

EL CALCULO ELECTRONICO DE ESTRUCTURAS PLANAS POR EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (II) (*)

Por JOSE MIGUEL SAN MIGUEL ROMERO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ANDRES CANCER

Ingeniero Industrial

En la primera parte de este trabajo, publicada en el mes de noviembre de 1971, se describía con detalle el problema que se planteaba y los métodos de cálculo que se ponían en juego para su resolución; en particular, el método de los elementos finitos y el STRUDL eran objeto de análisis detallado para deducir de ellos el "modus operandi", que, a su vez, daba origen a una serie muy sistematizada de programas que resolvían el problema marginal, pero de gran trascendencia, que supone la preparación de datos.

Se hacía, finalmente, referencia a un próximo artículo, que es el presente, para incluir los resultados obtenidos en la aplicación de estos programas al cálculo elástico de presas.

Dos son los estudios realizados y que ahora se presentan; el primero es el cálculo de la presa de las Arellanas, gravedad aligerada tipo A, y la segunda es la presa del Sancho, cimentada en un terreno de módulo de elasticidad muy inferior al del hormigón.

El conjunto de resultados que aparecen muestran con evidencia la utilidad y fiabilidad del método, así como unas experiencias válidas para futuras utilizaciones.

Introducción.

En el número de noviembre de 1971 de la *Revista de Obras Públicas* se presentó la primera parte de este trabajo; en ella figuraba la exposición general del problema, se justificaba su restricción a las estructuras planas y se describía el método de cálculo con auxilio del STRUDL.

Es de subrayar el interés especial que presentaba la comparación del método de los elementos finitos y el método fotoelástico en cuanto a sus posibilidades; en esta segunda parte se recoge el cálculo con uno y otro método de una presa de gravedad aligerada.

Asimismo era de destacar la importancia que tenía para la obtención de un resultado adecuado la utilización de una malla suficientemente densa que, naturalmente, depende del criterio del ingeniero; se presenta en este artículo una comparación entre dos cálculos análogos en los que se modifican las mallas para poder juzgar sobre este importante tema.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de octubre de 1972.

Presa de gravedad aligerada.

La presa de Las Arellanas (**) es una presa de gravedad aligerada interiormente por medio de dos galerías, una superior y otra inferior, que le dan aspecto de A mayúscula.

Es evidente que los métodos usuales de cálculo numérico no pueden ser utilizados para el cálculo de la presa. Por ello, se recurrió al estudio fotoelástico que, naturalmente, sólo pudo realizarse para la carga hidrostática. Las tensiones principales que resultaron de tal estudio aparecen en la figura 1, indicando las tracciones con signo positivo y representándolas a escala.

Para calcular la estructura por el método de los elementos finitos se efectuó una división de la misma en triángulos y rectángulos, según aparece en las figuras 2 y 3. Esta figura corresponde al dibujo realizado por el computador auxiliar utilizado, el IBM 1130 de Programación y Técnica, S. A.

(**) Esta presa ha sido proyectada por los ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Joaquín Fernández Moreno, Alfonso Álvarez Martínez y Miguel Pérez Cabo, de la Sección de Estudios Hidráulicos de AUXINI-Construcción.

Con estos elementos y las cargas de peso propio, carga hidrostática y combinada de ambas se realizó el cálculo con el programa STRUDL, en la Oficina de Servicios de IBM en Madrid, después de preparar automáticamente los datos con los programas auxiliares mencionados en el artículo anterior obteniéndose como resultado las tensiones principales que aparece en las figuras 4, 5 y 6. Es de señalar que el módulo de Poisson se tomó igual a 0,36 para conseguir un resultado comparable con el ensayo fotoelástico y que, por la misma razón, se supuso el material homogéneo, incluso en la cimentación, aunque hubiera sido perfectamente posible suponer material heterogéneo y anisó-

