

APLICACION DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS
EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL DIQUE "EL CAJON"

Carlos A. Bartó
Centro de Cálculo. Universidad Nac. de Córdoba
Raúl A. del Campo
Dirección Provincial de Hidráulica. Cba.
Luis E. Toselli
Dirección Provincial de Hidráulica. Cba.

RESUMEN

El presente reporte es acerca de la aplicación del Método de Elementos Finitos en el diseño estructural del dique en arco de doble curvatura "el Cajón" (Córdoba, Argentina). Para lo cual se ha usado el programa computacional ADAP, en el análisis estático y dinámico.

Se muestran los resultados de la utilización de diversas mallas de elementos finitos y de distintas condiciones de contorno, aplicadas a diferentes diseños geométricos.

ABSTRACT

The present report is about an application of the Finite Element Method to the structural design of the arch dam "El Cajón" (Córdoba, Argentina). For which the computer program ADAP has been used, for static and dynamic analysis.

The results of the use of a set of several finite element meshes and boundary conditions, applied to different geometrical designs, are shown.

DIQUE "EL CAJON"

La obra a ejecutarse consiste de una presa en arco de doble curvatura de 38m de altura, de 66m de desarrollo del coronamiento y un volúmen de embalse de 12hm³, localizada en las cercanías de la localidad de Capilla del Monte, departamento, Punilla de la Provincia de Córdoba, sobre el Río Dolores (módulo 0.5m³/seg).

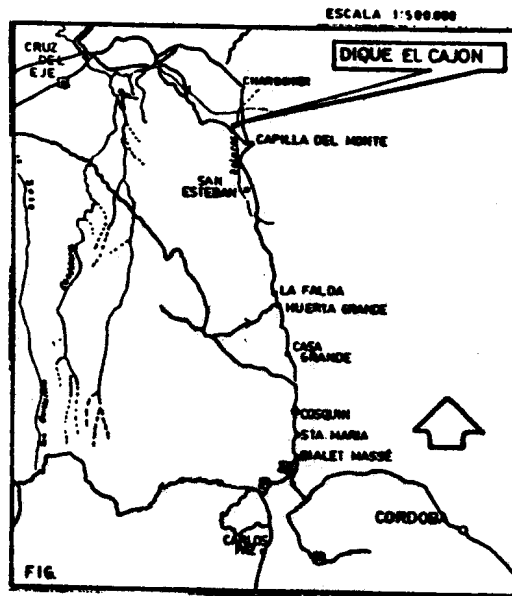


Fig 1 Plano de ubicación

La elección del sitio de ubicación así como del tipo estructural estaban condicionadas por un proyecto anterior, que también tuvo principio de ejecución y que la Dirección Prov. de Hidráulica deseaba mantener.

La revisión de dicho proyecto con la finalidad de proseguir su ejecución concluye con la elaboración de un nuevo proyecto.

En ambos casos se ha utilizado la técnica de Elementos Finitos para modelar el comportamiento estructural, habiéndose empleado para ello el programa computacional ADAP [1], dadas sus facilidades de ingreso de datos y las exigencias de terminación del proyecto en un plazo breve.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA ADAP

El programa ADAP es extensamente descrito en [1] no obstante es necesario indicar algunas de sus particularidades para relacionar apropiadamente los resultados.

Desde el punto de vista geométrico el dique en arco de doble curvatura, es esencialmente una cáscara gruesa apoyada sobre un macizo de roca que es un sólido tridimensional. Tanto la geometría como la malla de elementos finitos es generada automáticamente a partir de la defini-

ción por niveles de arcos triarticulados e interpolación cúbica. Se pueden considerar geometrías simétricas con eje en la clave del arco y condiciones de apoyo simétricas y antisimétricas. Las mallas generadas toman fajas horizontales y verticales que permiten referir los resultados al método de Trial Load.

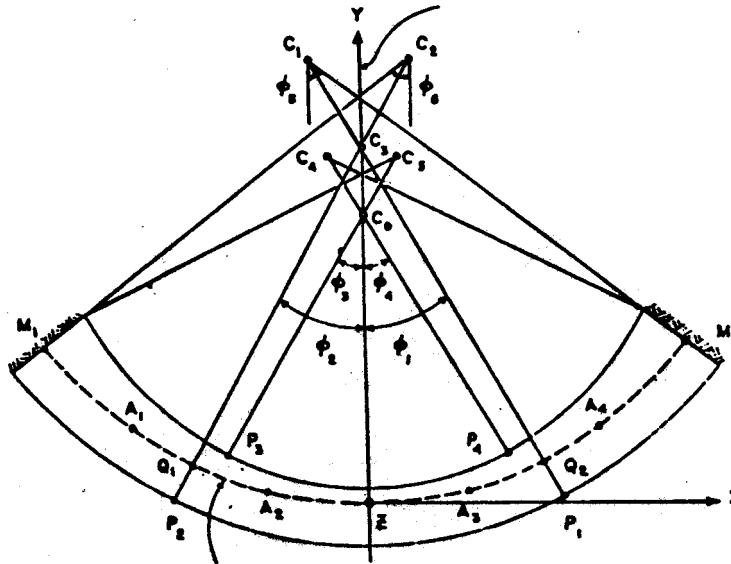


Fig. 2 Sección horizontal típica

El macizo de fundación es generado automáticamente como un prisma que acompaña al perímetro del arco, pudiendo elegirse diferentes densidades de elementos. Ver figura 3.

