

# Comparación entre un canal trapecial y otro circular en terrenos expansivos<sup>(\*)</sup>

Por J. L. MANZANARES JAPON

J. SAURA MARTINEZ

y J. L. DE JUSTO ALPAÑES

Doctores Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

*Se comparan los resultados obtenidos por el método de elementos finitos, de esfuerzos, tensiones y corrimientos que aparecen sobre el revestimiento de canales, en suelos expansivos y según que la sección transversal sea circular o trapecial, como consecuencia del movimiento del terreno. Se concluye en la ventaja de la solución circular, que se propone como idónea para suelos expansivos.*

## INTRODUCCION

Los departamentos de Mecánica del Suelo y Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla han abordado conjuntamente un trabajo de investigación sobre el comportamiento de diferentes tipos de revestimiento de canales emplazados en arcillas expansivas.

El estudio completo comprende tres partes diferentes:

- Determinación en laboratorio del comportamiento reológico de las arcillas.
- Cálculo por medio del método de elementos finitos de los estados tensionales del suelo y del revestimiento.
- Medidas experimentales in-situ en tramos reales de canal especialmente instrumentados para ello.

Se han elegido dos canales en fase de construcción en los que el conocimiento real de las características geotécnicas de los terrenos atravesados es muy elevado. Se trata de los canales Genil-Cabra (Córdoba) y Calanda (Teruel). El primero tiene una sección transversal con directriz parabólica y en el segundo de ellos se han tanteado tanto la sección trapecial como la circular tipo Barragan. En ambos el revestimiento es de hormigón.

La investigación completa aún no se encuen-

tra terminada. La parte de laboratorio se ha desarrollado casi completamente, la de análisis en computador está realizada al 50 por 100 y se va a comenzar la etapa de instrumentación.

Como existía cierta urgencia en decidir el tipo de revestimiento del canal de Calanda se ha anticipado este estudio en el que se realiza una primera comparación entre la sección trapecial y la circular. Como consecuencia del mismo se ha llegado a la conclusión de recomendar este último tipo.

## 1. TRABAJOS DE LABORATORIO

Los trabajos de laboratorio han ido encaminados en tres direcciones diferentes.

- 1.º Medida de la expansividad de las arcillas, bajo diferentes estados tensionales, tanto para las secciones en desmonte como en terraplén.
- 2.º Correlación de las características de expansividad con el límite líquido de las arcillas, con objeto de poder controlar en obra fácilmente el tipo de sección idónea para cada tramo.
- 3.º Medida de las características reológicas de diversos materiales no expansivos para ser utilizados como material de sustitución.

Para ello se han realizado ensayos de expansividad en edómetro, con distintos valores de

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1985.

la carga, sobre muestras inalteradas talladas en bloque y sobre muestras remoldeadas compactadas a densidad Proctor.

En todos los casos se saturaba la muestra en el edómetro midiendo la expansión que se producía tanto en hinchamiento libre (carga nula) como con diferentes valores de la carga.

De esta manera se han podido deducir curvas que relacionan el hinchamiento libre y el módulo de elasticidad con el estado tensional y el límite líquido de las arcillas. También se ha medido el módulo de elasticidad del relleno inerte.

### 2. ANALISIS DE LOS ESTADOS TENSIONALES

Para el cálculo de las tensiones generadas en el terreno y en el revestimiento se han utilizado dos programas de elementos finitos: el Solid Sap utilizando el elemento de Wilson de deformación constante, con modos incompatibles que se eliminan por condensación estática, (rodado en un VAX-730) y el HP empleando elementos isoparamétricos rectangulares y triangulares de deformación plana de cuatro y tres nodos (rodado en un HP-9816).

Dado que tanto el módulo de elasticidad como el hinchamiento dependen del estado tensional del suelo, ha sido preciso predeterminar este estado mediante las siguientes etapas de cálculo.

1. Determinación del estado tensional previo.
2. Estado generado por la excavación del canal.
3. Estado provocado por la carga de agua.
4. Estado inducido por la expansividad.
5. Estado debido a la flotación.

En una primera etapa se ha supuesto un módulo de elasticidad constante para el terreno en la fase de carga, otro en la de hinchamiento y un tercero para el hormigón.