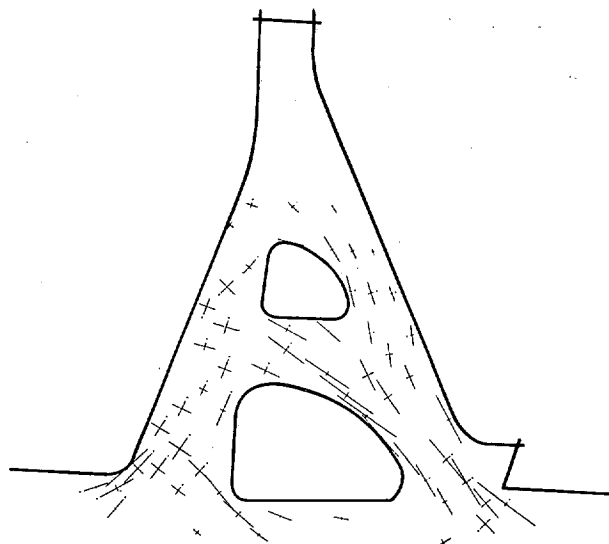


Fig. 1. — Método fotoelástico. Carga hidrostática.

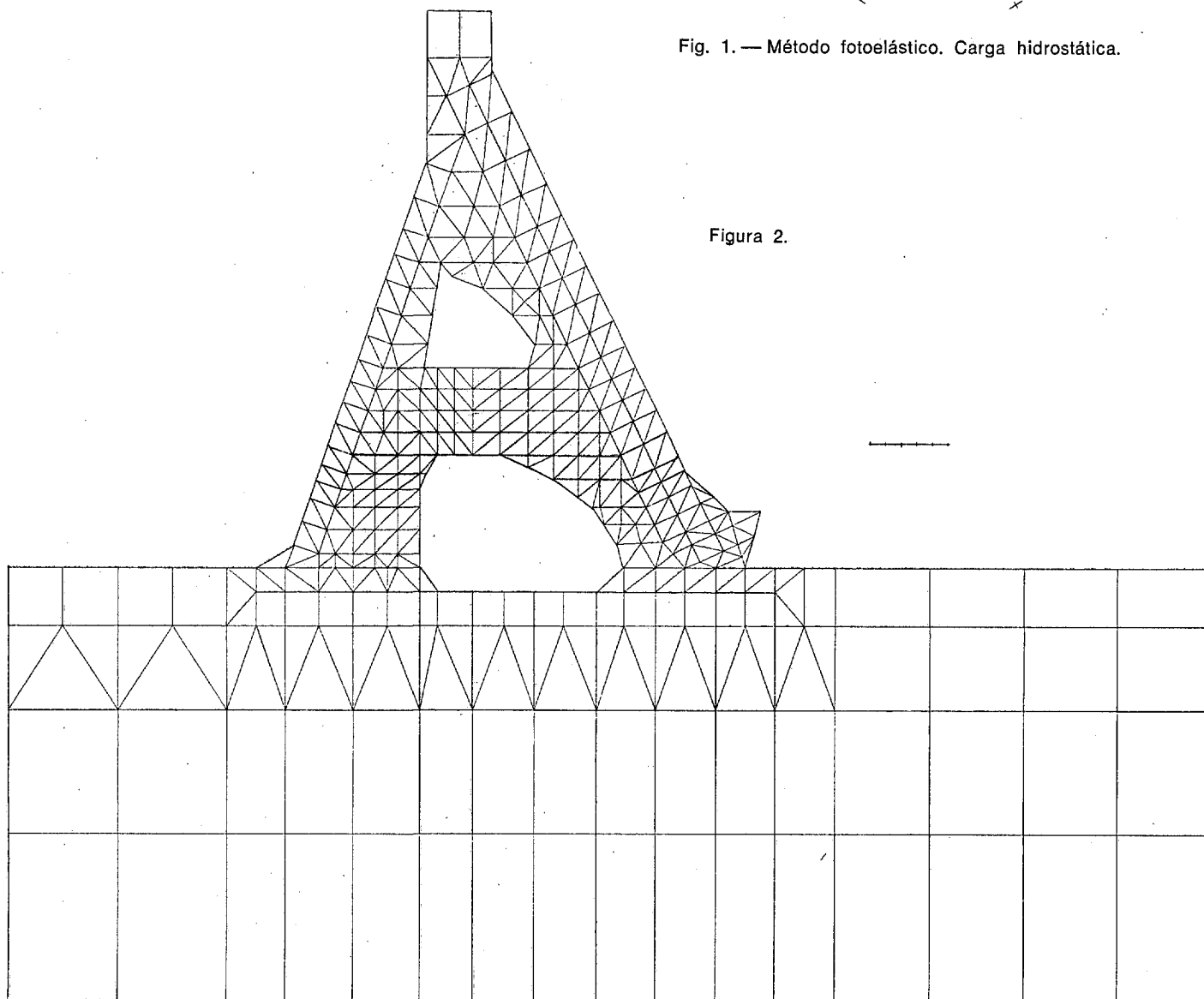


Figura 2.

