

Estudio de las presas de materiales sueltos con núcleo delgado durante la construcción y llenado del embalse mediante un método de elementos finitos tridimensional^(*)

Por J. L. JUSTO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Mecánica del Suelo y Cimentaciones Especiales

J. SAURA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de Estructuras

F. SEGOVIA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor de Matemáticas, E.T.S. de Arquitectura, Universidad de Sevilla.

En anteriores trabajos se ha analizado el comportamiento de la presa mejicana de El Infiernillo, comparando los corrimientos medidos y calculados durante su construcción y llenado del embalse. El módulo de elasticidad de los materiales se mantuvo constante durante el proceso de llenado. El colapso se simuló disminuyendo el valor de E. En este artículo se cuantifican los fenómenos de flotación y se altera el valor de E en procesos de descarga durante el llenado. Se ha empleado un programa de elementos finitos tridimensional que admite fenómenos de colapso, carga de agua, flotación, material sin resistencia a tracción y variación de E en procesos de descarga.

1. PREAMBULO

Numerosos son los estudios realizados sobre el comportamiento de una presa de materiales sueltos, abordando el cálculo por el método de los elementos finitos.

Los estudios que parten de esquemas de deformación plana (6 y 7), incluso con un comportamiento no lineal de los materiales, ofrecen aproximaciones al fenómeno real menos afinadas que los alcanzados por nosotros empleando un método tridimensional y aceptando un comportamiento lineal-elástico del material. La falta de resistencia a la tracción es simulada por nosotros con el método iterativo propuesto por Zienkiewicz (5), y la carga de agua durante el llenado del embalse se introduce como carga externa.

2. EL PROGRAMA DE ORDENADOR

El programa empleado utiliza el elemento

hexaédrico descrito por Wilson (8) y permite el cálculo no sólo de tensiones y deformaciones para un estado de cargas determinado, sino también la simulación del proceso constructivo de la presa en 10 tongadas. El número de 10 tongadas se reveló suficiente en anteriores trabajos nuestros (4).

El método constructivo por tongadas funciona del siguiente modo: al colocar una capa, las tongadas subyacentes experimentan las deformaciones correspondientes y modifican su estado tensional debido al peso de la última. Esta, sin embargo, sólo gravita y no colabora a la rigidez del conjunto. Por tanto, se introduce con tensiones y deformaciones nulas.

3. LLENADO DEL EMBALSE

En este proceso se ha tenido en cuenta no sólo el empuje hidrostático que el agua ejerce sobre el núcleo, sino también el fenómeno de flotación de la escollera por empuje de Arquímedes y el colapso de la misma.

Este último fenómeno ya fue tenido en cuenta

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de enero de 1987.

en anteriores trabajos nuestros (1 y 4) antes aludidos; se introdujo reduciendo en un 20 por 100 el módulo de elasticidad de la fracción de escollera afectada.

El efecto de la flotación se simula introduciendo unas fuerzas nodales externas equivalentes al empuje ascensional de Arquímedes.

Los dos puntos anteriores se han estudiado bajo una doble hipótesis:

- Conservando constante el módulo de elasticidad de la escollera.
- Incrementándolo a un valor muy superior ($E = 4E_0$) en aquellas regiones que presentan un proceso de descarga.

Esta última hipótesis es normalmente corroborada por los ensayos edométricos.

También el empuje del agua ha sido analizado desde el doble prisma expuesto: constancia de las características elásticas de los materiales e incremento hasta cuatro veces su valor en los elementos del espaldón sumergido.

Debe hacerse también una consideración respecto del módulo de deformación transversal: si el núcleo permanece inmóvil, la descarga debida a la flotación traería consigo un importante aumento del coeficiente de empuje en reposo (Jiménez Salas y Justo, 1975) que equivale

a un aumento también importante del módulo de deformación, para una misma deformación de activo (9).