Conocidos los estados tensionales se puede determinar para cada elemento el módulo de elasticidad y el hinchamiento en función de los análisis de laboratorio, repitiendo el cálculo otra

vez en sus fases 3, 4 y 5 con las nuevas características reológicas.

Este esquema se aplica a los tres tipos de secciones: parabólica, trapezoidal y circular, para situaciones de desmonte, terraplén y con diversos espesores de relleno inerte.

Como conclusión final se aconsejan diversos espesores de relleno para cada tipo de sección y de arcilla expansiva.

### 3. COMPARACION ENTRE LA SECCION TRAPEZIAL Y LA CIRCULAR

La comparación ha sido realizada para el canal de Calanda (12 m<sup>3</sup>/seg) analizando las tensiones producidas en el revestimiento por la carga de agua y la expansividad del suelo. En ambos casos se ha supuesto un comportamiento homogéneo de la masa de suelo.

Para la carga de agua un módulo de Young  $E = 1.300 \text{ T/m}^2$  y un coeficiente de Poisson de 0,3. Para la fase de expansividad  $E = 130 \text{ Toneladas/m}^2$  y el mismo coeficiente  $\nu$ . En el hormigón se supone  $E = 2 \times 10^6 \text{ T/m}^2$  y  $\nu = 0,15$ .

Se han estudiado los siguientes casos:

1. Sección trapezoidal sin juntas con espesor 14 centímetros.
2. Sección trapezoidal con juntas en ambos extremos de la base y un espesor de 14 centímetros.
3. Sección trapezoidal sin juntas y un espesor de 10 centímetros.
4. Sección trapezoidal con juntas y un espesor de 10 centímetros.
5. Sección circular sin juntas con espesor de 10 centímetros.
6. Sección circular con junta en eje de canal y espesor 10 centímetros.

Las dimensiones de la sección trapezoidal son de 2,6 metros de base, un calado de 1,95 metros y un resguardo de 0,4 metros.

Los taludes de los cajeros son de 3/2.

La sección circular tiene un radio de 3,6 metros, un ángulo en el centro de 130,36° un calado total de 2,09 metros y un resguardo de 0,35 metros.

En la figura 1 se incluye la discretización rea-

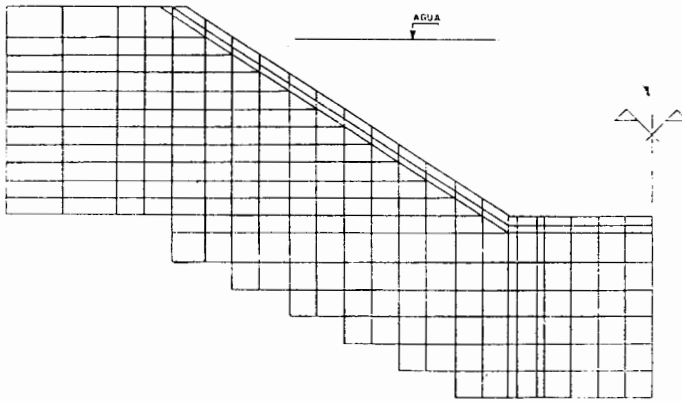


Figura 1.—Discretización en elementos finitos. Sección trapezoidal.

lizada para el canal trapezoidal y en la 2 la del canal circular.

Para la comparación se ha supuesto una expansividad muy ligera con un hinchamiento edométrico del 0,5 por 100. Se supone que para expansividades superiores se utilizará un relleno inerte de espesor variable. En cualquier caso, pueden determinarse proporcionalmente las tensiones generadas con mayores movimientos del suelo dada la linealidad del modelo propuesto.

La expansividad es simulada mediante un teórico incremento de temperatura. La relación existente entre el hinchamiento edométrico  $\epsilon''_o$ , el hinchamiento térmico en elemento tridimensional  $\epsilon_o$  y el correspondiente al estado de deformación plana  $\epsilon'_o$ , es:

