

Modelización de los asentos de un terraplén construido sobre un suelo blando reforzado con columnas de grava

LUIS SOPEÑA MAÑAS (*); JOSÉ ESTAIRE GEPP (*)

RESUMEN Se presentan dos métodos diferentes para estudiar el comportamiento resistente y deformacional de un suelo blando reforzado con columnas de grava utilizando el método de los elementos finitos. En el primer método, el suelo blando reforzado con columnas de grava se trata como un material compuesto, caracterizado con un grupo único de parámetros que definen su comportamiento. En el segundo método, las columnas de grava se modelizan individualmente en dos dimensiones con sus propios parámetros, diferentes de los que corresponden a un suelo blando. Los dos métodos se han desarrollado utilizando las teorías de Priebe (1978) y Van Impe (1983), sobre el refuerzo de suelos blandos. A fin de verificar la validez de los métodos presentados, los resultados numéricos obtenidos se comparan con las medidas realizadas en un caso real.

MODELITATION OF THE SETTLEMENTS OF AN EMBARTEMENT ON A SOFT SOIL REINFORCED WITH STORE COLUMNS

ABSTRACT Two different methods to study the strength and deformational behaviour of a soft soil reinforced with stone columns using the finite element method are presented. In the first one, the soft soil reinforced with stone columns is treated as a composite material, with a unique group of parameters defining its behaviour. In the second method, the stone columns are modelled individually in a 2-D mesh, with its own parameters, different from the ones corresponding to the soft soil. Both methods have been developed using the theories by Priebe (1978) and Van Impe (1983), regarding the reinforcement of soft soils. With the aim of checking the validity of the methods presented, the numerical results have been compared with the data obtained in a real case.

Palabras clave: terraplén; asentos; suelo blando; columnas de grava; elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de la Circunvalación de Huelva requería la construcción de un terraplén de 5,5 m de altura en una zona formada por una capa de unos 11 m de espesor de arcilla muy blanda, situada sobre un estrato de arcilla muy rígida. Por razones de estabilidad y deformabilidad fue necesario reforzar el suelo natural. El tratamiento de refuerzo consistió en la ejecución de columnas de grava de 1 m de diámetro, distribuidas en una malla triangular, teniendo cada columna un área de influencia de 3 m² y estando apoyada en el estrato de arcilla muy rígida. Durante la construcción del terraplén, se midieron los asentos producidos y se compararon con los resultados obtenidos de los cálculos realizados utilizando el método de los elementos finitos.

2. DATOS DEL PROBLEMA

La geometría del problema ya se ha quedado definida anteriormente. El terraplén se construyó en cuatro etapas, que

alcanzaron los 2, 3,5, 4,5 y 5,5 m de altura después de 65, 110 y 200 días desde el comienzo de la construcción. Durante la construcción del terraplén, se midieron los asentos del suelo reforzado mediante una línea continua de asentos, situada en el contacto suelo natural-terraplén. De todas las mediciones de asentos realizadas, solamente se ha seleccionado una medición por cada etapa de construcción para compararla con los resultados numéricos, correspondiendo respectivamente a 40, 90, 150 y 475 días medidos desde el comienzo de la construcción. Los parámetros de los materiales presentes en el problema se recogen en la siguiente tabla:

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (kPa)	μ	C_r (m ² /s)
Suelo Natural	17,5	25	0	-	-	3×10^{-8}
Terraplén	20	20	30	50000	0,3	-
Grava	18	0	40	30000	0,3	-

TABLA 1. Parámetros de los materiales.

(*) Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Alfonso XII nº3, 28014 Madrid (España)

3. DESCRIPCIÓN DEL PRIMER MÉTODO (MODELO DEL MATERIAL COMPUESTO)

El primero método consiste en tratar el suelo blando reforzado con columnas de grava como un material compuesto, caracterizado por un único grupo de parámetros que definen su comportamiento tensional y deformacional. La única dificultad del método es el cálculo de los parámetros, que puede hacerse como se explica a continuación.

