

ANALISIS SISMICO DE LA PRESA DE PIEDRA DEL AGUILA
INCLUYENDO EL EFECTO DE LA FORMA DEL VALLE

José E. STUARDI †

Carlos A. PRATO ‡

Departamento de Estructuras, F.C.E.F. y N.
Universidad Nacional de Córdoba. C.C. 916
5000-Córdoba. Argentina.

RESUMEN

Se analiza la respuesta sísmica de la presa de Piedra del Aguila mediante un modelo que tiene en cuenta la configuración geométrica del valle, tanto en lo relativo al comportamiento mecánico de la presa como del embalse, y la interacción entre ambos. El objeto del trabajo es ilustrar la magnitud de las diferencias en la predicción de la respuesta en relación al análisis del mismo como problema plano. Los resultados numéricos ponen de manifiesto que si bien los distintos módulos o bloques de la presa son mecánicamente independientes ya que se encuentran separados por juntas de retracción, el agua embalsada los acopla frente a la acción sísmica dando origen a predicciones de desplazamientos y tensiones máximas que llegan a diferir en valores porcentuales apreciables respecto al análisis plano.

† Becario CONICET

‡ Profesor Titular

1. INTRODUCCION

El objeto del presente trabajo es evaluar la incidencia de la forma y características mecánicas del valle en las tensiones inducidas en la presa por la acción sísmica. A los efectos de poner en evidencia la influencia mencionada y teniendo en cuenta la forma constructiva de la presa, se adoptó para ella un modelo estructural simplificado. Este consiste en un conjunto de módulos independientes, supuestos empotrados en suelo rígido, cuya deformación se expresa en función de las formas modales de un perfil triangular.

El modelo es utilizado para efectuar un estudio comparativo de la interacción dinámica presa-embalse, siguiendo dos métodos diferentes para modelar el embalse:

a) se utiliza la representación analítica de Chopra [1] para un canal plano de longitud semi-infinita con fondo rígido y horizontal,

b) se plantea una solución numérica con elementos finitos tridimensionales, que modela además un canal indefinido cuya sección transversal tiene la forma del perfil de valle [2]. Este modelo permite incorporar el efecto de radiación de ondas a través de las laderas [3].

En ambos casos se obtiene la respuesta de los módulos de la presa determinando la impedancia dinámica del sistema presa-embalse, es decir, incluyendo el efecto de interacción dinámica, e incorporando la condición de radiación de ondas a través del fluido hacia el infinito.

El efecto de ondas superficiales en el fluido es despreciado.

2. MODELO DE ANALISIS

Las deformaciones de cada módulo independiente de la presa son expresadas a través de los modos y frecuencias naturales de un perfil triangular con embalse seco, dadas por Chopra [4], Fig.1. El primer modo ψ_1 y su período T_1 son aproximados por:

$$v_1(z) = 0.18 \frac{z}{H} + 0.82 \left(\frac{z}{H} \right)^2 \quad (1)$$

$$T_1 = 12.06 \frac{H}{\sqrt{E}} \quad (2)$$

donde: z= coordenada en altura

H= altura máxima del módulo [m]

E= módulo de Young [kN/m²]

El conjunto de módulos de la presa constituyen un sistema de grados de libertad desacoplados. Su acoplamiento se verifica a través de la impedancia dinámica del fluido, como se explica a continuación.

El embalse, (Fig. 2) es representado por una malla espacial de elementos hexaédricos isoparamétricos para la variable presión, que permite incorporar detalles de la forma de las laderas y del fondo del valle en la zona próxima a la presa. A partir de cierta distancia desde el paramento, la malla de elementos finitos finaliza en un plano (Fig.3), cuyas propiedades dinámicas representan la capacidad de radiación de energía hacia el exterior, a través de la hipótesis de embalse indefinido.

3. CARACTERISTICAS DE LA PRESA DE PIEDRA DEL AGUILA

La presa de Piedra del Aguila, es una presa de gravedad construída en hormigón, ubicada en Rincón Chico, Neuquén. El dique consiste en cuarenta y dos módulos independientes, separados por juntas de retracción, con una altura máxima sobre el nivel de fundación de 173 m y 820 m de longitud total del coronamiento.

Se presentan conclusiones de la respuesta dinámica del módulo de mayor altura y de otro de altura media (110 m), ambos remarcados en Fig.1.

La excitación de piso utilizada fue el sismo IDIA, con aceleración máxima 0.2 g y periodo predominante 0.3 s, actuando en la dirección horizontal aguas arriba-aguas abajo del sistema presa-embalse.

4. ACOPLAMIENTO DE LAS ECUACIONES PRESA-EMBALSE

Debido al acoplamiento introducido por el embalse, se escriben las ecuaciones de movimiento de los módulos en forma conjunta, si bien estos son totalmente independientes desde el punto de vista estructural. En el dominio de la frecuencia y para excitación de base unitaria es:

$$\left[\hat{K}^* - \omega^2 M^* \right] q(\omega) = -m^* - f_p^*(q) \quad (3)$$

sistema de N grados de libertad, con $N = m \cdot j$, donde:

m : número de módulos de la presa

j : número de modos considerados en cada módulo.