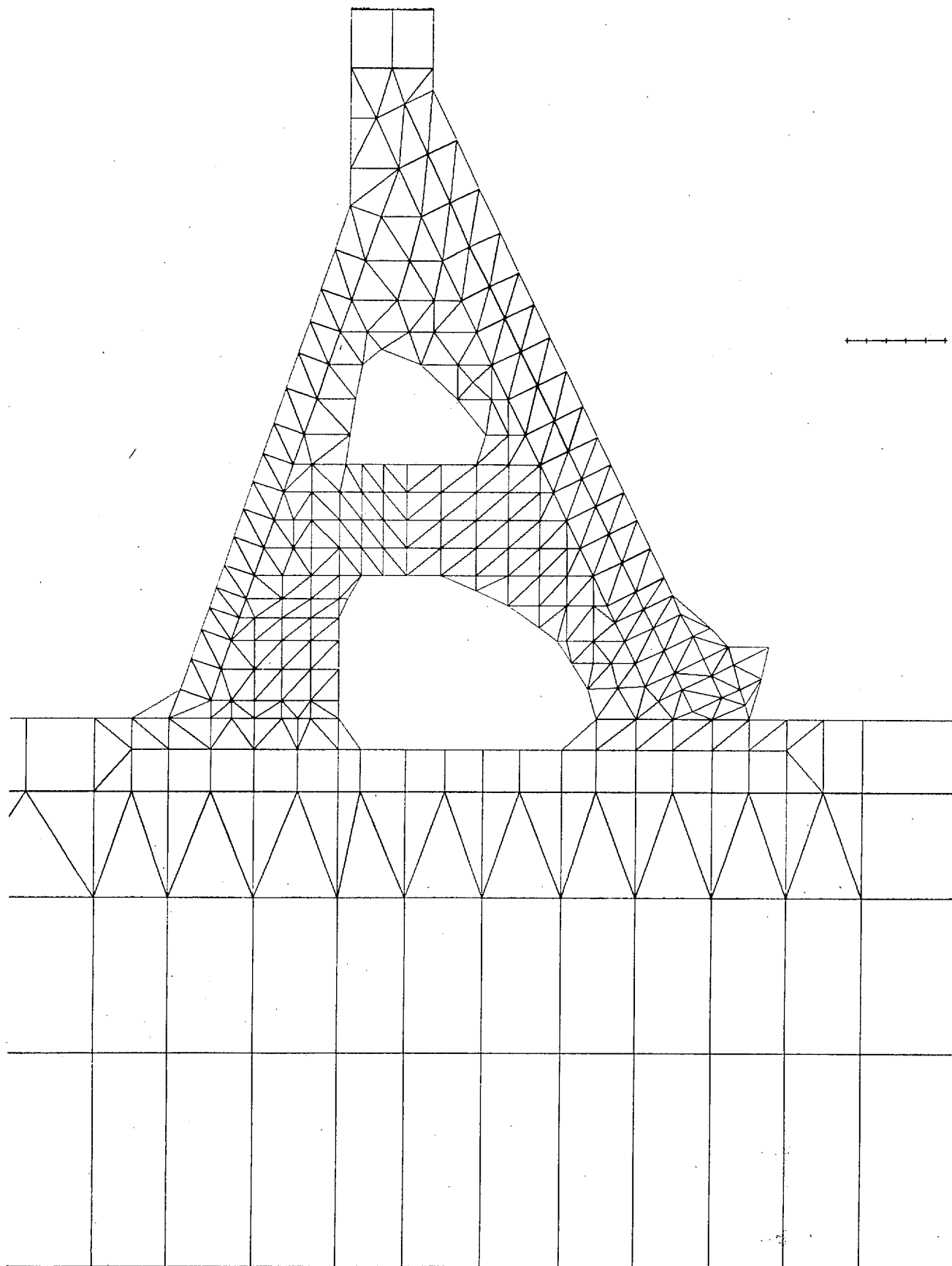


Figura 3.