3.1. PARÁMETROS DEL SUELO

Los parámetros de resistencia del material compuesto (ϕ^* y c^*) se calculan de acuerdo al método desarrollado por Priebe (1978), tal como se recoge en Mitchell (1981), utilizando las siguientes expresiones:

$$\tan \phi^* = m \tan \phi_c + (1-m) \tan \phi_s ; c^* = (1-m) c_s \quad (1)$$

donde c_s y ϕ_s son los parámetros de resistencia del suelo natural no reforzado y ϕ_c es el ángulo de rozamiento de la grava de las columnas. El parámetro "m" representa la distribución tensional relativa entre el suelo blando y las columnas, cuyo cálculo puede hacerse utilizando la teoría desarrollada por Van Impe (1983). En el caso analizado aquí, el factor de sustitución (n) es 0,26, por lo que m toma un valor de 0,54. Con este valor de "m", se obtuvieron los siguientes parámetros de resistencia del material compuesto: $\phi^*=24,5^\circ$; $c^*=11,5$ kPa.

Los parámetros deformacionales se dedujeron de un análisis retrospectivo de las curvas carga-asiento, utilizando directamente la teoría edométrica ($S = H \Delta \sigma / E_m$). Aplicando los valores correspondientes, se obtuvo un módulo edométrico de 3750 kPa, que implica, suponiendo un coeficiente de Poisson de 0,33, un módulo elástico de Young (E), tal como se necesita en los cálculos, de 2500 kPa. Los parámetros deformacionales del suelo natural se calcularon utilizando las mismas expresiones, pero teniendo en cuenta el "factor de reducción de asiento" (β) de la teoría de Van Impe. En este caso, de acuerdo a Van Impe (1983), β tiene un valor de 0,5, por lo que el módulo edométrico del suelo natural es de unas 1900 kPa. Considerando un coeficiente efectivo de Poisson de 0,35 para los materiales sin drenaje, el módulo elástico de Young necesario en los cálculos es de 1250 kPa.

Los parámetros de consolidación del material compuesto (C_v y C_r) se dedujeron de acuerdo a las siguientes etapas:

- Conocido el coeficiente de consolidación radial (C_r) del suelo natural y utilizando la teoría de consolidación radial, teniendo en cuenta que las columnas de grava actúan como poderosos drenes verticales, se obtiene el grado de consolidación (U) para diferentes tiempos. Se desprecia la consolidación vertical.
- Utilizando la teoría de consolidación de Terzaghi, se calcula el coeficiente de consolidación (C_v) del material compuesto para obtener, para los mismos tiempos usados anteriormente, el mismo grado de consolidación obtenido con la consolidación radial, teniendo en cuenta el espesor total de la capa impermeable.
- La permeabilidad en la dirección (K_x) se obtienen utilizando las expresiones tomadas de la teoría de consolidación de Terzaghi ($K = C_v \cdot \gamma_w / E_m$) donde γ_w es la densidad del agua y E_m es el módulo edométrico del suelo.
- La permeabilidad del material compuesto en la dirección horizontal se consideró igual a la correspondiente a la dirección vertical.

Para este caso, teniendo en cuenta el tratamiento de refuerzo proyectado y que el coeficiente de consolidación radial del suelo natural era 3×10^{-8} m²/s, deducido de ensayos de piezocono (CPTU), la permeabilidad vertical y horizontal obtenida fue de $2,5 \times 10^{-3}$ m/s, que se puede considerar una permeabilidad elevada que va a hacer que la consolidación sea muy rápida.

3.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Los cálculos se han realizado utilizando una malla de elementos finitos formada por 194 elementos triangulares de 15 nodos. En la figura 1 se muestra la malla deformada después de la ejecución completa del terraplén. Se puede observar que el suelo reforzado tiene un asiento bastante uniforme bajo la carga. El asiento máximo se localiza hacia la mitad del terraplén. En la figura 2 se presenta la comparación entre los movimientos verticales medidos y calculados. Se debe resaltar el buen ajuste logrado con el cálculo lo que prueba que este método puede utilizarse para estudiar el comportamiento global de un suelo blando reforzado con columnas de grava.