$$\epsilon = \epsilon''_o \frac{1 - \nu}{1 + \nu}$$

$$\epsilon'_o = \epsilon''_o (1 - \nu)$$

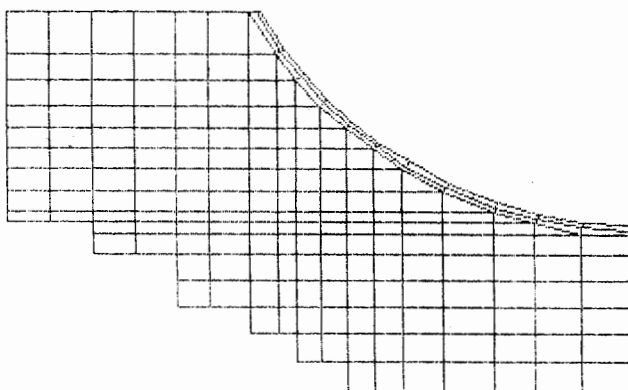


Figura 2.—Discretización en elementos finitos. Sección circular.

Lo que implica una dilatación en el elemento cúbico de valor  $\epsilon_o = 0,0027$  y en el elemento de tensión plana  $\epsilon_o = 0,0035$ .

### 3.1. Cálculo de esfuerzos

Para interpretar las flexiones generadas en el revestimiento a partir de los datos de tensión obtenidos en los elementos se ha supuesto que tanto la tensión constante del elemento de Wilson como la del punto central de isoparamétrico constituyen la tensión media del elemento.

Para tener en cuenta el cambio a coordenadas locales se ha utilizado en cada elemento la expresión.

$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha$$

En la figura 3 puede verse la asimilación a flexión del revestimiento de hormigón.

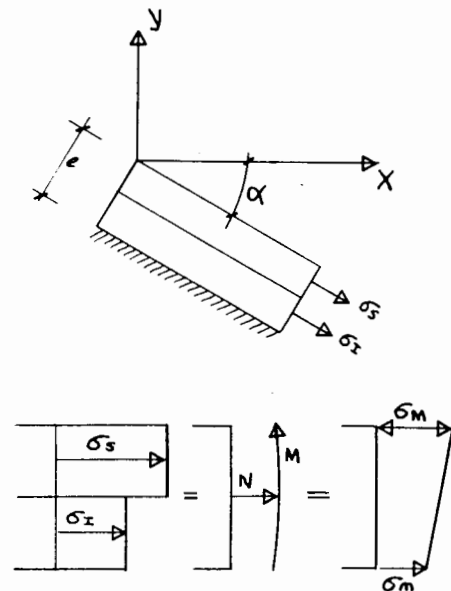


Figura 3.—Equivalencia momento flector, axil y tensiones.

Los valores del axil y del momento, así como de las tensiones en las cifras extremas son:

$$N = \frac{e}{2} (\sigma_s + \sigma_l)$$

$$\sigma_m = \frac{N}{e} - \frac{6M}{e^2} = 1,25 \sigma_s - 0,25 \sigma_l$$

$$M = \frac{e^2}{8} (\sigma_1 + \sigma_s)$$

$$\sigma_M = \frac{N}{e} + \frac{6M}{e^2} = 1,25\sigma_1 - 0,25\sigma_s$$

La medida de la máxima tracción viene dada por la presencia del esfuerzo cortante y es proporcionada directamente por la tensión principal mayor de cada elemento.

### 3.2. Sección trapezoidal

En la figura 4 aparece la ley de corrimientos y en la figura 5 la ley de momentos flectores sobre el revestimiento de hormigón, debidos exclusivamente al hinchamiento del terreno por cambio de humedad. Las leyes de corrimientos no se alteran sensiblemente en las diferentes hipótesis estudiadas.

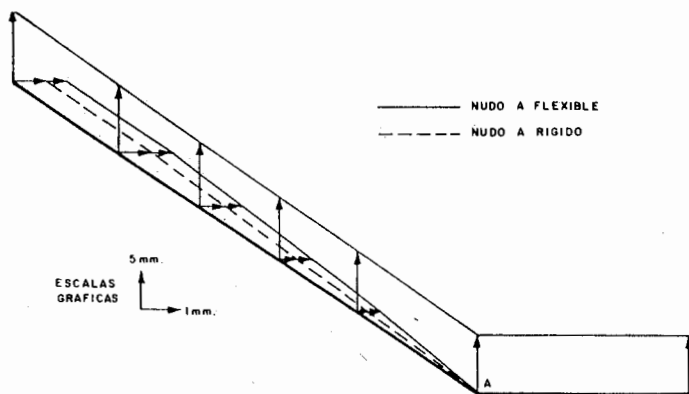


Figura 4. — Corrimientos debidos al hinchamiento.