tropo. En fin, la coacción en el cimientto se supuso actuando sobre los nudos del cimientto en la parte inferior y derecha solamente porque así se había dispuesto el marco para el ensayo fotoelástico. La comparación de los resultados

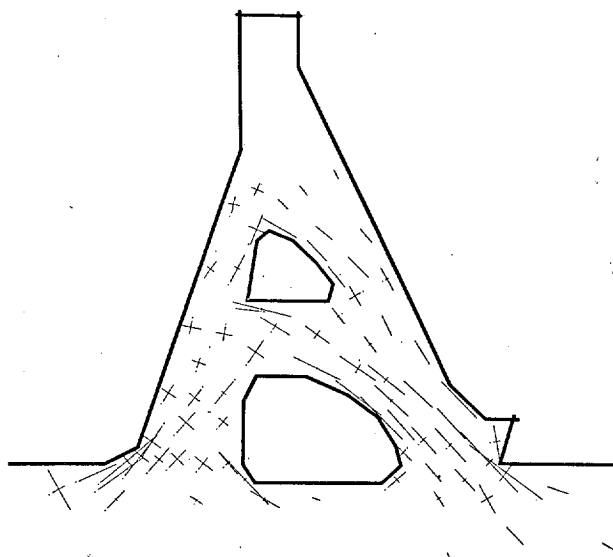


Fig. 4. — Elementos finitos. Carga hidrostática.

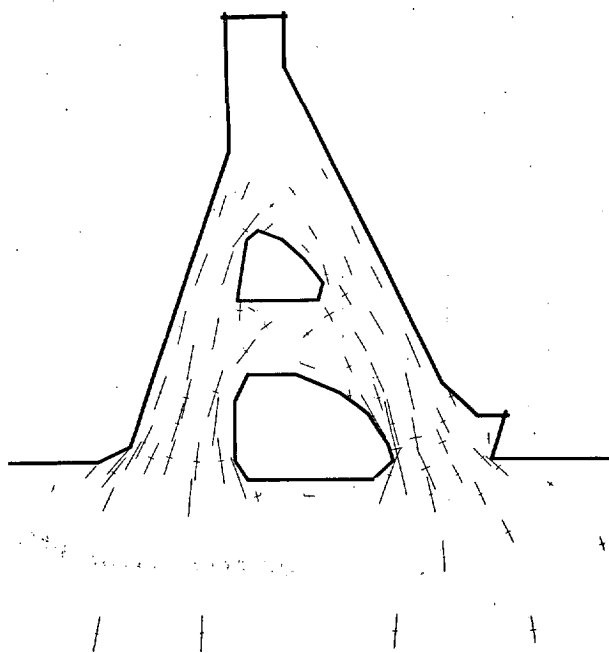


Fig. 5. — Elementos finitos. Peso propio.

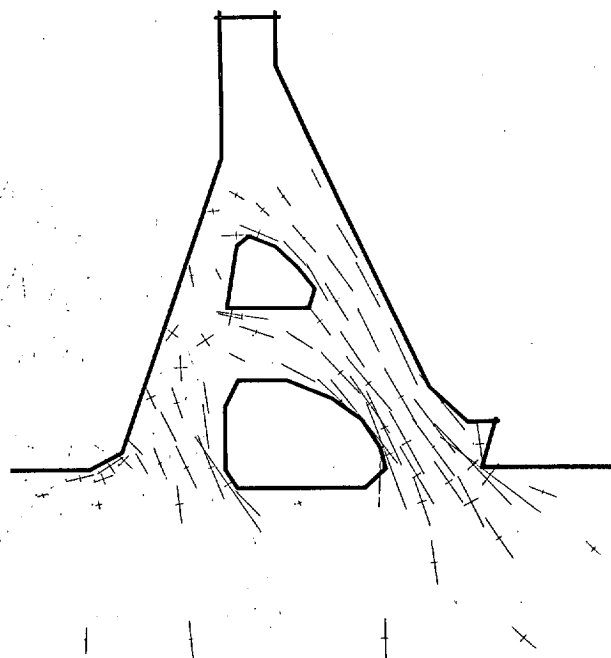


Fig. 6. — Elementos finitos. Carga hidrostática y peso propio.

pone de manifiesto la gran concordancia de uno y otro cálculo; es evidente que la concordancia sólo puede verificarse para la carga hidrostática, única que pudo ser calculada en el ensayo fotoelástico.