Para discretizar tanto el arco como el macizo de fundación se ha utilizado un elemento hexaédrico isoparamétrico de ocho nudos. Es un elemento de sólido tridimensional que ha sufrido sucesivas mejoras e incluye modos de deformación incompatibles. Permite la utilización de materiales ortotrópicos. Esta facilidad ha permitido modelar una junta perimetral y la masa agregada de agua para simular la presión dinámica bajo la acción sísmica.

El programa permite el análisis estático considerando el peso propio del dique, la acción de la presión hidrostática y los cambios de temperatura referidos a una de base (sellado de juntas).

El análisis sísmico es posible hacerlo mediante el método de superposición modal tanto por la vía de la integración directa, paso a paso de las ecuaciones de movimiento cuanto por el uso de espectros de aceleraciones de reglamentos. Por razones de disponibilidad de acelerogramas adecuados así como por la seguridad estructural que significa el uso de envolventes de espectros de aceleraciones, se han utilizado los espectros del reglamento INPRES-CIRSOC 103 [2].

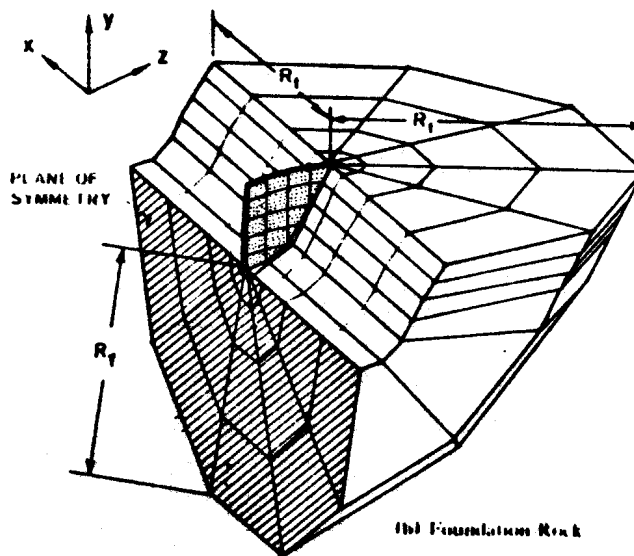


Fig. 3 Discretización de la presa

PROYECTO ANTERIOR

Dadas las condiciones del sitio elegido para su implantación, que topográficamente es una garganta estrecha perfilada en un macizo de roca granítica, generaron la decisión de construir un dique en arco de doble curvatura con junta perimetral y zapata de apoyo continua.

Dicho proyecto tuvo principio de ejecución pero la obra debió suspenderse, estando esto motivado en alguna medida por problemas en el replanteo de fundaciones, quedando ejecutadas las excavaciones en ambas márgenes y construido el sòcalo inferior de fundación.

Este condicionamiento produce la decisión institucional de ajustar el proyecto anterior a las nuevas condiciones geométricas de contorno y también de profundizar la excavación para alcanzar roca más sana.

La verificación del proyecto anterior se realizó utilizando para ello una malla de densidad similar a la empleada en el estudio de la presa Morrow Point citada en el manual de uso del programa ADAP, de cuatro niveles de elementos finitos, cuyos resultados de tensiones se resumen en la TABLA N° 1 para el caso de carga hidrostática.

Debido a la falta de continuidad de los resultados se utilizó una malla de siete niveles cuyos resultados se transcriben en la TABLA N° 2 para una superposición de efectos de carga hidrostática, peso propio y temperatura de verano.

En ninguno de los dos casos se consideró la junta perimetral, esto es, se consideró al dique como empotrado en la fundación.

La consideración de la junta horizontal en cota 915m y un aumento en la densidad de la malla generó el diseño de la figura 4 (malla de 9 niveles A), cuyos resultados se han graficado de acuerdo al siguiente orden:

- fig. 6 :Tensiones de ménsula adyacente a ménsula central.
- fig. 7 :Tensiones de arco adyacente a ménsula central.
- fig. 8 :Tensiones de arco adyacente al coronamiento.
- fig. 9 :Tensiones de arco adyacente al apoyo.
- fig.10 :Desplazamientos en ménsula central.
- fig.11 :Desplazamientos en el coronamiento.
- fig.12 :Desplazamientos en apoyos.

Las distorsiones observadas cerca de los apoyos se atribuyeron a una malla muy deformada (debido a la generación automática). Para superar este problema se cambió a un diseño más uniforme (malla de 9 niveles B) de la figura 5, que además considera los elementos inferiores como pertenecientes a la roca, para modelar el apoyo inferior recto y visualizar el efecto de arco. Esta configuración mejoró los resultados de tensiones de arco en apoyos.

Una de las finalidades que se perseguía con esta última malla era la de modelar la junta perimetral, pero no se realizó ya que simultáneamente se procedió a modelar directamente un nuevo proyecto ajustado a la nueva geometría, ya que se consideró no conveniente mantener el anterior.

NUEVO PROYECTO

La geometría del nuevo proyecto en planta y corte por la ménsula central puede verse en las figuras 13 y 14.

En la figura 15 se ha graficado la malla B de 9 niveles en la que se ha tratado de modelar la semijunta inferior con un elemento delgado con un módulo elástico bajo en la dirección normal a la misma (caso 104) pero se comprobó que los resultados (TABLA 3) seguían presentando discontinuidades. No obstante la introducción de la junta (TABLA 4) mejoró las tensiones de tracción, que en general están asociadas en su máxima intensidad a las bajas temperaturas de invierno (caso 108).