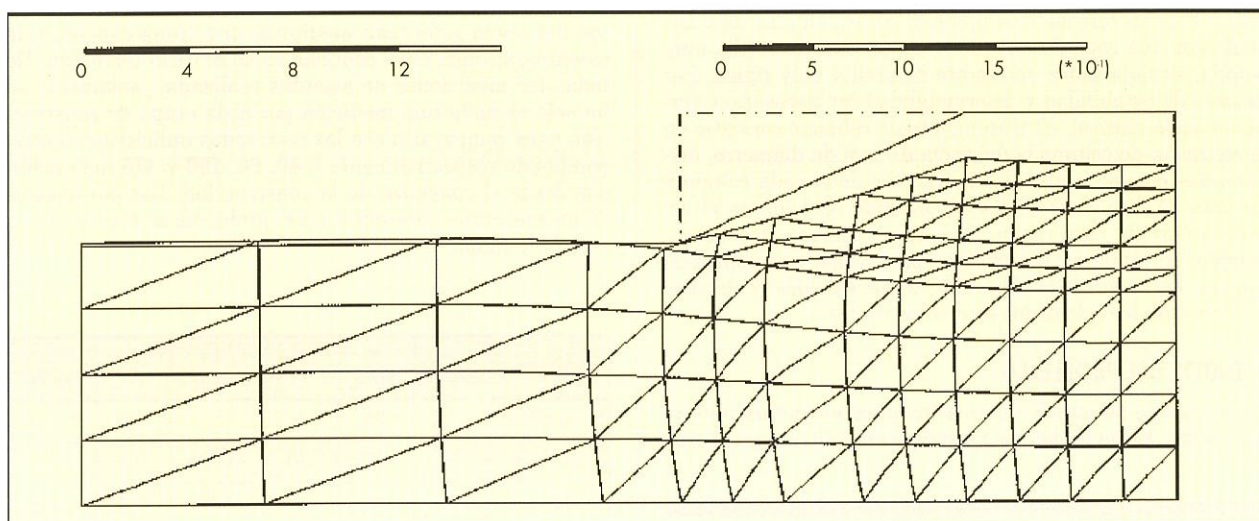


FIGURA 1. Deformada de la malla después de la construcción del terraplén (1^{er} método).