Es importante señalar que el tiempo total de ordenador empleado fue de dos horas de 1130 para la preparación de datos y de diez minutos de IBM 360/65 para el cálculo de la estructura.

Las cargas subsiguientes, que no fueron calculadas, se realizarían con plazos evidentemente más cortos, pues toda la preparación de datos se reduciría notablemente.

Presa con cimentación diferenciada.

La presa recrecida del Sancho (*) tiene, desde el punto de vista que nos ocupa una cimentación de módulo de elasticidad bien diferente del del hormigón. La utilización del método de los elementos finitos permitió abordar el problema con profundidad y, concretamente fue muy conveniente discernir la influencia del límite señalado a la cimentación; es decir, la zo-

(*) El recrecimiento de esta presa ha sido proyectado por los ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Joaquín Fernández Moreno y Cristóbal Zubizarreta.

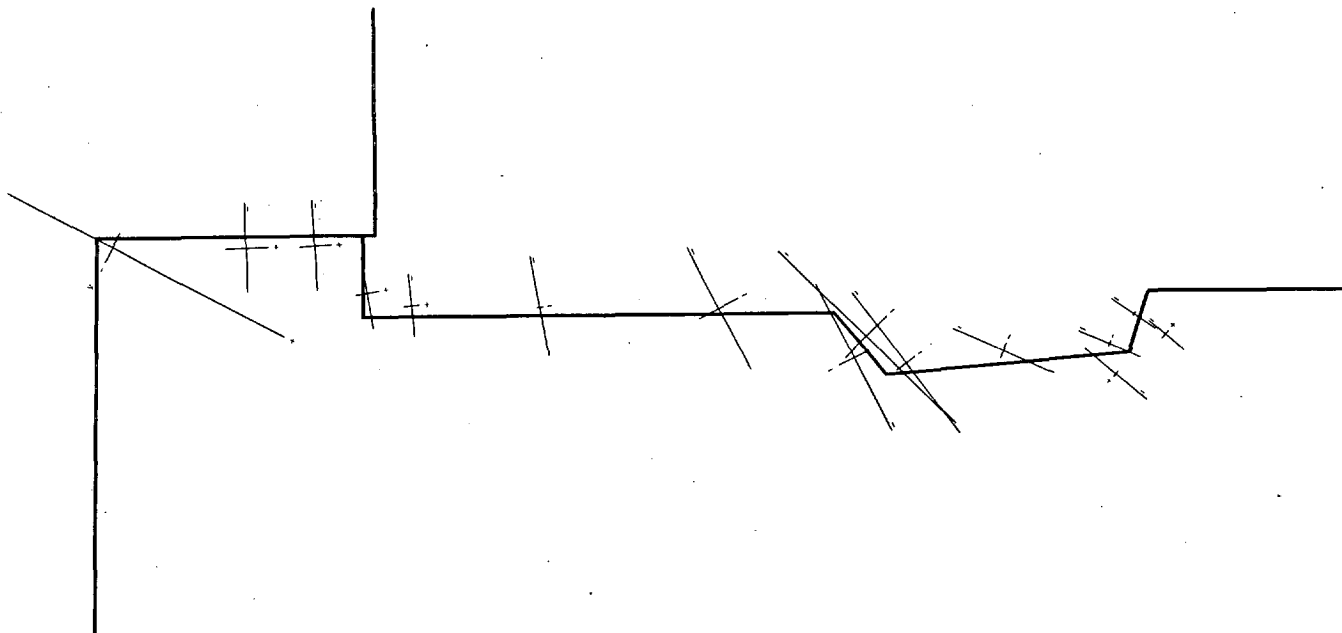


Figura 7.

na de terreno que se supone limitada por una línea de desplazamientos nulos.

Se hicieron dos hipótesis, que se presentan en las figuras 7 y 8; como se ve, la diferencia de una a otra es notable en lo que se refiere a la zona de terreno implicado en el cálculo.

Las tensiones en el contorno de la cimenta-

ción son, sin embargo, bastante semejantes y puede asegurarse que el resultado no se modificaría si se continuase aumentando la zona de terreno reproducida para el cálculo.