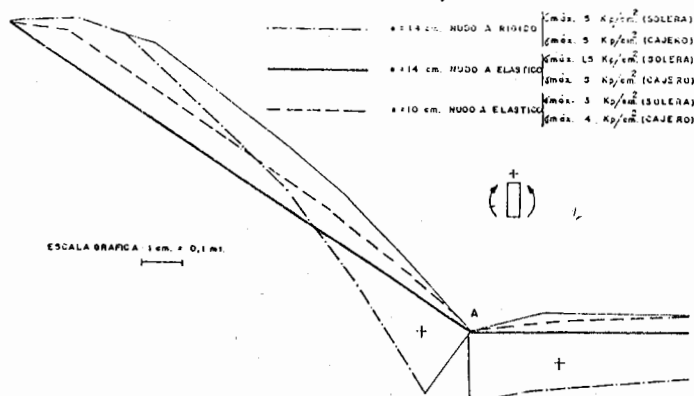


Figura 5. — Ley de momentos flectores sobre el revestimiento debidos al hinchamiento.

Si comparamos para un mismo espesor, e = 14 centímetros las leyes de momentos flectores, según que el nudo A sea elástico o rígido, vemos que cambia la forma de las mismas, fundamentalmente en la solera y en las proximidades del nudo A. En caso de nudo A rígido (ausencia de junta en él), la solera está sometida a momentos flectores positivos, con un máximo de 0,17 m.T. en el nudo A. La tracción máxima sobre el hormigón es de 5 kp/cm<sup>2</sup>.

Al colocar una junta elástica en A, la solera queda sometida a momentos flectores negativos, con un máximo de 0,05 m.T lo que supone una tracción máxima de 1,5 kp/cm<sup>2</sup>, algo menos de la tercera parte de la correspondiente al caso anterior.

Por lo que respecta al cajero, en el caso de junta elástica, los momentos flectores son negativos, produciendo tracciones en el paramento exterior, con un máximo de 0,16 m.T y una tracción máxima de unos 5 kp/cm<sup>2</sup>. Con nudo rígido la ley de momentos flectores cambia de signo, si bien su valor máximo es sensiblemente parecido al anterior, y vale 0,17 m.T en el nudo A.

La disminución de espesor de 0,14 a 0,10 metros en la hipótesis de junta elástica en A, supone una disminución sensible de los momentos flectores, sobre todo en el cajero, pasando la tracción máxima de 5 kp/cm<sup>2</sup> a 4 kp/cm<sup>2</sup>.

Los resultados correspondientes a la acción aislada de la carga de agua, que correspondería a una situación instantánea de llenado, se ha representado en la figura 5, para los dos casos límites e = 14 centímetros y nudo A rígido, e = 10 centímetros y nudo A flexible. Las tracciones máximas en solera y cajero son muy similares, oscilando entre 2 kp/cm<sup>2</sup> y 3 kp/cm<sup>2</sup>, en cualquier caso de menor entidad que las debidas al hinchamiento.

La superposición del hinchamiento con la carga de agua, respondería a una situación más dudosa, en la cual las filtraciones hubieran producido el hinchamiento del suelo, pero sin subpresión sobre el revestimiento del canal. De todos modos, se ha representado dicha superposición, en ambos casos límites, en la figura 7, observándose que el cajero se encuentra en una situación similar en ambos casos (tracción

# COMPARACION ENTRE UN CANAL TRAPEZOIDAL Y OTRO CIRCULAR EN TERRENOS EXPANSIVOS

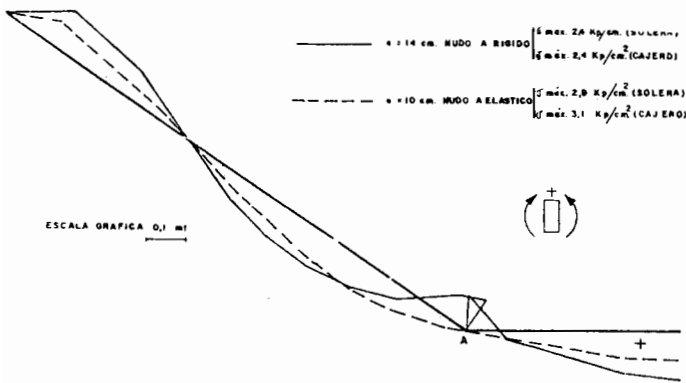


Figura 6.—Ley de momentos flectores sobre el revestimiento debido a la cara de agua.