\hat{K}^* : matriz de rigidez generalizada diagonal compuesta por m submatrices de dimensión j .

Los elementos de la diagonal de \hat{K}^* son:

$$(\omega_n^2)^j_m \cdot (m^*)^j_m \left[(1-2\zeta^2) + i 2\zeta \sqrt{1-\zeta^2} \right]$$

$(\omega_n^2)^j_m$: frecuencia natural j -ésima del módulo m

$(m^*)^j_m$: masa generalizada modo j , módulo m

ζ : relación de amortiguamiento, asumido lineal histerético.

ω : frecuencia excitatriz

M^* : matriz de masa diagonal con elementos $(m^*)^j_m$

$q(\omega)$: vector de desplazamientos modales en la dirección normal al paramento de la presa.

m^* : vector que contiene la traza de M^*

$f_p^*(q)$: vector de fuerzas hidrodinámicas generalizadas debidas al movimiento $q(\omega)$ del paramento de la presa.

Las presiones hidrodinámicas generalizadas sobre el paramento pueden ser expresadas como la suma de dos términos, uno debido al movimiento de cuerpo rígido de la presa (f_{p0}^*), y otro debido al movimiento relativo del paramento respecto al primero.

Considerando linealidad entre presiones y aceleraciones y llamando f_{p1}^* ($i=1,2,\dots,N$), al vector de presiones generalizadas debidas a las aceleraciones del modo j en módulo m , se expresa:

$$f_p^* = f_{p0}^* + F_p^* q \quad (4)$$

donde: $F_p^* = [f_{p1}^*, f_{p2}^*, \dots, f_{pN}^*]$

Debido a que para excitación de base unitaria es:

$$\ddot{q}(\omega) = -\omega^2 q(\omega) \quad (5)$$

reemplazando,

$$\left[\hat{K}^* - \omega^2 (M^* + F_p^*) \right] q(\omega) = -m^* - f_{p0}^* \quad (6)$$

(6) es la ecuación acoplada del sistema presa-embalse en coordenadas generalizadas de la presa seca, que permite analizar las modificaciones que la presencia del embalse introduce en las ecuaciones de movimiento de la presa seca:

- a) aumento de la masa generalizada debido a la parte $\text{Re}(F_p^*)$
- b) modificación del amortiguamiento provocado por la parte $\text{Im}(F_p^*)$
- c) existencia de f_{p0}^* en el término de cargas.

F_p^* es una matriz compleja, llena y no simétrica responsable del acoplamiento entre módulos ya referido, debido a la impedancia dinámica del fluido.

5. CALCULO DE PRESIONES HIDRODINAMICAS

La formulación del elemento finito fluido con la presión hidrodinámica como incógnita para resolver la ecuación de la onda en el dominio de la frecuencia, (ecuación de Helmholtz), es de rutina [5]. La discretización de la región irregular adyacente al paramento de la presa lleva a una ec. de la forma:

$$\left[K - \frac{\omega^2}{c^2} M + i \omega C \right] \underline{p}(x,y,z,\omega) = a \quad (7)$$

donde: $\underline{p}(x,y,z,\omega)$ es un vector de presiones nodales desconocidas con un grado de libertad por cada nudo por debajo de la superficie libre (donde la presión es considerada nula).

a) es el vector de aceleraciones nodales, calculado

mediante la integración de las aceleraciones normales de la frontera sólido-fluido. Posee valores no nulos sólo para aquellos nudos que pertenecen a dicha frontera (paramento de la presa y laderas del valle).

K, M, C son matrices simétricas análogas a las de rigidez, masa y amortiguamiento en el análisis del sólido. Sin embargo, es interesante notar que C no es diagonalizable con los modos del problema de valores propios asociado a K y M; ya que por estar asociada a la irradiación de energía a través de las laderas del embalse, posee valores no nulos sólo para los nudos pertenecientes a las fronteras del dominio, consideradas absorbentes.

Condiciones de borde en el plano transmisor

La introducción de las condiciones de borde sobre el plano transmisor merece una consideración especial. Ya que la geometría del valle impone terminar la discretización a una cierta distancia desde el paramento de la presa, el plano debe modelarse de forma de permitir la irradiación de energía hacia el exterior, [6].

Considerando la formación de un canal en la dirección del eje del cauce del río, de sección constante coincidente con la del plano transmisor, es posible obtener la ley de variación de las presiones en los nudos que a él pertenecen. La solución analítica de la distribución de presiones en la dirección longitudinal es conocida:

$$p_y(y, \omega) = e^{-\chi_n y} \quad (8)$$

donde:

$$\chi_n = \sqrt{\lambda_n^2 - \frac{\omega^2}{C^2}} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (9)$$

λ_n^2 : valores propios del plano transmisor

Para el plano transmisor ($y=0$) se cumple:

$$\tilde{p}(x, 0, z, \omega) = \tilde{x}^{-1} \tilde{a}^T a_p \quad (10)$$

Φ : matriz modal del plano transmisor
 X : matriz diagonal con término enésimo = χ_n
 a_p : vector de aceleraciones nodales normales al plano

La ec. (10) que relaciona presiones - aceleraciones normales en los nudos del plano transmisor, provee la condición de borde buscada para la ec. (7).