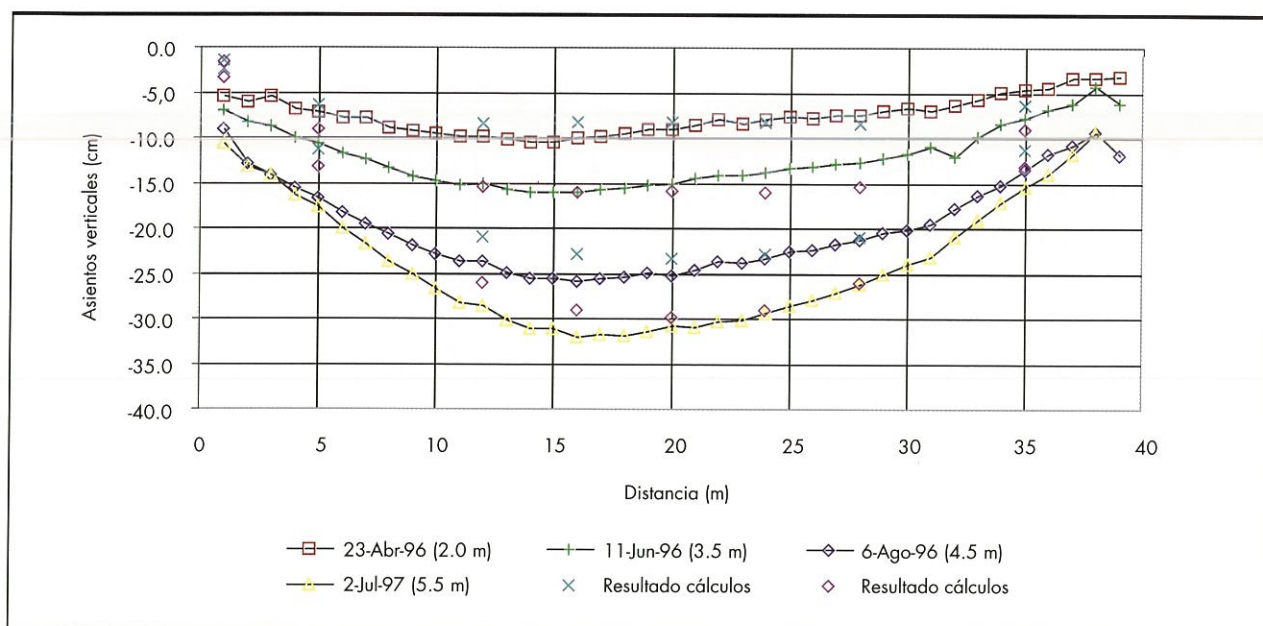


FIGURA 2. Comparación entre medidas reales y resultado de los cálculos.

4. DESCRIPCIÓN DEL SEGUNDO MÉTODO (MODELO DE SUELO Y COLUMNAS DE GRAVA)

El segundo método consiste en modelizar las columnas de grava individualmente en una malla bidimensional, con sus propios parámetros, diferentes de los correspondientes al suelo blando.

4.1. PARÁMETROS DE LOS MATERIALES

Los parámetros utilizados en los cálculos se indican en la Tabla 1. Los parámetros deformacionales del suelo natural se han calculado en el Apartado 3.1.2. La permeabilidad de la grava en ambas direcciones se ha considerado igual a 10^{-6} m/s. La grava se ha considerado que tiene un ángulo de dilatación de 10° .

4.2. MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

El problema de este método es dibujar la malla en dos dimensiones, cuando el problema es claramente tridimensional. Para solventar este inconveniente, se utiliza el método descrito en Van Impe (1983). Este método implica fundamentalmente mantener, en la malla dibujada, el valor del factor de sustitución. Sin embargo, la situación real es una malla triangular, no una cuadrangular, por lo que es necesario una transformación previa, manteniendo también el valor del factor de sustitución.

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS

Los asentamientos del terraplén obtenidos con los parámetros mencionados anteriormente fueron alrededor de un 65% me-