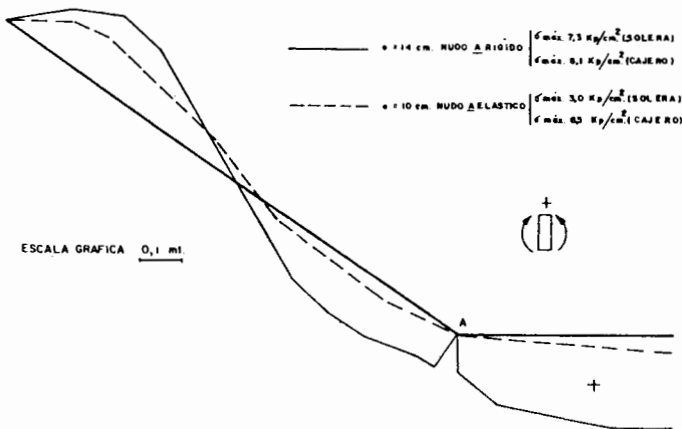


Figura 7.—Ley de momentos flectores sobre el revestimiento debidos al hinchamiento más carga de agua.

máxima del orden de 6 kp/cm<sup>2</sup>) y la solera está bastante menos solicitada con junta elástica y espesor e = 10 centímetros. (3 kp/cm<sup>2</sup> frente a 6 kp/cm<sup>2</sup>). Esta conclusión es similar a la que se deduce del análisis de la figura 3, en donde el cajero se encuentra solicitado con una tracción similar en las diferentes hipótesis (4 a 5 kp/cm<sup>2</sup>), y es la solera la que se alivia con la colocación de la junta elástica en A.

### 3.3. Sección circular

En la figura 8 aparecen las leyes de corrimientos y en la figura 9 la ley de momentos flectores sobre el revestimiento de hormigón debidos exclusivamente al hinchamiento del terreno por saturación. En la figura 10 se incluye la ley de axiles.

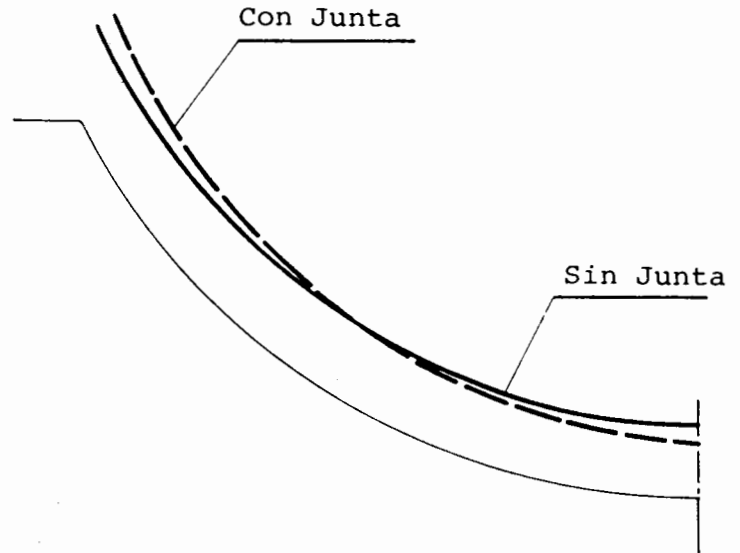


Figura 8.—Corrimientos nodales (mm) expansividad.