4. APLICACION A LA PRESA DE EL INFIERNILLO

Saura realizó un estudio de las deformaciones ocurridas durante la construcción de la presa a través de un cálculo por elementos finitos, que consiguió un buen ajuste con las lecturas experimentales realizadas in-situ (1).

En el proceso de llenado del embalse y consiguiente puesta en carga de la presa, no ocurrió lo mismo, excediendo los desplazamientos horizontales calculados a los medidos in-situ.

La discretización de la estructura para su cálculo por elementos finitos queda recogida en la figura 1.

Los fenómenos de colapso, flotación y puesta en carga, se simularon separadamente, de modo que fuera posible su análisis individual.

En la figura 2 se representan las deformaciones calculadas, transversales (según eje x) y verticales (según eje z), para los tres fenómenos antes mencionados, en el eje vertical de la presa.

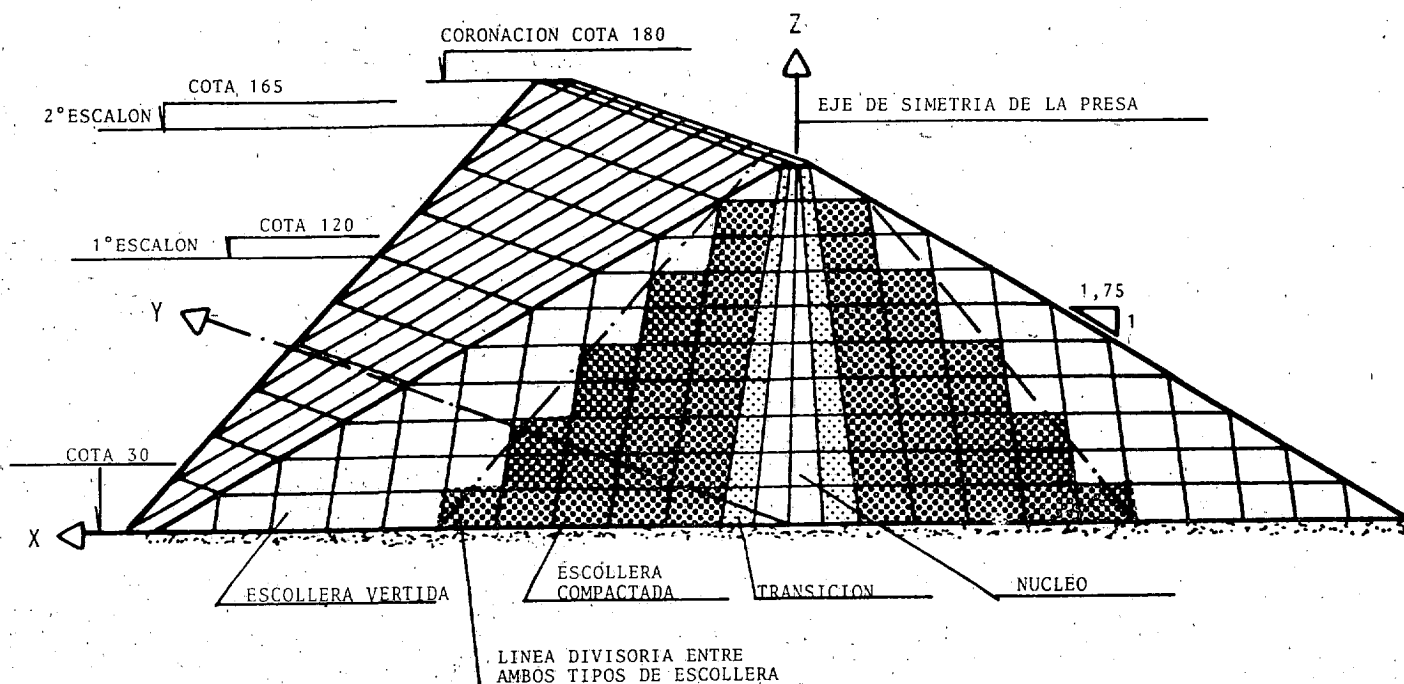


Figura 1.—Discretización de la presa en elementos finitos.