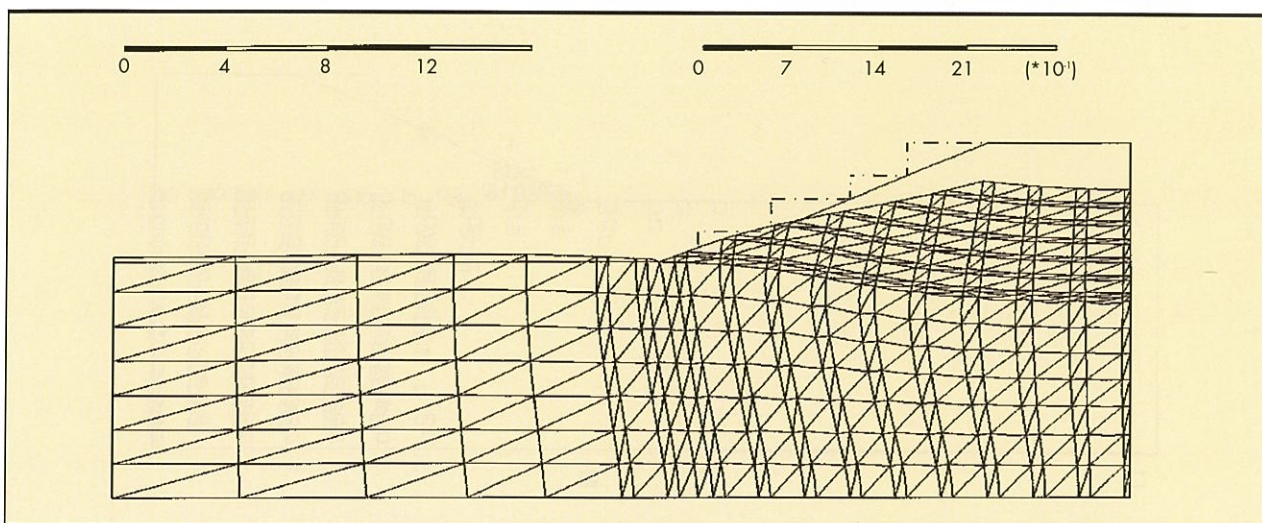


FIGURA 3. Deformada de la malla después de la construcción del terraplén (2º método).

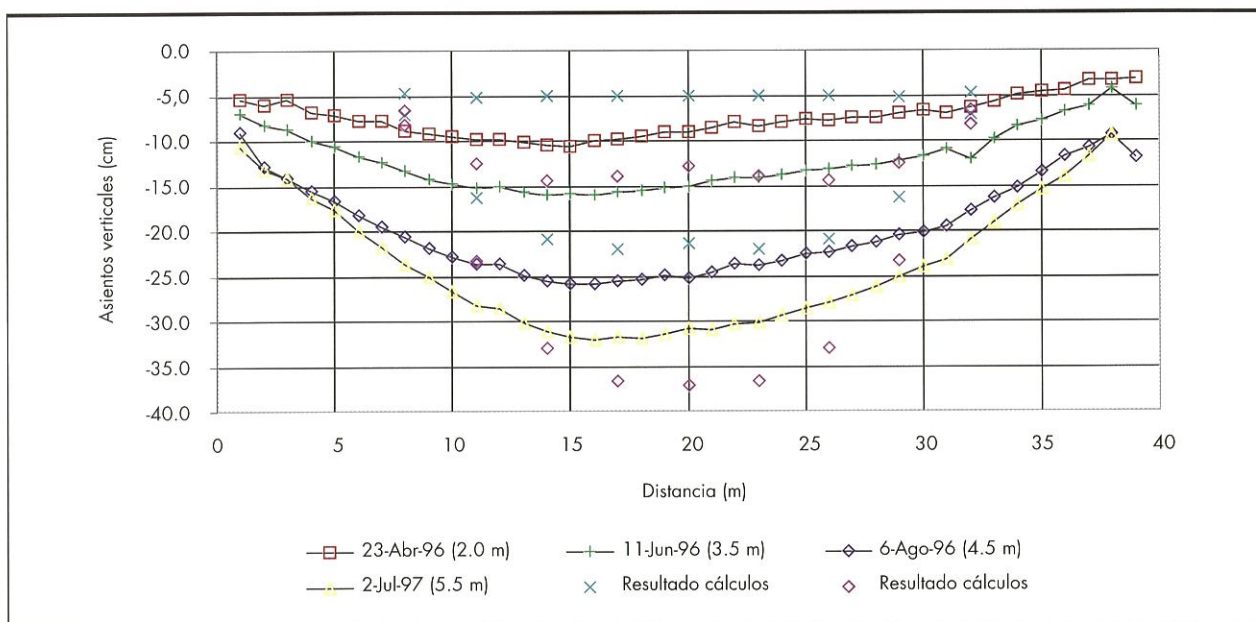


FIGURA 4. Comparación entre medidas reales y resultado de los cálculos (2° método).

nores que los medidos. Esto indica que esta forma de modelizar el problema produce una situación más rígida que la realidad. Para evitar esta falta de acuerdo, el módulo elástico del suelo natural se dividió por 2,5. En la figura 3 se muestra la deformada de la malla después de la ejecución del terraplén. El hecho más destacable de los resultados del cálculo es que las columnas de grava situadas bajo el terraplén han aumentado su espesor debido al comportamiento dilatante de la grava. Este hecho concuerda con la hipótesis realizada en la teoría de Van Impe (1983). Por su parte, en la figura 4 se compara el movimiento vertical, medido en la realidad y el obtenido de los cálculos. En esta ocasión, la re-

producción de los movimientos obtenidos con el cálculo no es tan buena como en el Método 1. En las primeras etapas, la presencia de las columnas hace que el terreno de cimentación sea más rígido que la realidad; sin embargo, en las últimas etapas de la construcción la plastificación de las columnas produce mayores asentamientos verticales que los medidos en la realidad.