Para evitar las dificultades señaladas se realizó una malla de 9 niveles pero procurando mantener su regularidad tanto en su desarrollo vertical como horizontal (ver figura 16).

Al analizar un caso con bordes empotrados (TABLA 5) se comprobó que las diferencias entre el estado tensional (caso 201) con y sin junta perimetral no difería mayormente, se tomó la decisión de construir la nueva presa con bordes empotrados debido a la facilidad constructiva. Para ello se debió profundizar la fundación y eliminar el apoyo ya construido, ya que además se verificó que su estado de deterioro era bastante considerable.

Los resultados se han consignado en la TABLA N° 6 para el caso 210 para cargas hidrostáticas, peso propio y temperatura.

TABLA Nº 3 CASO 104

ESTADO DE CARGA:		Mod. Elast. Hº: 200.000 Kg/cm²							
Peso Pr. + Pres. Hidros. + Temp. var.		Mod. Elast. Roca: 118.000 Kg/cm²							
COTA	CLAVE				APOYO				
	Mensula		Arco		Mensula		Arco		
	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	
945.00	+ 0.7	- 2.2	- 5.7	+ 1.2	- 4.7	- 6.2	- 6.7	- 4.4	
936.50	- 2.1	- 7.9	- 10.8	- 13.5	- 3.1	- 11.8	- 2.1	- 6.7	
929.00	- 1.3	- 10.6	- 12.2	- 17.2	+ 0.3	- 12.6	- 1.7	- 14.0	
922.75	- 3.1	- 12.6	- 11.4	- 20.1	+ 1.6	- 15.9	- 0.8	- 21.2	
918.50	- 1.7	- 10.9	- 8.7	- 15.3	+ 4.7	- 17.3	+ 5.4	- 28.6	
916.50	- 3.9	- 11.0	- 7.4	- 17.0	+ 4.6	- 21.8	+ 12.2	- 34.3	
913.75	- 3.9	- 11.5	- 3.6	- 9.3	+ 3.6	- 12.4	+ 8.8	- 25.3	
910.00	+ 6.1	- 2.4	+ 1.4	- 22.4	+ 5.1	- 2.4	+ 1.4	- 22.4	

TABLA Nº 4 CASO 108

ESTADO DE CARGA:		Mod. Elast. Hº: 200.000 Kg/cm²							
Peso Pr. + Pres. Hidros. + Temp. var.		Mod. Elast. Roca: 118.000 Kg/cm²							
COTA	CLAVE				APOYO				
	Mensula		Arco		Mensula		Arco		
	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	
945.00	+ 0.9	- 2.0	- 5.8	+ 1.6	- 0.4	- 6.4	- 1.0	- 7.1	
936.50	- 2.9	- 7.8	- 10.9	- 18.2	- 0.8	- 11.7	- 0.5	- 9.0	
929.00	- 0.8	- 10.2	- 11.9	- 18.8	- 0.0	- 12.5	- 0.4	- 16.4	
922.75	- 2.5	- 13.1	- 11.1	- 20.3	- 0.0	- 16.0	- 0.6	- 22.8	
918.50	+ 1.0	- 10.6	- 8.8	- 16.7	+ 0.1	- 17.4	- 0.3	- 29.8	
916.50	- 13.4	- 9.5	- 0.7	- 17.6	+ 6.0	- 22.5	+ 0.2	- 36.6	
913.75	+ 1.1	- 10.7	- 4.7	- 10.0	+ 5.0	- 13.3	+ 6.5	- 27.3	
910.00	+ 3.3	- 3.7	+ 2.9	- 18.1	+ 3.5	- 3.7	+ 0.2	- 18.1	

TABLA N° 5 CASO 201

ESTADO DE CARGA:		Mod. Elast. H°: 200.000 Kg/cm ²							
Peso Pr. + Pres. Hidros. + Temp. var.		Mod. Elast. Roca: 115.000 Kg/cm ²							
COTA	CLAVE				APOYO				
	Mensula		Arco		Mensula		Arco		
	AAr.	AAb.	AAr.	AAb.	AAr.	AAb.	AAr.	AAb.	
945.00	- 1.4	- 3.5	- 2.8	- 2.1	- 0.5	- 6.2	- 8.5	- 4.4	
936.50	- 1.5	- 8.4	- 8.5	-15.8	- 2.8	-11.8	- 1.4	- 7.2	
929.00	- 1.5	-11.8	-11.4	-20.7	+ 0.5	-18.4	- 0.5	-18.1	
922.75	- 3.5	-12.1	+12.1	-20.8	+ 2.0	-16.3	+ 0.5	-21.6	
918.50	- 3.6	- 9.9	-10.7	-17.5	+ 3.6	-16.1	+ 2.8	-25.8	
916.50	- 4.5	- 8.7	- 7.5	-15.3	+ 3.7	-18.0	+ 3.6	-26.8	
913.75	- 2.3	-10.3	- 6.0	- 6.8	+ 4.2	-12.2	+ 5.3	-27.6	
910.00	+ 3.6	- 8.0	+ 2.4	-16.7	+ 4.5	- 7.4	+ 4.2	-21.8	