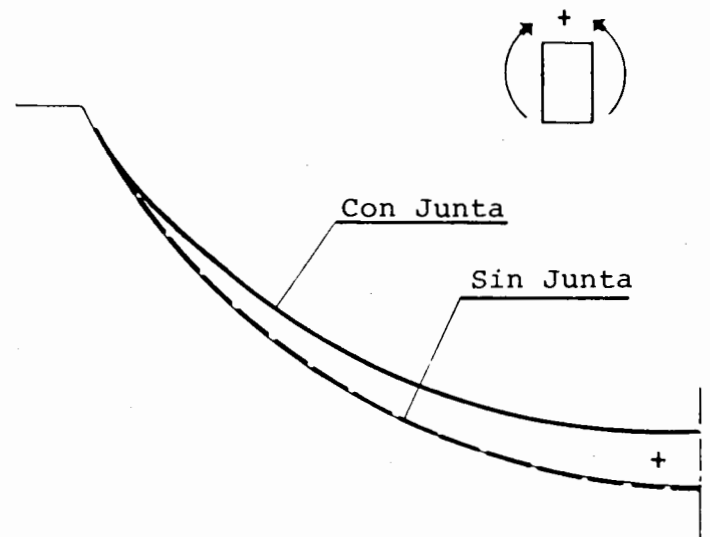


Figura 9.—Ley de momentos flectores debidos a la expansividad (m. Ton.).

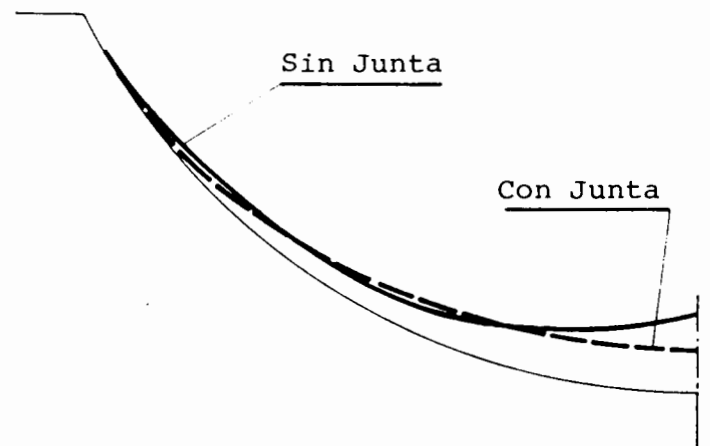


Figura 10.—Ley de axiles (Ton) debidos a la expansividad.

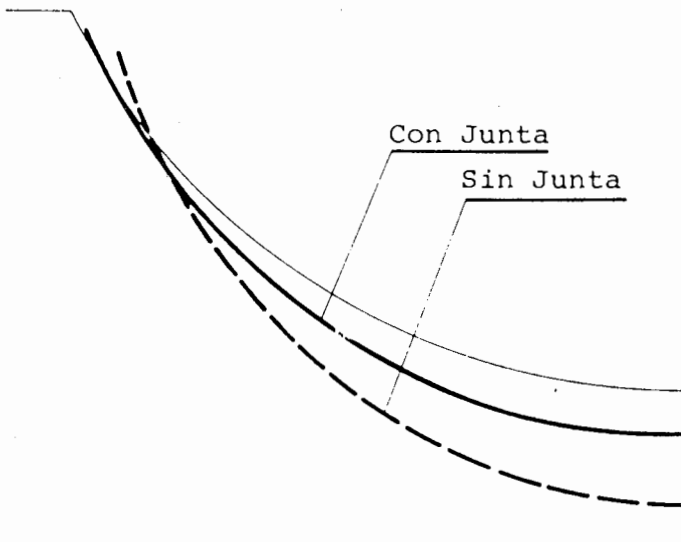


Figura 11.—Corrimientos nodales (mm) carga de agua.

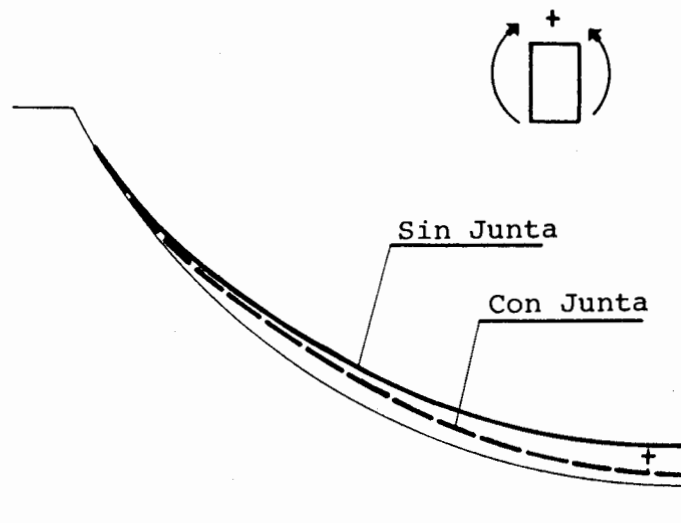


Figura 12.—Momentos flectores debidos a la carga de agua (m. Ton.).