En la figura 5 se muestran los puntos plastificados después de la ejecución del terraplén. Se puede ver que las únicas partes de la malla que están en situación de plastificación son las columnas de grava, tal como se supone en la teoría de Van Impe. Este hecho indica que las columnas de

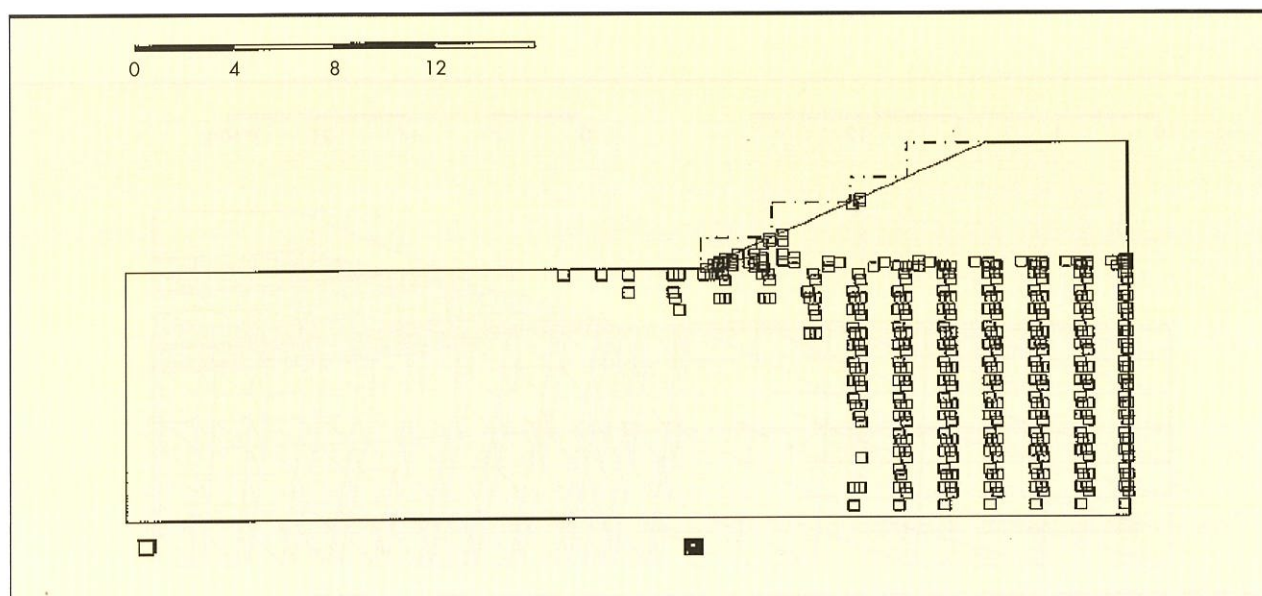


FIGURA 5. Puntos plastificados en la malla (2° método).

grava están soportando la mayor parte de la carga del terraplén. En relación a este hecho, en la teoría de Priebe aparecen dos factores de distribución de cargas (μ_s para el suelo y μ_c para las columnas), que se pueden calcular mediante las siguientes expresiones:

$$\mu_s = \frac{A}{(A - A_c) + n A_c}; \mu_c = \frac{A}{(A - A_c)/n + A_c}$$

Con los datos del problema, esos factores toman los siguientes valores: $\mu_s=0,62$ y $\mu_c=2,07$. Con los resultados obtenidos de los cálculos, el valor de esos factores es 0,36 y 2,78, respectivamente. Ambos grupos de cifras son de la misma magnitud, lo que indica un buen acuerdo general.