TABLA N° 6 CASO 210

ESTADO DE CARGA:		Mod. Elast. H°: 200.000 Kg/cm ²							
Peso Pr. + Pres. Hidros. + Temp. var.		Mod. Elast. Roca: 115.000 Kg/cm ²							
COTA	CLAVE				APOYO				
	Mensula		Arco		Mensula		Arco		
	AAr.	AAb.	AAr.	AAb.	AAr.	AAb.	AAr.	AAb.	
945.25	+ 1.9	- 3.7	- 2.6	- 2.0	- 4.8	- 5.9	- 9.7	- 3.8	
937.25	- 1.8	- 7.9	- 8.7	-15.7	- 5.3	-11.5	- 2.1	- 5.7	
930.25	- 1.1	-10.3	-12.2	-21.7	+ 0.1	-12.5	- 0.6	-18.4	
924.25	- 3.9	-11.9	-13.5	-22.8	+ 1.4	-15.8	- 0.2	-19.7	
919.25	- 2.9	-10.2	-11.7	-20.2	+ 3.8	-16.1	+ 2.1	-24.6	
915.25	- 4.2	- 8.6	- 8.7	-12.0	+ 4.0	-13.6	+ 3.5	-26.3	
912.00	+ 1.1	-13.4	- 2.7	- 3.2	+ 5.3	- 9.5	+ 6.2	-28.4	
909.50	+ 4.7	- 6.3	+ 4.2	-21.2	+ 4.7	- 6.3	+ 4.2	-21.2	

FIG 4 -MALLA A DE 9 NIVELES
CASO 60

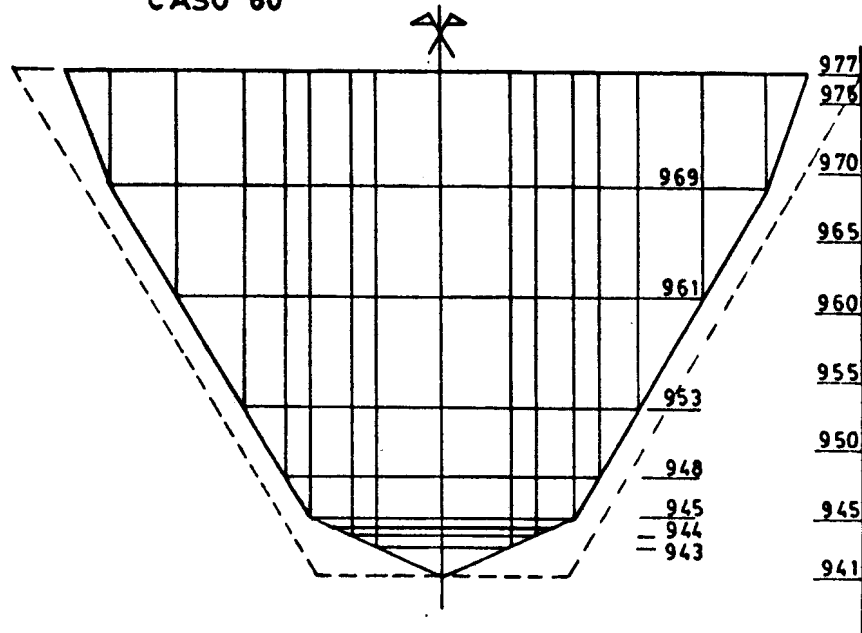
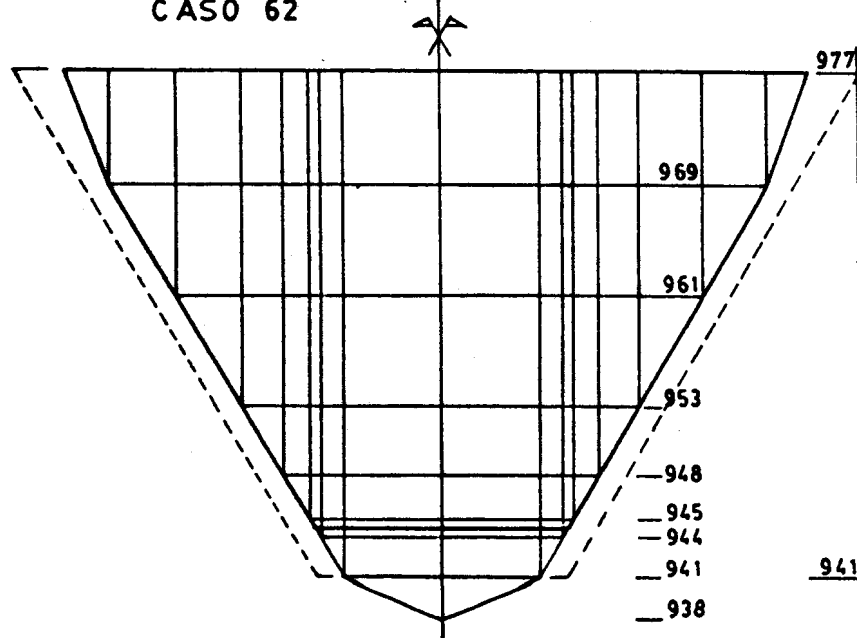