SEGUN EJE X

SEGUN EJE Z

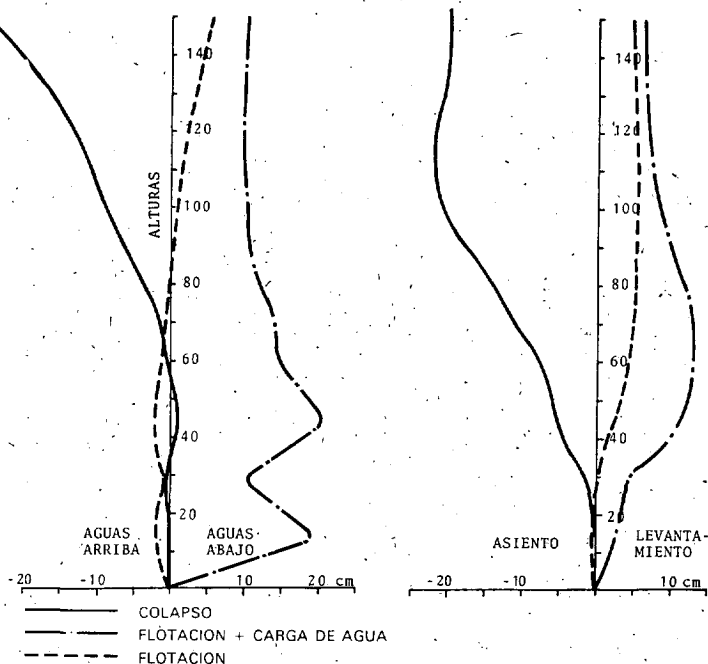


Figura 2. — Corrimientos en el eje de la presa durante el llenado del embalse hasta embalse lleno.

Los corrimientos por empuje de Arquímedes son despreciables, como puede observarse en la anterior figura: no rebasan los cinco centímetros en ninguna de las dos direcciones y en líneas generales pueden despreciarse, teniendo en cuenta la gran altura de la presa (150 metros sobre el cauce).

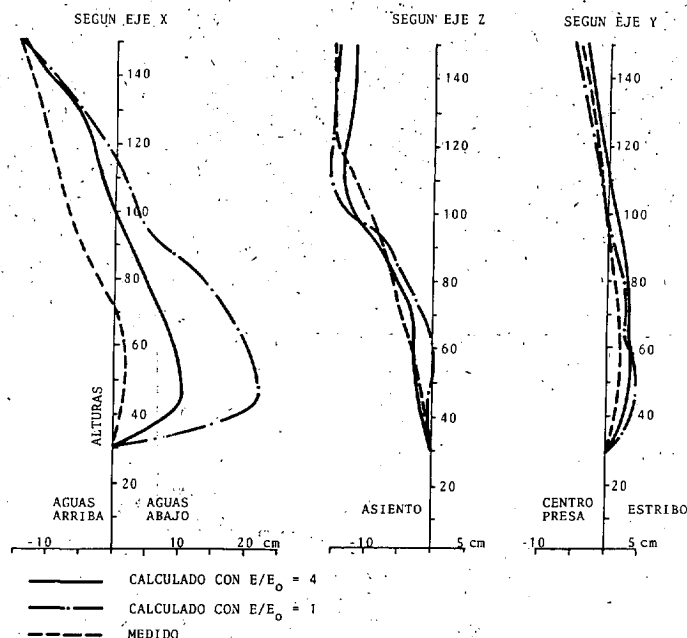


Figura 3. — Corrimientos en el inclinómetro I-II con una altura de embalse de 90 metros.

En línea paralela, se ha procedido a comparar los cálculos realizados con anterioridad manteniendo constante el módulo de elasticidad durante el llenado ($E/E_0 = 1$) con otra serie de cálculos que introducen la hipótesis de un incremento del valor de E hasta $E/E_0 = 4$. Los resultados de ambos y de los movimientos observados se han llevado a las figuras 3 a 8.