5. CONCLUSIONES

- Los dos métodos descritos pueden utilizarse para calcular el comportamiento tensional y deformacional de un suelo blando reforzado con columnas de grava.
- Los resultados obtenidos pueden considerarse una forma de validar las teorías de Priebe y Van Impe para calcular

el comportamiento de un suelo blando reforzado con columnas de grava.

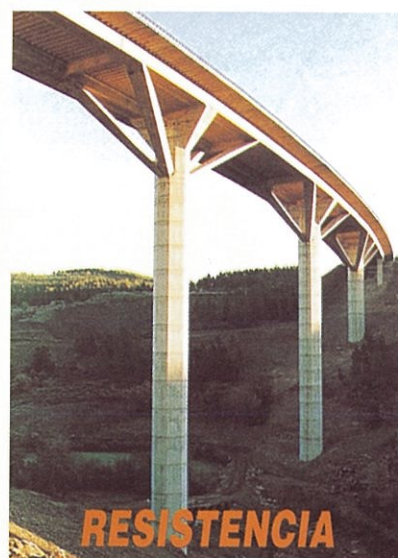
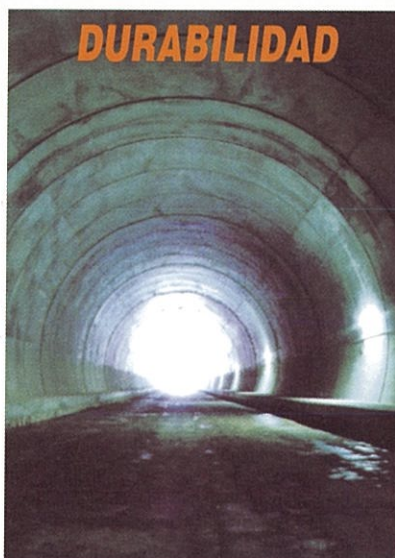
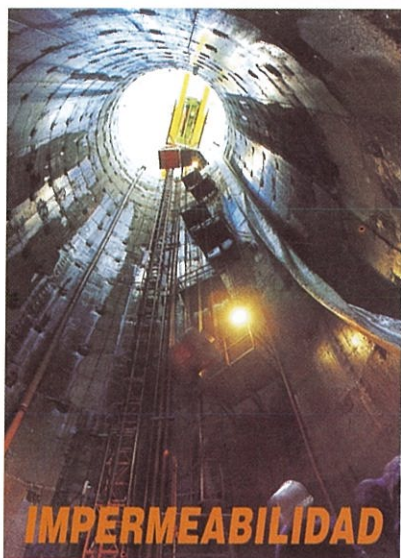
- La principal desventaja del primer método (modelo de material compuesto) es la necesidad de realizar cálculos previos de todos los parámetros del material compuesto. Además, este método no permite el análisis del comportamiento de las columnas de grava de forma aislada.
- La aplicación directa del segundo método (modelo de suelo y columnas de grava) produce una situación más rígida que la realidad. La principal ventaja de este método es la posibilidad de analizar el comportamiento de las columnas de grava de forma aislada.

6. REFERENCIAS

MITCHELL, J.K. 1981. *Suelo Improvement - State of the Art Report*. Proc. Xth Int. Conf. Suelo Mech. y Found. Eng. Stockholm.

VAN IMPE, W. & DE BEER, E. 1983. *Improvement of asiento behaviour of blando layers by means of columnas de grava*. Proc. VIIIth Conf. Suelo Mech. y Found. Eng. Helsinki. pp. 309-312.

MICROSILICE ADICION PARA HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES



FERROATLANTICA

Fábrica de Sabón • Polígono Industrial de Sabón • 15142 Arteixo
La Coruña • Telf.: 981 60 06 75 • Fax: 981 60 13 06

Pedidos y comercial: Paseo de la Castellana, 86 - 6º • 28046 Madrid
Telf.: 915 90 32 19 • Fax: 915 63 91 07