FIG 5 -MALLA B DE 9 NIVELES
CASO 62



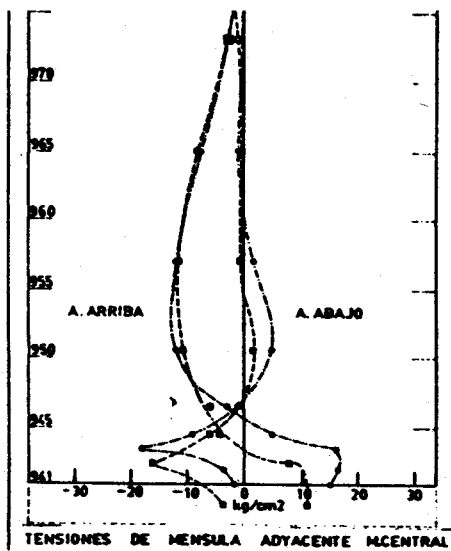
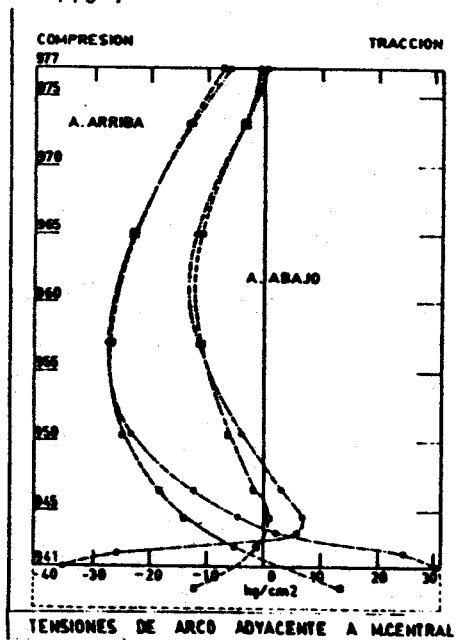


FIG 7



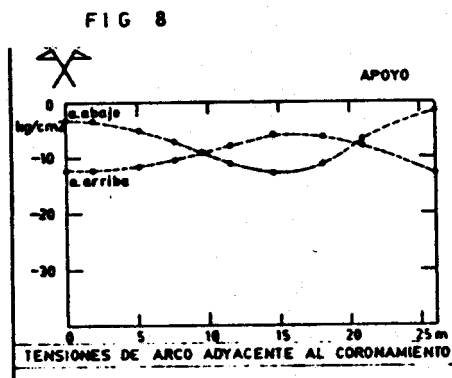
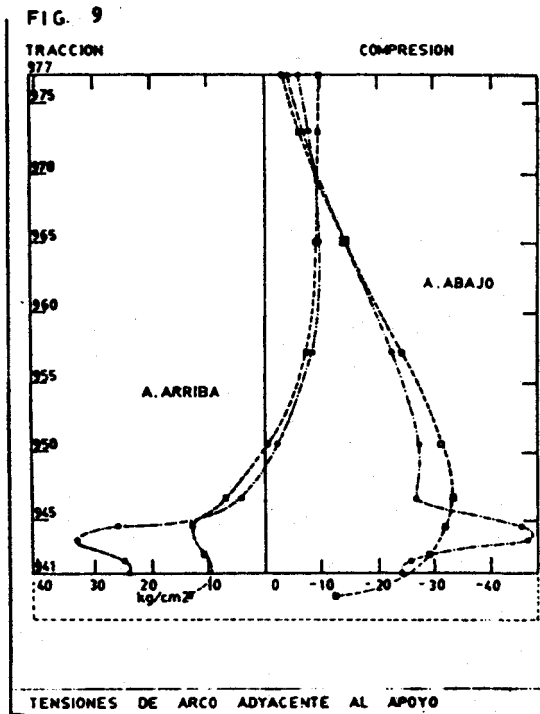


FIG 10

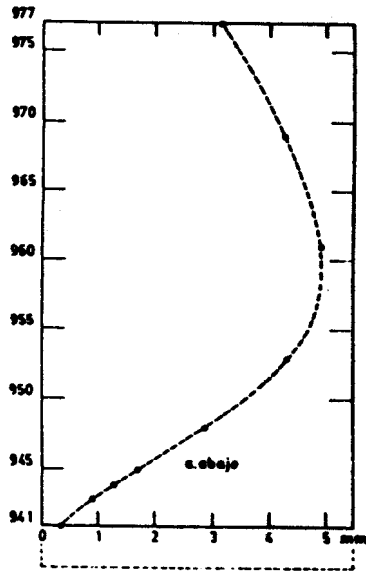
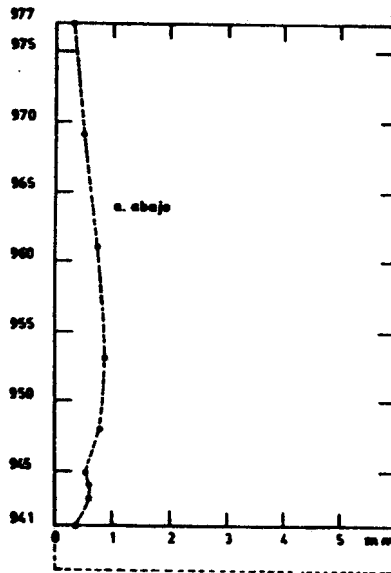