Condición de radiación en las laderas del valle

La presencia de sedimentos sobre las laderas del embalse o la flexibilidad de la roca es tenida en cuenta mediante un modelo unidimensional simplificado de transmisión de ondas de presión, en dirección normal a la superficie de frontera sólido-fluido [6].

Las características globales del medio, conformados por una capa de sedimento y roca flexible, son aproximadas mediante la determinación de un coeficiente k_r , dado por el cociente entre la amplitud de la onda reflejada a la incidente, que resulta:

$$k_r = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad \alpha = \frac{\rho}{\rho_r} \frac{C}{C_r} \quad (11)$$

ρ : densidad del fluido

C : velocidad de propagación del sonido en el medio fluido,

el subíndice r refiere a las propiedades de la roca de la ladera.

Modelo plano del embalse - comparación con modelo 3D.

Si se analiza la solución analítica de Chopra [1], para canal plano de fondo horizontal rígido y extensión indefinida:

$$p(x, z, \omega) = \frac{2\rho}{H} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_0^H f(z) \phi_n(z) dz}{\chi_n} \phi_n(z) e^{-\chi_n y} \quad (12)$$

$f(z)$: deformada del paramento de la presa.

$\lambda_n C$; ϕ_n : frecuencias y modos naturales de oscilación de una

columna vertical de fluido cuando se le permite solamente desplazamiento vertical.

$$\lambda_n = (2n-1) \frac{\pi}{2H} \quad (13)$$

$$\phi_n = \cos \lambda_n z \quad (14)$$

Los términos $\lambda_n C$ representan las frecuencias naturales del dominio y las contribuciones a las presiones de los modos asociados son reales por debajo de las frecuencias naturales, tienden a infinito sobre ellas y son imaginarias para frecuencias mayores, indicando esto último radiación de energía.

Idénticas conclusiones pueden aplicarse a la versión discretizada (10) en donde los modos y frecuencias naturales son ahora las del plano transmisor. Para $C \neq 0$ los valores y vectores propios quedan definidos en álgebra compleja y son dependientes de la frecuencia de excitación. Esto implica que la irradiación de energía comienza a partir de la primera frecuencia discreta no nula y que cada modo tiene asociado una parte de irradiación que se agrega a la ya existente debido al carácter de infinitud del embalse [6].

Se grafican en Fig.4 los modos 1ro. y 2do. de presiones de la sección transversal en parte real e imaginaria, para un coeficiente de reflexión de ondas de 100% y 70% en una frecuencia media comprendida entre la nula y la 1ra. natural. Los gráficos corresponden a dos secciones verticales y dos horizontales indicadas sobre el plano transmisor con líneas continuas.

Para reflexión total de las laderas de fondo, se grafican en Fig.5, la distribución en el plano vertical de las presiones calculadas según método modal, debidas al movimiento del paramento como cuerpo rígido en el módulo más alto (sombreado), para las frecuencias indicadas. Se pueden observar en estas formas, especialmente las contribuciones del 1er. y 3er. modos de la sección transversal correspondientes en el dominio plano a ec. (14), para $n=1$ y $n=2$, respectivamente.

6. CALCULO DE FUERZAS HIDRODINAMICAS

A fin de resolver el sistema (6) es necesario calcular:

- a) f_{po} proveniente de la integración de las presiones generadas por el movimiento de cuerpo rígido de todos los módulos considerados en forma monolítica.
- b) $(f_{p m})^j$ vector de fuerzas nodales debidas a las presiones generadas en todo el paramento por el movimiento del módulo m en el modo j .

Efecto de la forma del valle

Ya que la formulación plana equivale a considerar un embalse de fondo plano e indefinido en la dirección perpendicular, y a fin de observar la modificación en el término de cargas f_{po} debido a la forma discretizada del valle próximo a la presa, se graficaron en Fig. 6 el valor absoluto de las fuerzas de las presiones debidas a presa monolítica totalmente rígida, para ambas formulaciones. La integración de las presiones se realizó sobre el paramento del módulo más alto y del módulo medio de la presa.

Los picos de la curva en la formulación plana, se ubican en frecuencias dependientes de la altura del módulo según (13); y los del método modal se corresponden con las frecuencias naturales de la sección plana, indicadas en Fig. 5. Entre ambas curvas se observa una importante diferencia en un rango de frecuencia de sumo interés en el cálculo sísmico.

La distinta importancia relativa de los picos asociada a las contribuciones de los modos del plano transmisor, variable en el módulo alto y medio, se explica si se observan las formas modales sobre las secciones analizadas.

Importancia de la radiación de piso

Los valores absolutos de las fuerzas de presiones sobre el paramento de un módulo, obtenidas a partir de la distribución de presiones debidas a dique monolíticamente rígido, y calculados con coeficiente de reflexión del 100%, 70%, 0%, se muestran en Fig. 7.

