, pp. 1475-1500, 1968.
7. Fok. K.,L. y Chopra, A. “Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams,” Report UCB/EERC-85/07, Earthquake Engineering Research Center, 1985.