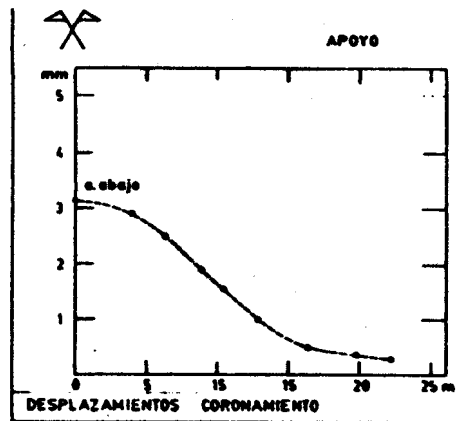
FIG 12



DESPLAZAMIENTOS MENSULA CENTRAL

DESPLAZAMIENTOS DE APOYOS

FIG 11



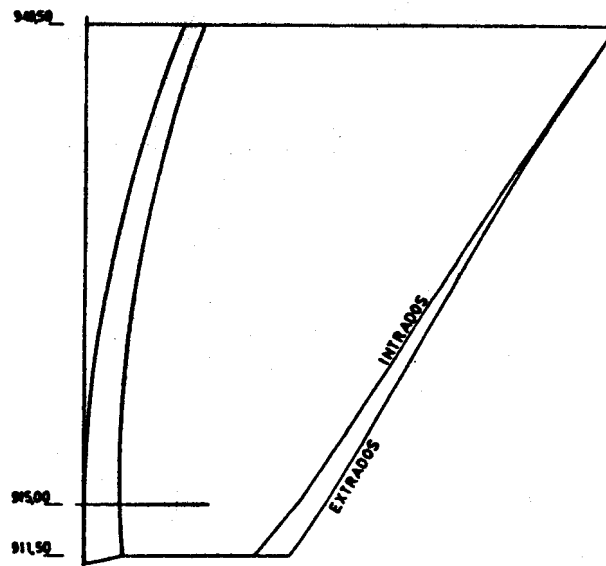
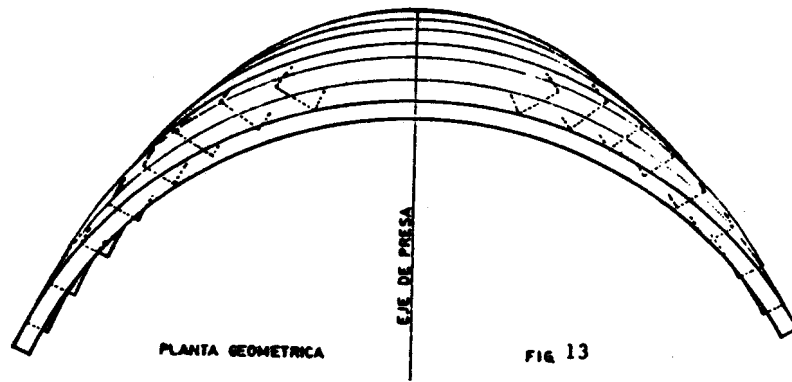


FIG. 15 - MALLA B DE 9 NIVELES
CASOS 104/108

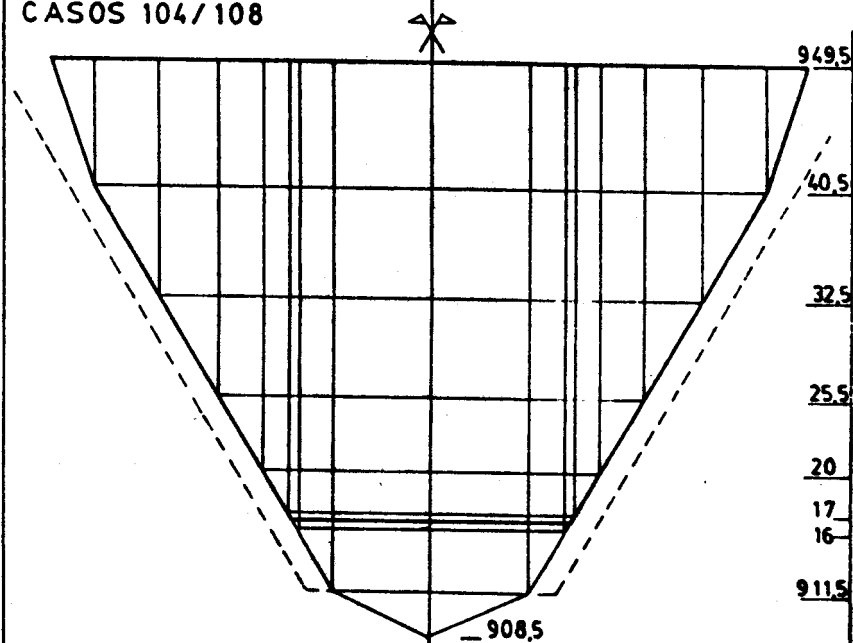
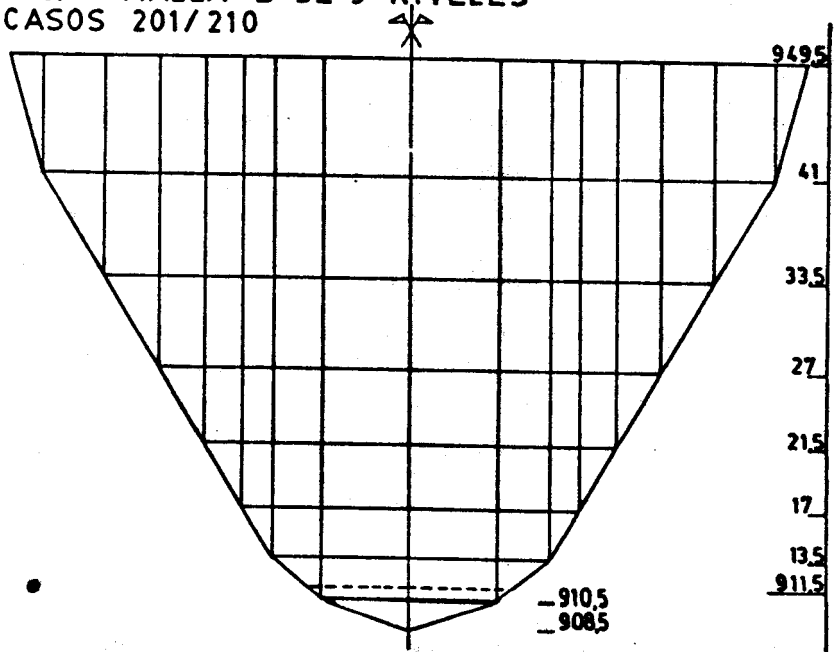