Queda en evidencia el efecto del amortiguamiento asociado a la radiación de energía que se manifiesta en un suavizado de las curvas y un aumento de la frecuencia de ocurrencia del máximo, tanto en el módulo máximo como en el medio.

En Fig. 8 se muestran los valores absolutos de las funciones de transferencia de ambas secciones para los coeficientes de reflexión ya citados con consideración del fenómeno de interacción fluido-estructura. La 1ra. frecuencia natural del módulo de altura máxima y media correspondieron a 18 y 39 rad/s respectivamente. Si bien para el coeficiente de 70% de reflexión se observa una disminución del pico de la función de transferencia, este efecto no es observable para la misma curva con coeficiente 0% .

7. RESPUESTA SISMICA DE LA PRESA

Se obtuvieron los histogramas de desplazamientos del coronamiento para los modelos de 1 y 2 grados de libertad por módulo, Fig. 9. Las curvas se han trazado en forma comparativa para la formulación plana vs. método modal con 70% de reflexión en las paredes de fondo, incluyendo interacción fluido-estructura.

En el módulo máximo se observan las diferencias más notables. El máximo desplazamiento calculado con formulación plana es de 3.6 cm. y con el método modal 70% reflexión de 4.8 cm., conduciendo en este caso el cálculo simplificado, a una subestimación de los desplazamientos máximos.

En el módulo medio se observa una sobreestimación del cálculo plano del orden del 23% con respecto al cálculo realizado según método modal-70%, como también una semejanza más pronunciada entre ambas curvas.

Los resultados mencionados se encuentran resumidos en Tabla I. Se nota escasa diferencia en los desplazamientos máximos al considerar 1 ó 2 grados de libertad por módulo.

Las diferencias en los histogramas de aceleraciones de Fig. 10 son también pronunciados para el caso del módulo alto, indicando que el error en la estimación de las tensiones puede ser considerable.

8. CONCLUSIONES

Con un modelo simplificado de la Presa de Piedra del Aguila, y considerando sólo 1 ó 2 formas modales y frecuencias naturales de los módulos provistas por fórmulas experimentales, se muestran las diferencias en las respuestas de calculo sísmico, considerando una formulación plana desacoplada para el medio fluido vs. el análisis tridimensional. El efecto del acoplamiento proveniente del fluido introduce una marcada modificación en las cargas hidrodinámicas sobre el paramento de la presa. Con respecto a la influencia de la absorción de ondas en las paredes de fondo, los resultados muestran que mas allá de introducir un simple amortiguamiento, esta se halla vinculada a una profunda modificación de la forma de irradiación de energía del sistema, dada por la parte imaginaria de los modos naturales del plano transmisor considerado, que se suma a la ya proveniente del carácter de infinitud del dominio fluido. Las funciones de transferencia graficadas muestran no sólo una importante modificación en el valor absoluto sino también un corrimiento en frecuencia de la ocurrencia de los máximos, dependiendo finalmente la respuesta fuertemente de la componente en frecuencia del sismo de cálculo. Además se ha mostrado que, no siempre es esperable una disminución en la amplificación de la respuesta sísmica con el aumento de la proporción de energía irradiada por el embalse.

Para el sismo de cálculo, los histogramas de desplazamientos para la formulación plana y el método modal muestran que si bien el primero resulta conservativo para los módulos de altura media, no sucede lo mismo para los modulos más altos de la presa, conduciendo en este caso el cálculo simplificado plano a subestimaciones de los desplazamientos del orden del 33%.

Idénticas observaciones pueden ser hechas con respecto a las aceleraciones máximas obtenidas. Aunque el modelo estructural es pobre a efectos de un cálculo tensional, demuestra la importancia de un cálculo tridimensional, acoplado las ecuaciones con consideración de la forma del valle, especialmente en el cálculo de los módulos de mayor altura, donde la respuesta de cálculo del modelo plano es notoriamente inferior a la del modelo 3D.

9. REFERENCIAS

[1] Chopra A.K. "Earthquake behaviour of reservoir-dam systems", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, EM6-December 1968, pag. 1975.

[2] Ka-Lun-Fok - Chopra A. K. "Earthquake Analysis of Arch Dams including Dam-Water Interaction, reservoir boundary absorption and foundation flexibility". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, 155-184 (1986).

[3] Hall J. F.-Chopra A. K. "Two Dimensional Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams including hydrodynamic effects". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol.10, 305-332 (1982).

[4] Chopra, A. K. "Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dams". *Journal of the Structural Division*. June 1978, Vol. 104 Lo. ST6.

[5] Zienkiewicz O. C. *The Finite Element Method*, Mc. Graw Hill, 1977, pag.527.

[6] Stuardi J., Prato C. "Efecto de la configuración del valle en las presiones hidrodinámicas sobre presas bajo acciones sísmicas". *Mecánica Computacional*, AMCA. Vol 7-8, 1989.

10. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es parte de un proyecto que cuenta con el apoyo del Consejo de Investigaciones de Argentina (CONICET), y de la Provincia de Córdoba (CONICOR), a través de subsidios.

DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS DEL CORONAMIENTO [cm.] SISMO IDIA
1 GLD

MODULO MAXIMO

| F. PLANA | | METODO MODAL | | | |
|----------|--------|--------------|--------|-----------|--------|
| | | REFL. 100% | | REFL. 70% | |
| s/int. | c/int. | s/int. | c/int. | s/int. | c/int. |
| 6.5 | 3.8 | 5.3 | 4.7 | 7.3 | 4.8 |
| -5.9 | -2.3 | -6.9 | -4.9 | -7.4 | -4.8 |

MODULO MEDIO

| F. PLANA | | METODO MODAL | | | |
|----------|--------|--------------|--------|-----------|--------|
| | | REFL. 100% | | REFL. 70% | |
| s/int. | c/int. | s/int. | c/int. | s/int. | c/int. |
| -0.54 | -0.59 | -0.48 | -0.50 | -0.51 | -0.48 |
| 0.45 | 0.53 | 0.38 | 0.51 | 0.40 | 0.49 |

DESPLAZAMIENTOS DEL CORONAMIENTO [cm.] SISMO IDIA
2 GLD

MODULO MAXIMO

| F. PLANA | |
|----------|--------|
| s/int. | c/int. |
| 6.4 | 3.6 |
| -5.9 | -2.2 |

| METODO MODAL (REFL.100%) | |
|--------------------------|--------|
| s/int. | c/int. |
| 6.7 | 4.7 |
| -6.8 | -4.9 |

MODULO MEDIO

| F. PLANA | |
|----------|--------|
| s/int. | c/int. |
| -0.52 | -0.57 |
| 0.43 | 0.54 |

| METODO MODAL (REFL.100%) | |
|--------------------------|--------|
| s/int. | c/int. |
| -0.46 | -0.47 |
| 0.38 | 0.50 |

TABLA I

MODELO ESTRUCTURAL

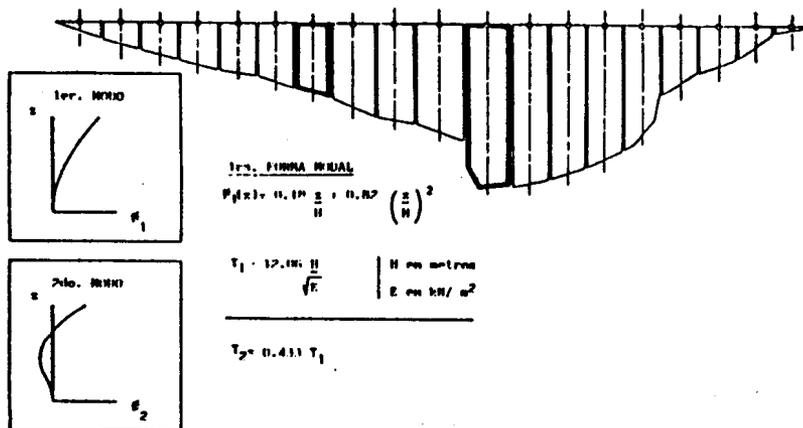


FIG. 1

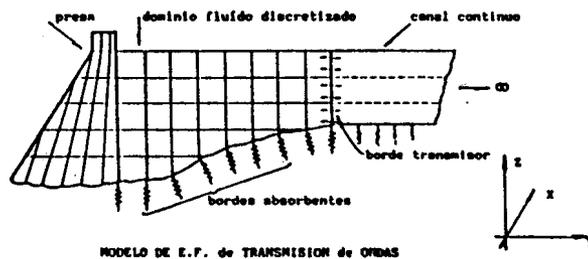


FIG. 2

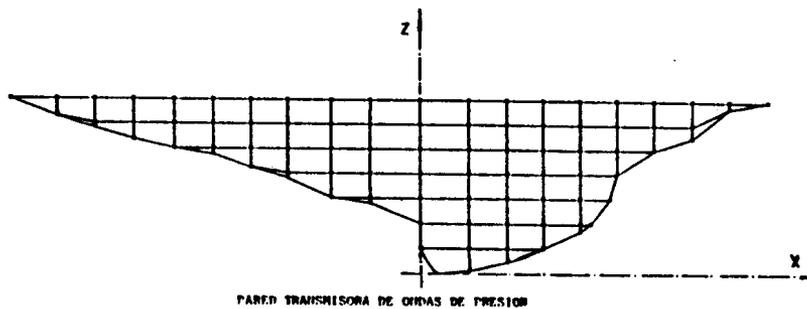
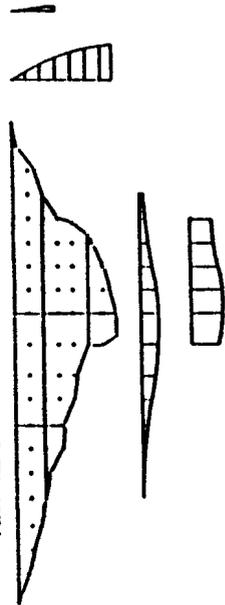
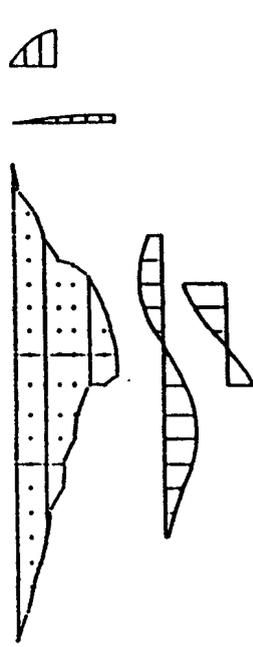