Existe una diferencia, no obstante, que conviene aclarar; en el vértice de aguas arriba del macizo de cimentación aparecen sendas trac-

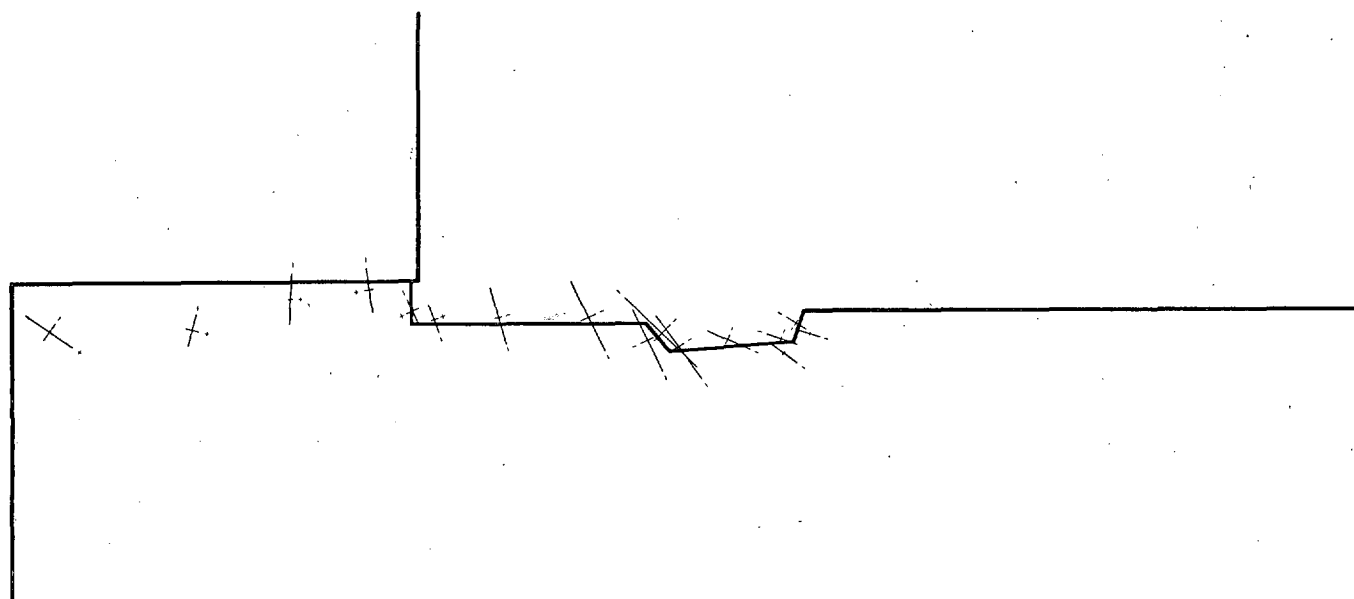


Figura 8.

ciones que sí varían considerablemente de una solución a la otra. La justificación de estas tracciones es que en primer lugar, como el contorno se supone totalmente rígido, en él se presentan tensiones locales importantes y, en segundo lugar, el efecto del contorno en sus extremos superiores es equivalente al de dos puntos de sujeción del que la estructura quedase en cierto modo colgada.

Se nota que la consideración de un contorno mayor (fig. 8) alivia estas tensiones locales (nunca representativas) pero, y esto es lo importante, las tensiones en la línea de cimentación de la presa permanecen casi invariables.

Conclusiones.

Los dos ejemplos citados permiten ver con optimismo la aplicación del método de los elementos finitos a estructuras de este tipo por su

coste relativamente bajo y su rapidez, realmente notable, lo que permite no sólo conocer la distribución de tensiones, sino también poder modificar la distribución de masas en la estructura para conseguir una mejor utilización del hormigón o, en su caso, una distribución de tensiones más conveniente, desde algún punto de vista (aliviar las tensiones importantes de puntos singulares de la obra, aumentar las compresiones en los planos de posible deslizamiento, variar la inclinación de algunas tensiones, etcétera).

En cualquier caso el método es viable, es seguro y, de acuerdo con la experiencia reflejada en este artículo, la calidad del resultado es francamente satisfactoria aún para mallas relativamente poco densas; en fin, lo más importante de todo es que, pasando de la teoría a la práctica, el método se ha hecho operativo y, así, se ha convertido en un nuevo y valioso instrumento al servicio del ingeniero.