La importancia relativa de los fenómenos de flotación, colapso y carga de agua ha quedado ya reflejada. Despreciable la primera y recogidas en la anterior figura 2 las últimas.

Una avenida acaecida en junio de 1964 hizo entrar en carga a la presa, con una carrera de embalse de casi 90 metros.

La simulación de esta situación realizada por nosotros bajo el doble prisma de $E/E_0 = 1$ y $E/E_0 = 4$ aparece sintetizada en las figuras 3, 4 y 5. En ellas puede comprobarse la mejora de ajuste obtenida en el caso de incremento de rigidez en los procesos de descarga ($E/E_0 = 4$).

Se ha llevado a cabo también la simulación del proceso de llenado total del embalse. En este sentido, la figura 6 recoge los corrimientos medidos y calculados en el eje vertical de la presa, con las dos hipótesis barajadas $E/E_0 = 1$ y $E/E_0 = 4$. Los corrimientos horizontales han disminuido más del 50 por 100 en el tercio central, en tanto que los verticales recogen un levantamiento del tercio inferior, aunque de escasa cuantía.

Estos movimientos no han podido ser contrastados con medidas experimentales, pero sí

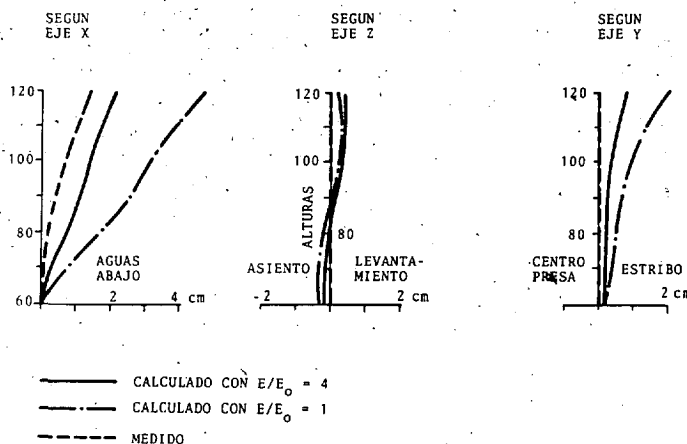


Figura 4. — Corrimientos en el inclinómetro I-II para una altura de embalse de 90 metros.

ESTUDIO DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS CON NUCLEO DELGADO

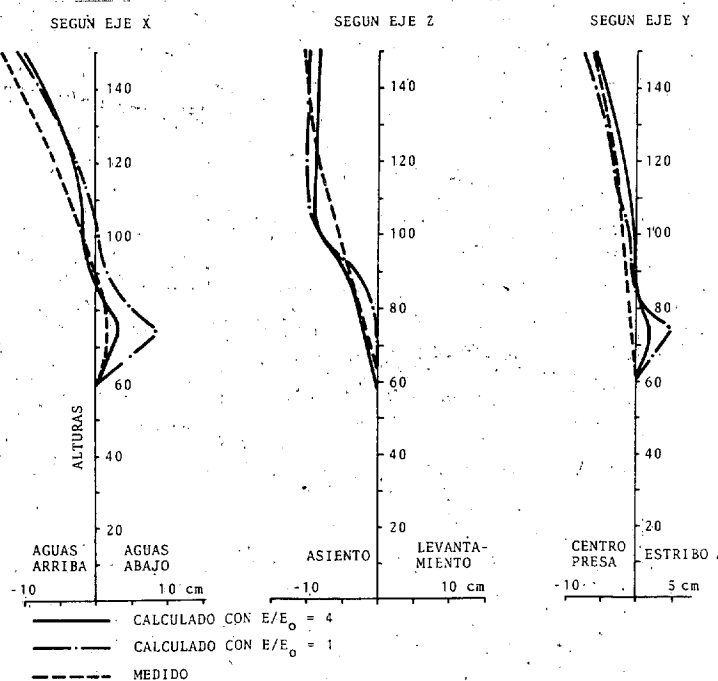


Figura 5. — Corrimientos en el inclinómetro I-V para una altura de embalse de 90 metros.

con el inclinómetro I-I, recogidos en la figura 7; en ésta se comprueba la mejora obtenida con la introducción del valor $E/E_0 = 4$, sobre todo en corrimientos horizontales que casi cuadruplican los experimentales con la hipótesis $E/E_0 = 1$.