Hay que destacar varias cosas. En primer lugar la deformada es ligeramente diferente según haya o no junta en la base. La mayor rigidez transversal del revestimiento con junta coacciona lateralmente al suelo de tal manera que el hinchamiento tiende al edométrico. En cambio la presencia de la junta permite una flexibilidad transversal que disminuye ligeramente el levantamiento del fondo del canal.

En segundo lugar la presencia de la junta es completamente beneficiosa para el revestimien-

to que pasa de trabajar a flexión a trabajar casi exclusivamente a compresión.

Puede señalarse que el efecto más pernicioso de la ausencia de junta viene marcado por el valor importante que alcanzan las tensiones tangenciales que introducen tensiones principales de tracción muy próximas a la rotura del material. En cambio una vez ubicada la junta se reducen casi a la décima parte.

Parece inferirse que en el caso de construir el canal sin junta inferior se provocaría una natural, por rotura combinada a flexión y cortante en el tramo inferior del círculo pero no exactamente en el centro, generando dos paralelas a lo largo de la generatriz del canal con expansividades muy moderadas. Por el contrario la casi total ausencia de flexiones en el canal con junta lo hacen capaz de resistir expansividades muy superiores a las planteadas.

#### 4. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos hasta el presente puede inferirse que la sección trapezoidal funciona básicamente a flexión. De ahí que su comportamiento mejore con espesores más reducidos porque al flexibilizarse genera tensiones inferiores en el hormigón.

La sección circular sin junta presenta también flexiones aunque menos importantes que la trapezoidal. Las tensiones son ligeramente inferiores.

En cambio la sección circular con junta opera prácticamente con ausencia de flexiones trabajando básicamente a compresión con tensiones muy reducidas. Mantiene un simil al arco invertido triarticulado funcionando como antifunicular. Este comportamiento la hace idónea para trabajar en terrenos de expansividad más elevada.

Falta aún por analizar su comportamiento con una ley de expansividad no uniforme y con diferentes espesores de relleno pero a la vista de los resultados obtenidos puede afirmarse que su empleo permitirá el ahorro en material inerte de relleno en suelos fuertemente expansivos.

La solución definitiva propuesta para el canal de Calanda es por consiguiente la sección

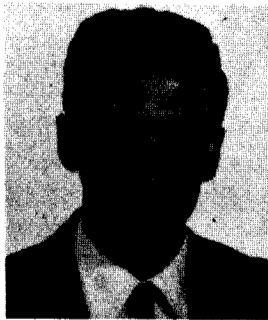
circular tipo Barragan con una junta longitudinal en el centro de la solera.

### BIBLIOGRAFIA

- JUSTO, J. L., SAURA, J.: «A Finite Element Method to Design and Calculate Pier Foundations in Expansive-collapsin Soils». 5.<sup>a</sup> International Conference on Expansive Soils, Adelaida, mayo 1984.
- JUSTO, J. L., SAURA, J. y MANZANARES, J. L.: «A FEEM for Lined Canals on Expansive-collapsing Soil». Congreso Internacional de Mecánica del Suelo. San Francisco 1984.
- SAURA, J., JUSTO, J. L. y MANZANARES, J. L.: «El Canal de Calanda»: Una Aplicación del Método de E.F. al estudio del Efecto de los Fenómenos Expansivos de los Suelos sobre Canales». Anales de Ingeniería Mecánica, Año I, n.º 1, 1983.

---

#### José Luis Manzanares Japón



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Promoción de 1964. Catedrático numerario de Estructuras II de la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla desde 1975.

Director Técnico de AYESA, empresa consultora desde la que ha dirigido importantes proyectos de grandes presas y otras obras hidráulicas. Es especialista en modelos matemáticos, es autor de

diversas publicaciones y comunicaciones a congresos. Ha dirigido diversos cursos de especialización del Colegio de I.C.C.P.

---

---

#### 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 Hidro-

gráfica 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.

---

---

#### 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 seis 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.

---