FIG. 16 - MALLA B DE 9 NIVELES
CASOS 201/210



ANALISIS SISMICO

Para dicho análisis se ha recurrido al método de descomposición espectral. Considerándose una superposición media cuadrática de los efectos de cada modo considerado de acuerdo a lo establecido en INPRES-CIRSOC 103 [2].

Para determinar las ordenadas del espectro de aceleraciones se consideró como Zona Sísmica I, factor de riesgo 1.4 (Grupo A0), suelo Tipo Ia, amortiguamiento 5% del crítico y no se consideró ninguna reducción por ductilidad ya que se supone que la presa deberá permanecer en estado elástico para la máxima sollicitación.

Previo al estudio de la repuesta se calcularon frecuencias y modos propios de vibración de la presa vacía, para determinar el efecto de la presión del agua durante el movimiento siguiendo el concepto de masa agregada [3].

Es interesante señalar que se obtuvo un período máximo de 0.128seg y que la relación H/T entre la altura de la presa con dicho período resultó de 290, de lo que se dedujo una presión promedio para un sismo en la dirección del río de 2.69t/m² (7% de la presión hidrostática máxima). Se modificaron los pesos específicos de los elementos del paramento mojado ya que en el programa no se pueden definir masas concentradas.

En la figura 17 se han graficado los primeros modos, tanto simétricos como asimétricos, que se han tenido en cuenta, para sismo según la dirección del río los primeros y sismo transversal los segundos.

Los resultados de tensiones se han sintetizado en la TABLAS N^o7 y N^o8, donde se deben considerar como positivas y negativas simultáneamente.

CONSIDERACIONES FINALES

Sibien la necesidad de ejecutar la obra ha condicionado los métodos de análisis empleados, la consideración de efectos no lineales en relación a la fisuración del hormigón, provocada por las tensiones de tracción desarrolladas por el efecto combinado de la presión hidrostática y las bajas temperaturas de invierno, serán tenidos en cuenta posteriormente. Con relación al desarrollo de tensiones de tracción se han considerado cambios de forma en el pie de la presa (mayor curvatura) que no se han consignado en el presente informe.

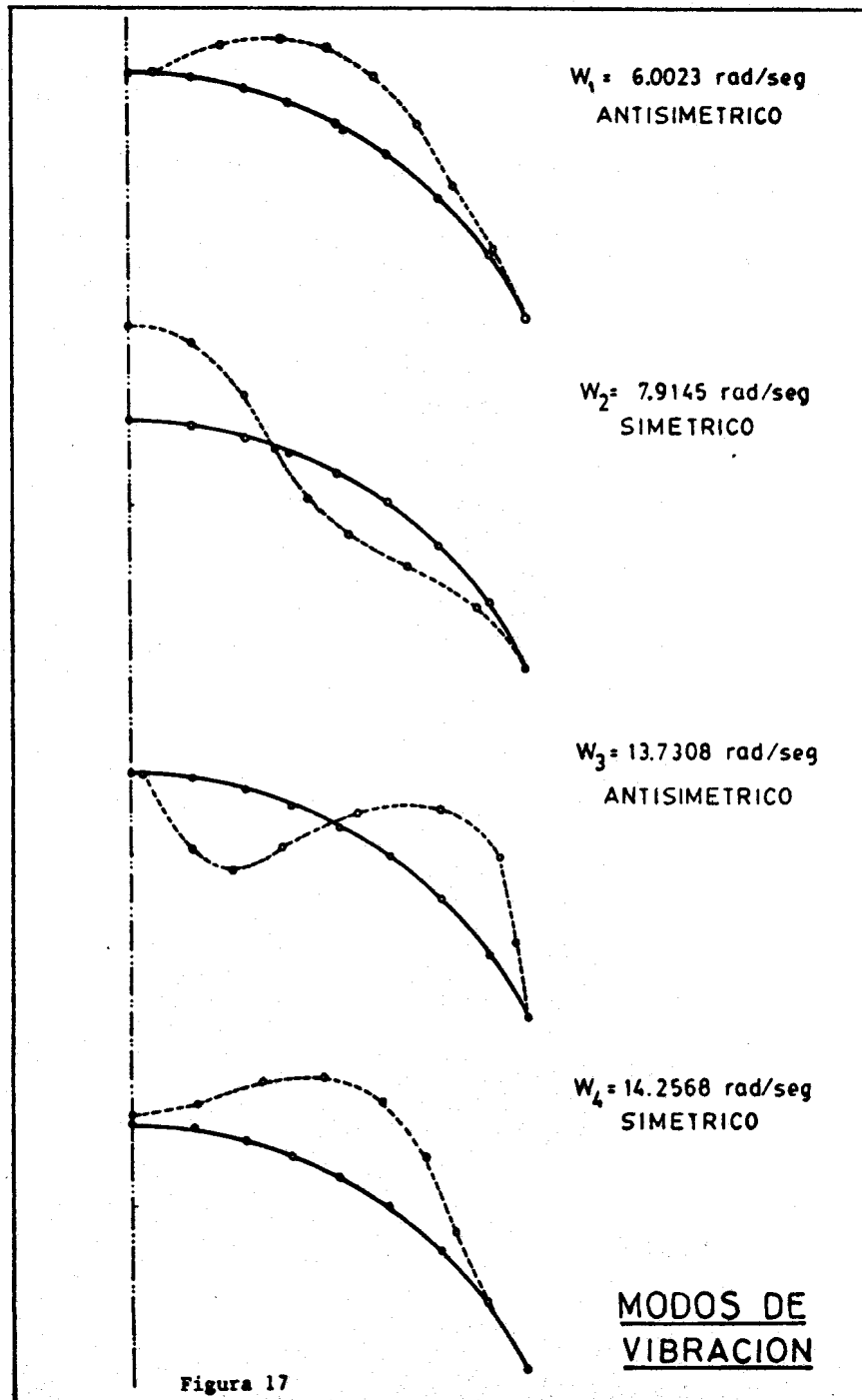
Otro aspecto que no se ha considerado en el estudio, es la interacción fluido-estructura, la interacción fundación-estructura y los efectos absorbentes de los sedimentos, en el dominio de la frecuencia, mediante métodos más precisos [4] que el recurso de la masa agregada. Esto ha ocurrido así tanto por la falta de disponibilidad de programas en el tiempo estipulado como por el hecho de que el efecto sísmico tiene una importancia relativa como factor de diseño para esta presa. No obstante se prevé desarrollar estudios adicionales que consideren estos efectos .