En los metros superiores, los corrimientos

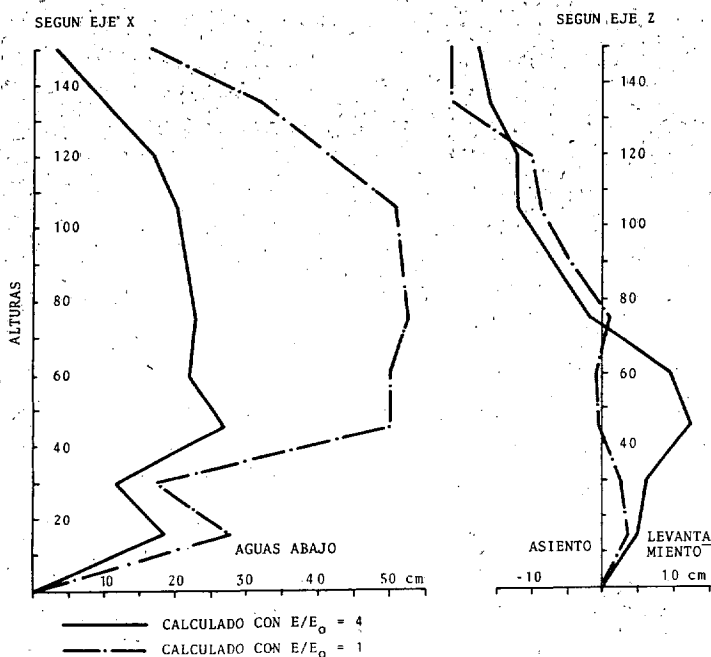


Figura 6. — Corrimientos en el eje de la presa a embalse lleno.

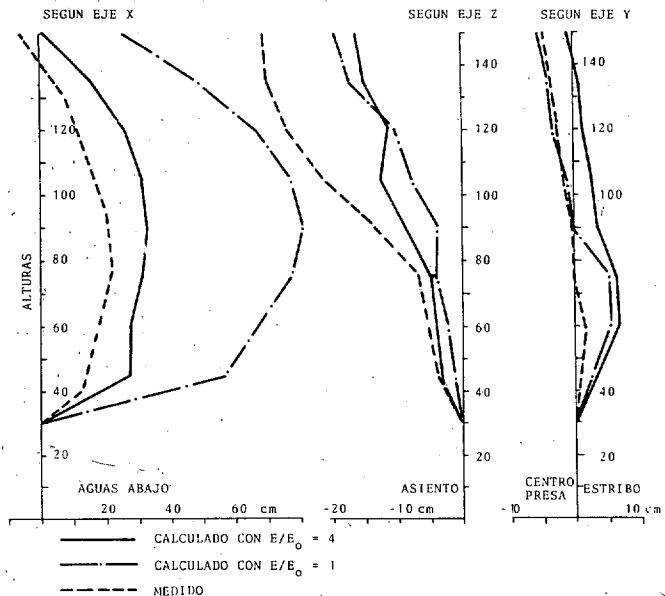


Figura 7. — Corrimientos en el inclinómetro I-I a embalse lleno.

medidos cambian de signo, dirigiéndose hacia el embalse. La simulación realizada por nosotros recoge perfectamente esta tendencia, aunque sin alcanzar resultados negativos bajo la hipótesis $E/E_0 = 4$. Los cálculos realizados con $E/E_0 = 1$ muestran unos resultados excesivos.

El ajuste de los corrimientos verticales medidos y calculados es análogo, mejorando los situados en el tercio inferior de la sección.