FIG. 3

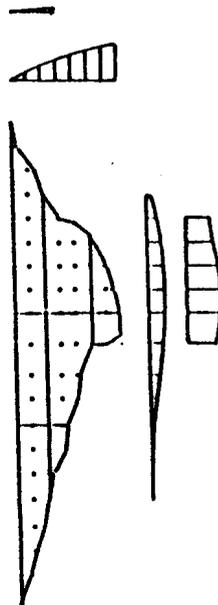
FORMA DEL 1er. MODO. PARTE REAL. REF.L.= 100%



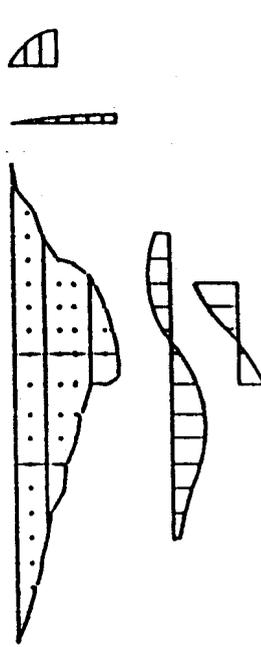
FORMA DEL 2do. MODO. PARTE REAL. REF.L.= 100%



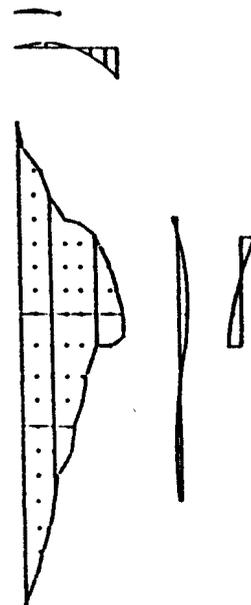
FORMA DEL 1er. MODO. PARTE REAL. REF.L.= 70% -FREC.= 8.4 rad./seg.



FORMA DEL 2do. MODO. PARTE REAL. REF.L.= 70% -FREC.= 8.4 rad./seg.



FORMA DEL 1er. MODO. PARTE IMAGINARIA. REF.L.= 70% -FREC.= 8.4 rad./seg.



FORMA DEL 2do. MODO. PARTE IMAGINARIA. REF.L.= 70% -FREC.= 8.4 rad./seg.

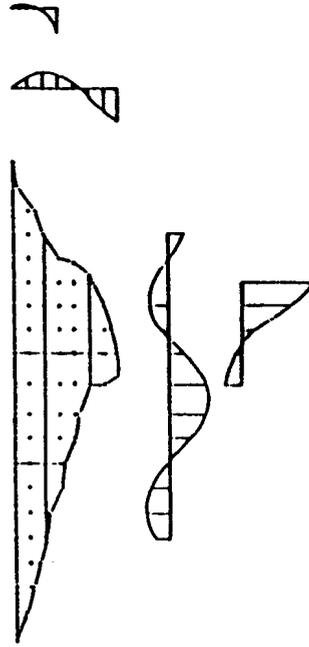
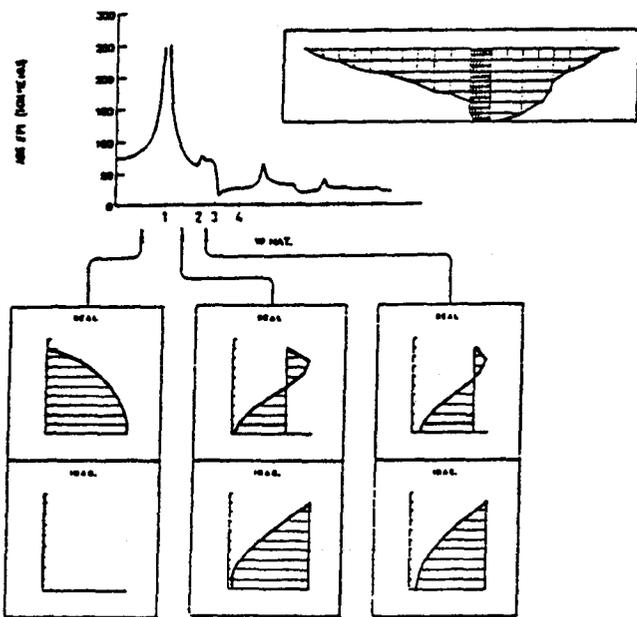


FIG. 4

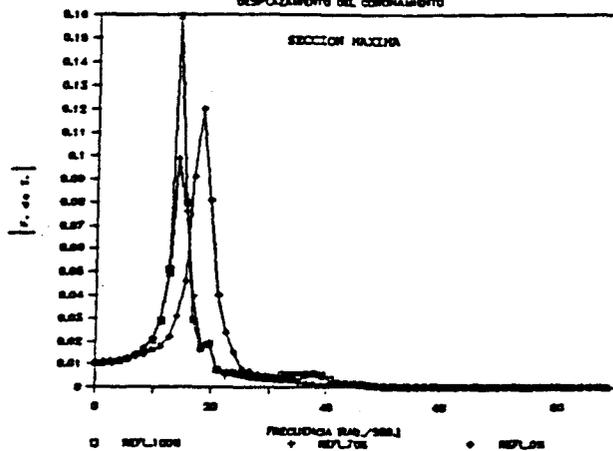
FUERZAS DE PRESIONES DIQUE RIGIDO
SECCION MAX.



DISTRIBUCION DE PRESIONES EN ALTURA -SECCION MAXIMA-

FIG. 5

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
DESPLAZAMIENTO DEL CORONAMIENTO



FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
DESPLAZAMIENTO DEL CORONAMIENTO

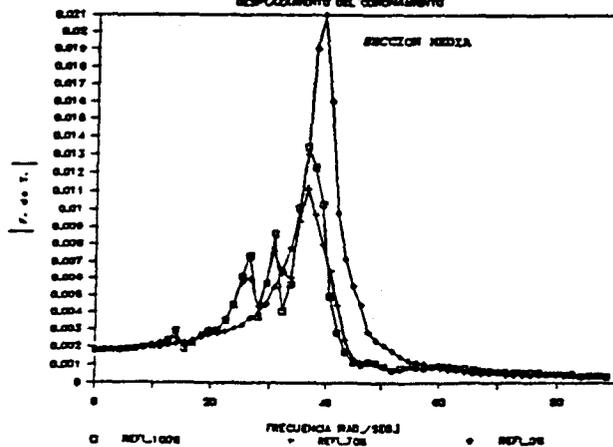
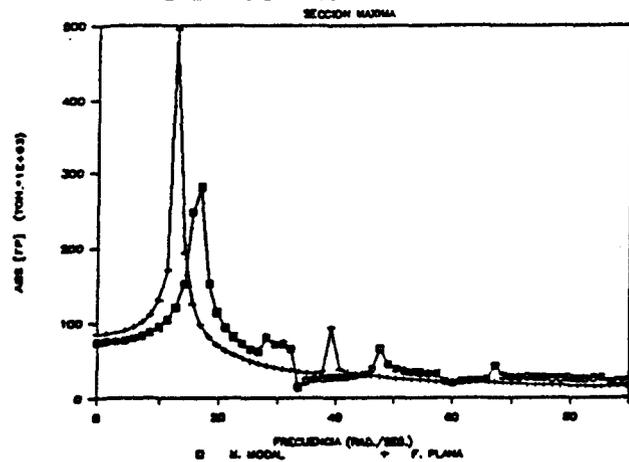
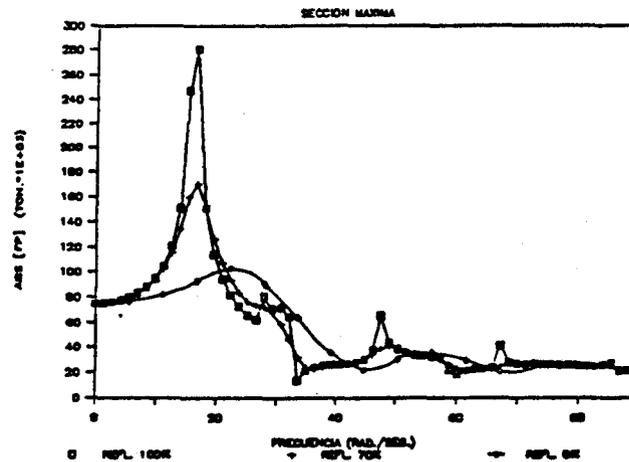