REFERENCIAS

- [1] Clough, R. W. ;Raphael, J. M. ;Mojtshedi, S., "ADAP A Computer Program for Static and Dynamic Analysis of Arch Dams", Report N^oEEERC-73-14, Earthquake Engineering Research Center, University of Cali-

ornia, Berkeley, June 1973.

- [2] Reglamento INPRES-CIRSOC 103, "Normas Argentinas para construcciones Sismorresistentes". Instituto Nacional de Tecnología Industrial Bs. As. 1983.
- [3] Newmark, N.,M.; "Fundamentos de Ingeniería Sísmica", Editorial Diana, México 1976.
- [4] Fok, Ka-Lun; Chopra, A.,K.; "Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams", Report N^o UCB/EERC-85/07, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, July 1985.



SISMO X TRANSVERSAL TABLA N° 7

ESTADO DE CARGA:		Mod. Elast. H°: 300.000 Kg/cm²							
SISMO X TRANSV.		Mod. Elast. Roca: 240.000 Kg/cm²							
COTA	CLAVE				APOYO				
	Mensula		Arco		Mensula		Arco		
	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	
945.25	+0.31	+0.54	+2.72	+2.81	+0.48	+0.18	+0.73	+3.55	
937.25	+0.36	+0.55	+2.20	+2.20	+1.53	+0.53	+3.51	+4.64	
930.25	+0.33	+0.56	+1.74	+1.94	+2.18	+0.75	+4.77	+3.95	
924.25	+0.37	+0.60	+1.30	+1.77	+2.42	+0.65	+5.29	+2.87	
919.25	+0.62	+0.56	+0.81	+1.81	+2.24	+0.52	+4.52	+1.75	
915.25	+0.68	+0.30	+0.38	+1.11	+2.00	+0.80	+3.58	+0.72	
912.00	+1.51	+0.10	+0.18	+0.62	+1.29	+0.11	+2.61	+0.52	
909.50	+0.06	+0.05	+0.24	+0.42	+0.06	+0.05	+0.24	+0.42	

SISMO Y LONGITUDINAL TABLA N° 8

ESTADO DE CARGA:		Mod. Elast. H°: 300.000 Kg/cm²							
SISMO Y LONGITUD.		Mod. Elast. Roca: 240.000 Kg/cm²							
COTA	CLAVE				APOYO				
	Mensula		Arco		Mensula		Arco		
	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	AAr	AAb	
945.25	+0.55	+0.55	+2.82	+3.90	+0.32	+0.16	+1.40	+1.89	
937.25	+0.86	+0.49	+1.81	+1.79	+0.51	+0.31	+1.55	+1.69	
930.25	+0.72	+0.25	+1.17	+0.80	+0.50	+0.24	+1.11	+0.86	
924.25	+0.54	+0.28	+0.66	+0.38	+0.35	+0.13	+0.60	+0.48	
919.25	+0.49	+0.31	+0.52	+0.14	+0.26	+0.10	+0.24	+0.40	
915.25	+0.46	+0.25	+0.12	+0.87	+0.28	+0.11	+0.23	+0.30	
912.00	+0.56	+0.18	+0.02	+0.06	+0.36	+0.14	+0.31	+0.17	
909.50	+0.42	+0.17	+0.95	+0.35	+0.42	+0.19	+0.95	+0.35	