Incluimos, por último, en la figura 8 los co-

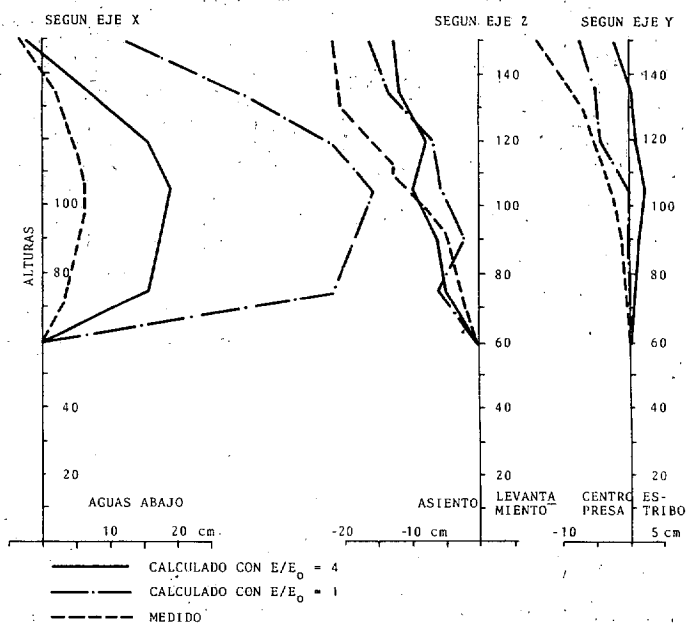


Figura 8. — Corrimientos en el inclinómetro I-V a embalse lleno.

rimientos medidos y calculados en la vertical del inclinómetro I-V. Son más pequeños que los barajados anteriormente y los comentarios que cabe realizar son análogos a los vertidos en párrafos anteriores.

5. DEFORMACIONES LONGITUDINALES

El estudio de las deformaciones longitudinales a lo largo de la coronación de la presa tiene un gran interés por su relación con el agrietamiento transversal del núcleo.

Las figuras 9 y 10 muestran la comparación entre las deformaciones longitudinales calcula-