FIG. 8

FUERZAS DE PRESIONES DIQUE RIGIDO



FUERZAS DE PRESIONES DIQUE RIGIDO



FUERZAS DE PRESIONES DIQUE RIGIDO

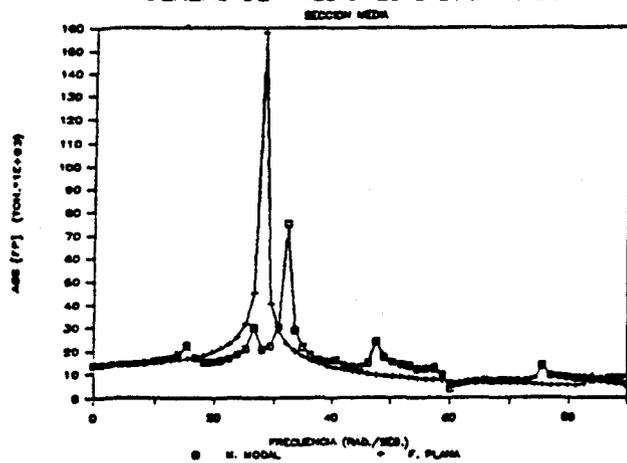


FIG. 6

FUERZAS DE PRESIONES DIQUE RIGIDO

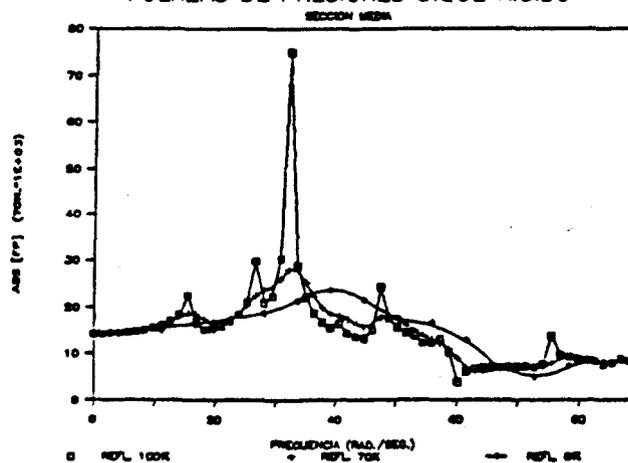


FIG. 7

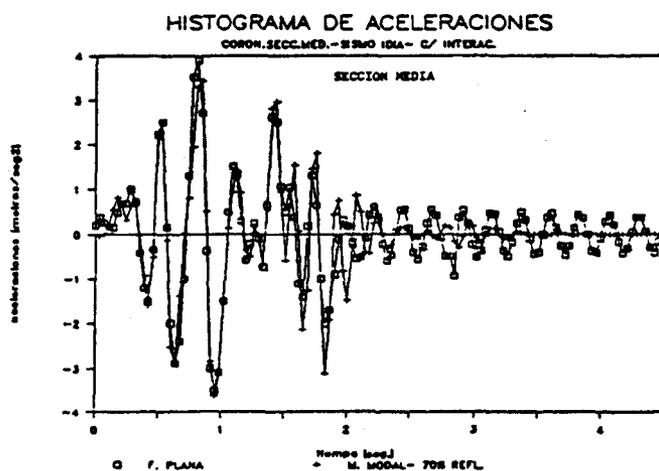
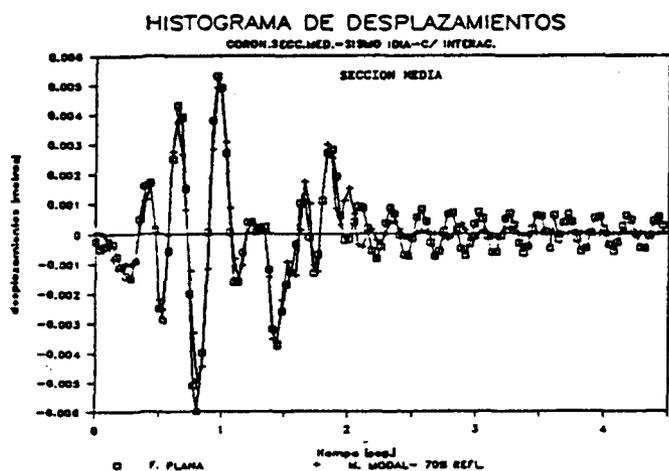
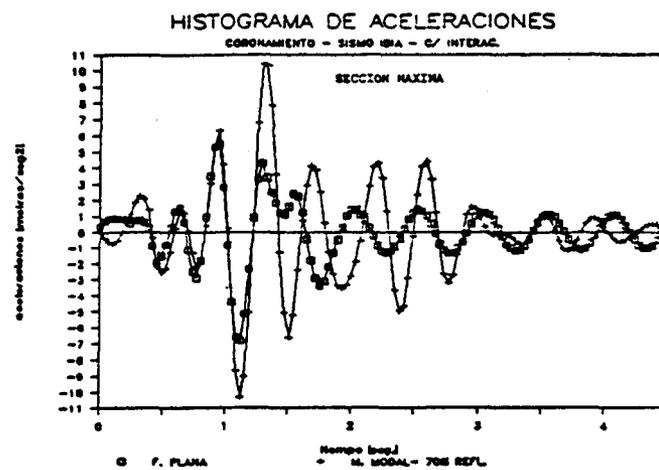
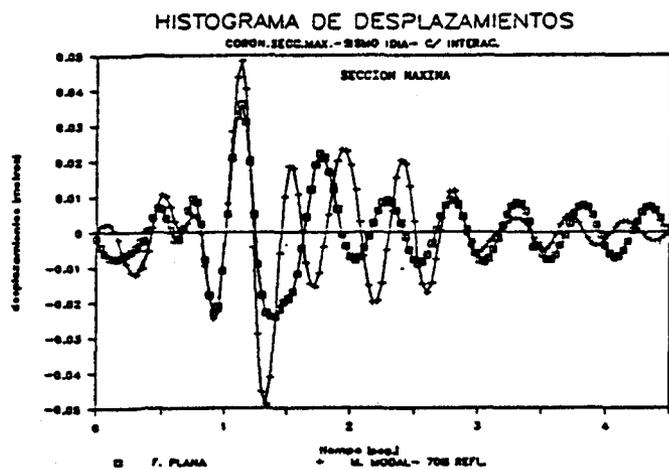


FIG. 9

FIG. 10