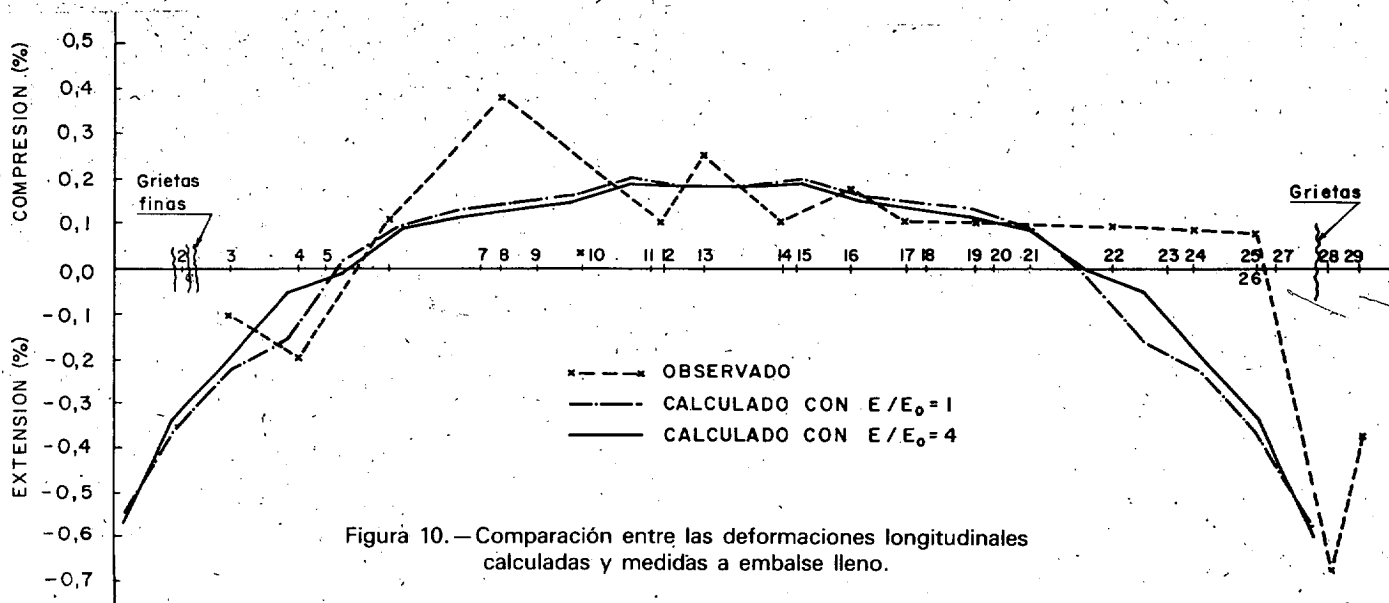
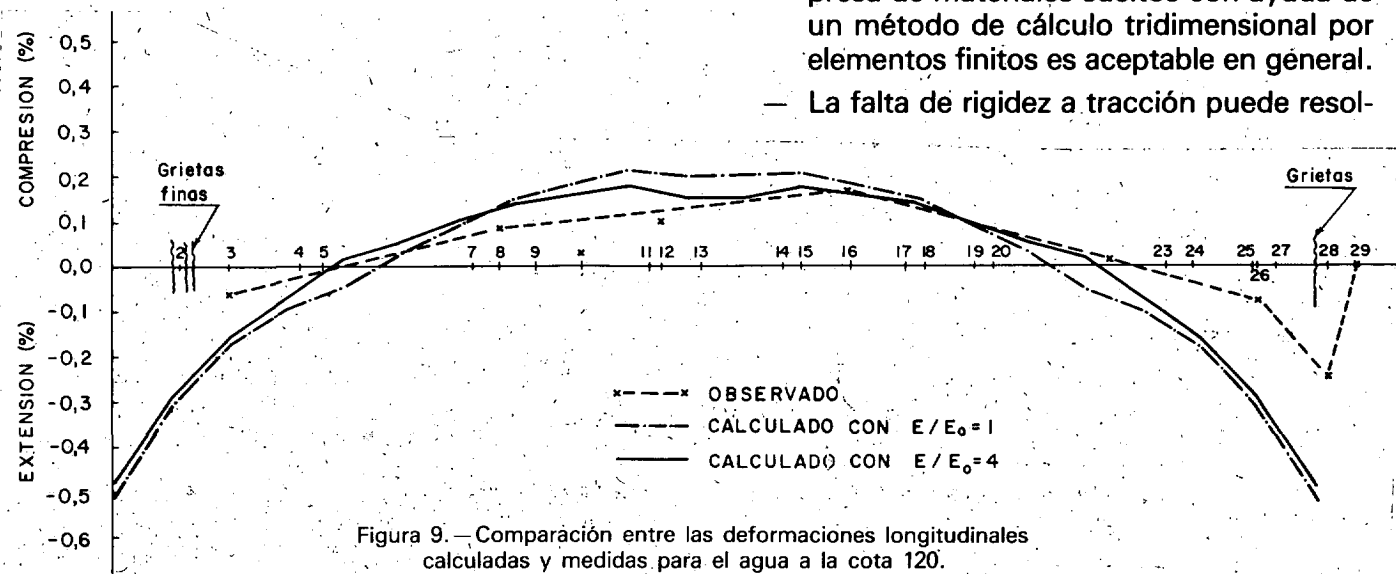
das y medidas para el agua a la cota de 120 y a embalse lleno respectivamente.

Si se tiene en cuenta el carácter irregular de las medidas, lógico en un material de rotura frágil a tracción como es un núcleo de arcilla, la concordancia entre cálculos y medidas puede ser calificada como excelente, y mejora ligeramente para $E/E_0 = 4$.

6. CONCLUSIONES

Citamos como más relevantes las siguientes:

- La simulación del comportamiento de una presa de materiales sueltos con ayuda de un método de cálculo tridimensional por elementos finitos es aceptable en general.
- La falta de rigidez a tracción puede resol-



verse con el método iterativo propuesto por Zienkiewicz.

- La simulación del proceso constructivo puede realizarse únicamente con 10 toncadas, de tal modo que la última que se coloca se halle exenta de tensiones y deformaciones.
- El colapso de la escollera sumergida puede representarse disminuyendo un porcentaje el valor de E, en función de los resultados de los ensayos.
- La influencia en el estado final de tensiones y deformaciones del fenómeno de flotación por empuje de Arquímedes es pequeña y puede despreciarse en general.
- La simulación del proceso de llenado del embalse y puesta en carga de la presa requiere tener en cuenta el fenómeno de rigidización de la escollera en los procesos de descarga. Se consigue de este modo una mejora notable en el ajuste de los corrimientos.

7. REFERENCIAS

- JUSTO, J. L. y SAURA, J. (1983): *Three-dimesional analysis os Infiernillo dam during construction and filling of the reservoir*. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, Vol 7, págs. 225-243.
- JUSTO, J. L. y SAURA, J. (1981): *Behaviour of Veneno's dam by three-dimensional F. E.* XI International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Vol. 3, págs. 449-452.
- JUSTO, J. L. y SAURA, J. (1981): *Análisis del comportamiento de la presa de Veneno, mediante elementos finitos tridimensionales*. Bol. Sociedad Española de Mecánica del Suelo, Vol. 58, págs. 13-48, y Bol. Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, Vol. 148, págs. 29-37.
- SAURA, J. (1979): *Estudio tridimensional de tensiones en presas de materiales sueltos*. Tesis Doctoral. Madrid.
- ZIENKIEWICZ, O. C., VALLIAPAN, B. E. y KING, P. (1968): *Stress analysis of rock as a «no tensión material»*. Géotechnique, Vol. 18, págs. 55-66.
- ALBERRO, J. A. (1972): *Streess-strain analysis of El Infiernillo dam*. Proc. Spec. Conf. Performancé of Earth and Earth-supported Structures, Purdue Univ. ASCE, Vol. 1, págs. 837-852.
- SKEMER, N. (1973): *Finite element analysis of El Infiernillo dam*. Can. Géotech. J., Vol. 10, págs. 129-144.

José L. de Justo Alpañés



Doctor ingeniero de Caminos de la Promoción de 1963 Master of Science en Mecánica del Suelo por la Universidad de Londres (Imperial College). Trabajó durante 6 años en el laboratorio de Carreteras y Geotecnia del CEDEX. Vocal de la Junta Directiva de la Asociación Española de Ingeniería Sísmica. Coautor de los tres tomos del libro «Geotecnia y Cimientos». Autor de numerosos artículos en revistas y memorias de congresos nacionales e internacionales. Ha actuado como consultor en importantes obras en el campo de la Geotecnia en España y en el extranjero. Actualmente es catedrático de Mecánica del Suelo y Cimentaciones Especiales de la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla.

Juan Saura Martínez



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción 1969, núm. 1 de la Promoción con la calificación de Sobresaliente. Doctorado en la Universidad de Madrid en 1979 con la calificación de Sobresaliente «cun laude». Licenciado en Matemáticas en la Universidad de Sevilla, 1976. Ha desarrollado su labor profesional desde 1969 en el M.O.P.U., en la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, en donde es jefe de la Sección Tercera de Explotación. Es profesor Titular en la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla, de la asignatura «Estructuras I». Ha publicado diversos artículos en Congresos y revistas nacionales y extranjeras.

Francisco Segovia Espiau



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Promoción de 1971 y licenciado en Ciencias Físicas, Promoción de 1965. Trabaja desde hace 15 años en la sociedad Aguas y Estructuras S. A. (Ayesa), donde ha llevado a cabo el proyecto de numerosas obras hidráulicas, en especial presas. Actualmente es profesor encargado de la asignatura Matemáticas III de la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla.