

APLICACION DE LA TEORIA GENERALIZADA DE LA PLASTICIDAD A LA MODELIZACION TENSODEFORMACIONAL DE LA ARCILLA DEL NUCLEO DE LA PRESA DE CANALES (GRANADA)

JOSE ESTAIRES GEPP (*)
M.º EUGENIA MARTIN BAANANTE (**)
M.º TERESA MATEOS GARCIA (***)

RESUMEN. El objetivo principal de este trabajo es modelizar el comportamiento de la arcilla del núcleo de la Presa de Canales, a partir de una serie de ensayos triaxiales consolidados no drenados realizados en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. De esta manera, una vez definido el modelo, éste se puede implementar en un programa de elementos finitos que reproduzca el estado tensodeformacional de la presa.

Los resultados obtenidos con el modelo propuesto se han comparado con los proporcionados por otras leyes constitutivas existentes en la literatura como son el modelo de Cam-clay, Cam-clay modificada y un modelo de arcilla blanda enmarcado en la Teoría Generalizada de la Plasticidad.

ABSTRACT. *The main aim of this work is to model the behaviour of the clay core in the Canales Dam, on the basis of a serie of undrained consolidated triaxial tests carried out in the Geotechnical Laboratory of the CEDEX. Once the model has been defined in this way, it can be included in a finite elements programme which reproduces the stress/strain state of the dam.*

The results obtained from the proposed model, have been compared with those of other constitutive laws that have appeared in the relevant literature, such as the Cam-clay model, the modified Cam-clay model and a soft-clay model included in the General Theory of Plasticity.

1. DESCRIPCION DEL MATERIAL Y ENSAYOS REALIZADOS

El material ensayado es una arcilla cuyos límites de Atterberg son:

- Límite líquido: 63,81 %.
- Límite plástico: 27,10 %.
- Índice de plasticidad: 36,71 %.

Los ensayos triaxiales, que se pretenden modelizar, se realizaron en probetas cilíndricas de 5,08 cm de diá-

metro y 10,16 cm de longitud, con muestras remoldeadas en laboratorio con una densidad de 1,6 gr/cm³ y humedad del 20 %, valores coincidentes a los de su puesta en obra. El material se consolidó bajo presiones efectivas de confinamiento de 300 y 500 kPa.

Además se llevaron a cabo ensayos edométricos y de columna resonante con el fin de obtener los parámetros elásticos de este material. Las muestras para estos ensayos se prepararon en las condiciones de densidad y humedad anteriormente indicadas.

2. MODELO PROPUESTO

El modelo que aquí se propone ha sido desarrollado en el contexto de la Teoría Generalizada de Plasticidad introducida por Zienkiewicz y Mroz (1984), Mroz y Zienkiewicz (1984) y posteriormente utilizada por Pastor y

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Geotecnia. CEDEX.

(**) Licenciado en Ciencias Físicas. Laboratorio de Geotecnia. CEDEX.

(***) Licenciado en Ciencias Geológicas. Laboratorio de Geotecnia. CEDEX.

Zienkiewicz (1986) y Pietruszczak y Stolle (1986) para formular leyes constitutivas de una gran sencillez y potencia.

A partir de una serie de consideraciones sobre las deformaciones producidas en estados de carga neutra ($\underline{n}; d\sigma' = 0$) se puede demostrar, tal y como venía siendo aceptado en la Teoría Clásica de Plasticidad, la validez del principio de superposición de los incrementos elástico y plástico de deformación correspondiente a un incremento de carga $d\sigma'$. Así pues, el incremento de deformación total vendrá dado por la siguiente expresión:

$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p \quad (1)$$

donde el tensor de los incrementos elásticos viene definido por:

$$d\epsilon^e = D^{-1}; d\sigma \quad (2)$$

siendo D^{-1} un tensor de cuarto orden; los incrementos plásticos se calculan mediante la siguiente expresión:

$$d\epsilon^p = 1 / H_L \cdot \underline{n}_g \cdot (\underline{n} : d\sigma) \quad (3)$$

donde H_L es una magnitud escalar conocida con el nombre de módulo plástico en carga; $\underline{n}_g$ un vector unitario que indica la dirección del flujo plástico, y $\underline{n}$ otro vector unitario que en el contexto de la Teoría Generalizada de Plasticidad se utiliza como discriminante de los procesos de carga y descarga.

En todo el desarrollo que sigue se ha supuesto, de acuerdo con la hipótesis básica de la Plasticidad Asociada, que $\underline{n}_g = \underline{n}$. Asimismo se supone que el material es isotrópico por lo que los incrementos de tensión y deformación obtenidos en los ensayos triaxiales vienen completamente definidos por los invariantes dp' , dq y sus correspondientes $d\epsilon_v$, $d\epsilon_s$.

$$dp' = 1/3 \operatorname{tr}(d\sigma') = 1/3 (d\sigma'_1 + 2 d\sigma'_2)$$

$$dq = \sqrt{3 J_2(d\sigma')} = d\sigma'_1 - d\sigma'_2$$

$$d\epsilon_v = \operatorname{tr}(d\epsilon) = d\epsilon_1 + 2 d\epsilon_2$$

$$d\epsilon_s = (2/\sqrt{3}) \sqrt{J_2(d\epsilon)} = 2/3 (d\epsilon_1 - d\epsilon_2)$$

De acuerdo con la Ec. 1 se verificará que:

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p$$

$$d\epsilon_s = d\epsilon_s^e + d\epsilon_s^p$$

siendo la deformación elástica volumétrica:

$$d\epsilon_v^e = dp' / K \quad (4)$$

y la deformación elástica desviadora:

$$d\epsilon_s^e = dq / (3 \cdot G) \quad (5)$$

donde K y G representan los módulos elásticos volumétrico y de deformación tangencial, respectivamente.

Una vez definida la dirección del flujo plástico mediante una ley de dilatación δ tal que:

$$\delta = \delta(p', q) = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_s^p}$$

las componentes n_{gv} , n_{gs} del vector unitario $\underline{n}_g$ de la Ec. 3 vendrán dadas por:

$$n_{gv} = \frac{\delta}{\sqrt{1 + \delta^2}}$$

$$n_{gs} = \frac{1}{\sqrt{1 + \delta^2}}$$

De esta manera, siempre que se conozca el valor del módulo plástico H_L se pueden obtener a partir de la Ec. 3 las componentes plásticas del vector deformación ($d\epsilon_v^p$, $d\epsilon_s^p$) correspondientes a cada incremento de carga (dp' , dq).

$$d\epsilon_v^p = \frac{1}{H_L} \cdot \frac{\delta \cdot (\delta \cdot dp' + dq)}{(1 + \delta^2)} \quad (6)$$

$$d\epsilon_s^p = \frac{1}{H_L} \cdot \frac{\delta \cdot dp' + dq}{(1 + \delta^2)} \quad (7)$$

Es inmediato comprobar que asociado al vector unitario $\underline{n}_g$ existe un potencial plástico $q = q(p')$ definido por la ecuación diferencial:

$$\frac{dq}{dp'} = -\delta(p', q) \quad (8)$$

En el marco teórico general así definido se ha caracterizado el modelo propuesto mediante los siguientes parámetros y funciones.

2.1. MODULOS ELASTICOS

Se han adoptado los módulos elásticos de deformación tangencial, G , obtenidos en la columna resonante e indicados en la figura 1.

A partir del valor de G , se ha obtenido el valor del módulo elástico volumétrico suponiendo un coeficiente de Poisson (μ) de 0,3.

$$K = \frac{2 \cdot (1 + \mu)}{3 \cdot (1 - 2 \mu)} \cdot G$$

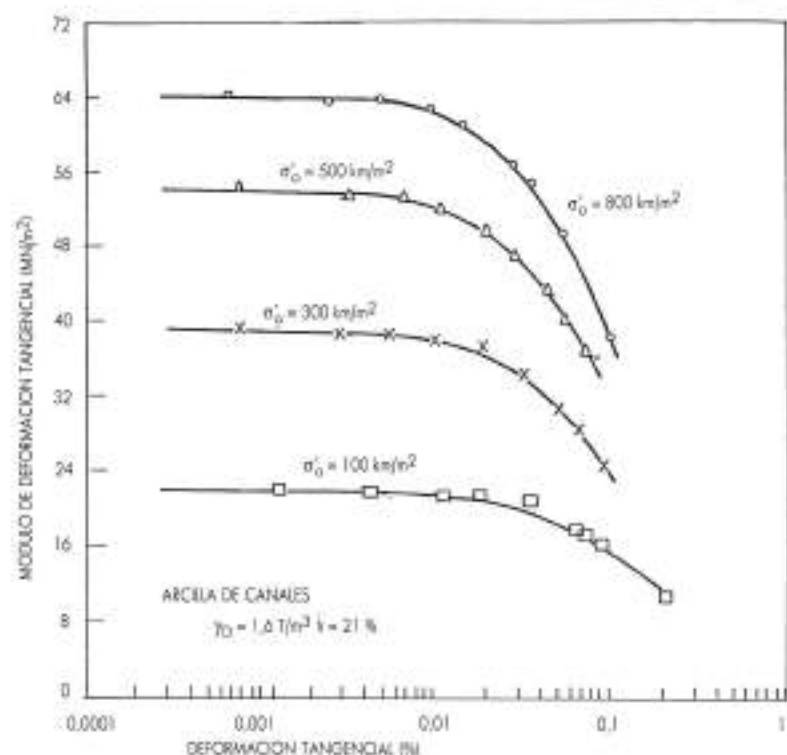


FIGURA 1. Ensayos de columna resonante realizados a diferentes presiones de confinamiento con la arcilla saturada de Canales IV. Cuéllar, 1989.

2.2. LEY DE DILATANCIA

Se propone la siguiente ley hiperbólica:

$$\delta = \frac{0,56 \cdot M^2 - 0,225 \cdot M \cdot \sqrt{2,25 \cdot M^2 + 4\eta^2}}{\eta}$$

donde M es la pendiente de la línea del estado crítico y η es la relación q/p' .

En la figura 2 se ha dibujado la ley de dilatación y la elipse representación del potencial plástico asociado a esa ley mediante la ecuación 8.

2.3. MODULO PLASTICO

Se ha seguido una formulación similar a la desarrollada por M. Pastor et al. (1989) en la que se postula un módulo plástico H_L definido de la siguiente manera:

$$H_L = H_0 \cdot f(\eta)$$

donde H_0 representa el módulo plástico en compresión isotrópica

$$H_0 = \frac{1 + e}{\lambda - \kappa} \cdot p'$$

en esta expresión λ y κ son respectivamente las pen-

dientes de las ramas noval y de descarga de los ensayos edométricos, e es el índice de poros y $f(\eta)$ es una función de interpolación que adopta el valor unidad cuando $\eta = 0$ y se anula para $\eta = M$ (línea de estado crítico).

En el presente modelo se propone como función de interpolación la siguiente parábola:

$$f(\eta) = 1 - \left[\frac{\eta}{M} \right]^2$$

Se han utilizado los valores de λ y κ indicados en la figura 3 correspondientes a un ensayo edométrico suficientemente representativo del comportamiento de la arcilla en estado saturado.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En las figuras 4 y 5 se presentan los ajustes obtenidos al tratar de reproducir los resultados de los ensayos triaxiales tanto con el modelo propuesto como con las leyes constitutivas que se comentan a continuación. En cada una de ellas se indica la ley de dilatación y el módulo plástico que las caracteriza. Se han adoptado para todas ellas los parámetros λ , κ y los módulos elásticos definidos en el apartado anterior.

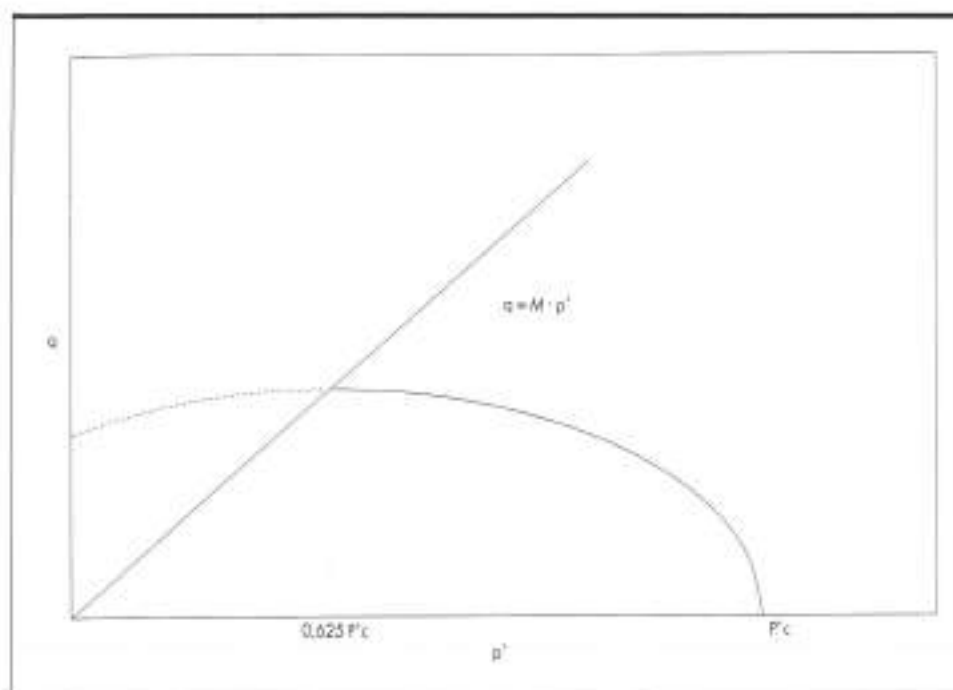


FIGURA 2. Ley de dilatación y potencial plástico del modelo propuesto.

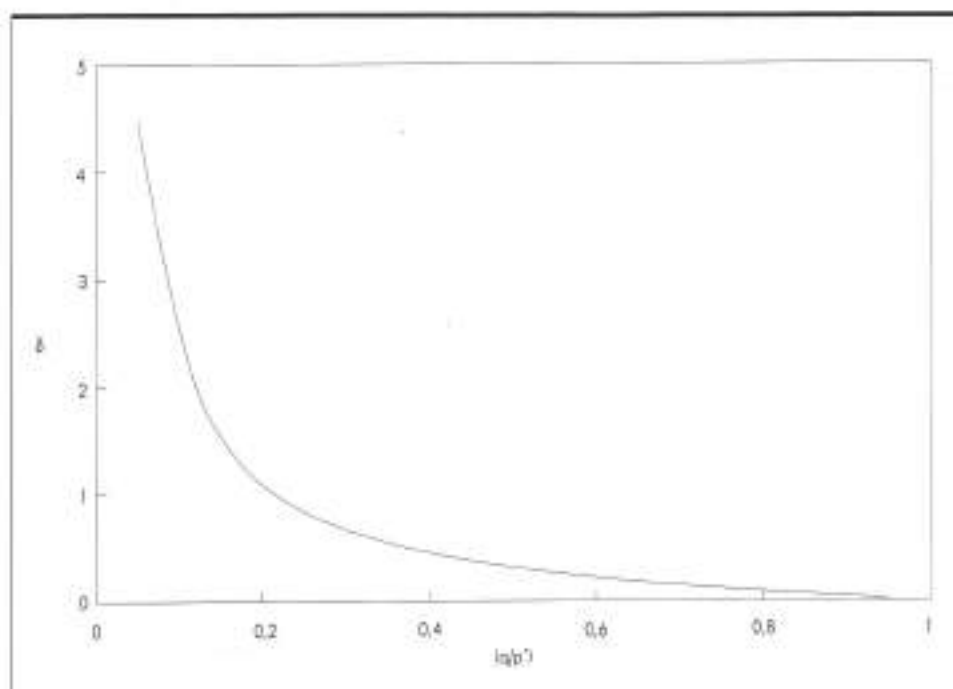


FIGURA 2A. Ley de dilatación.

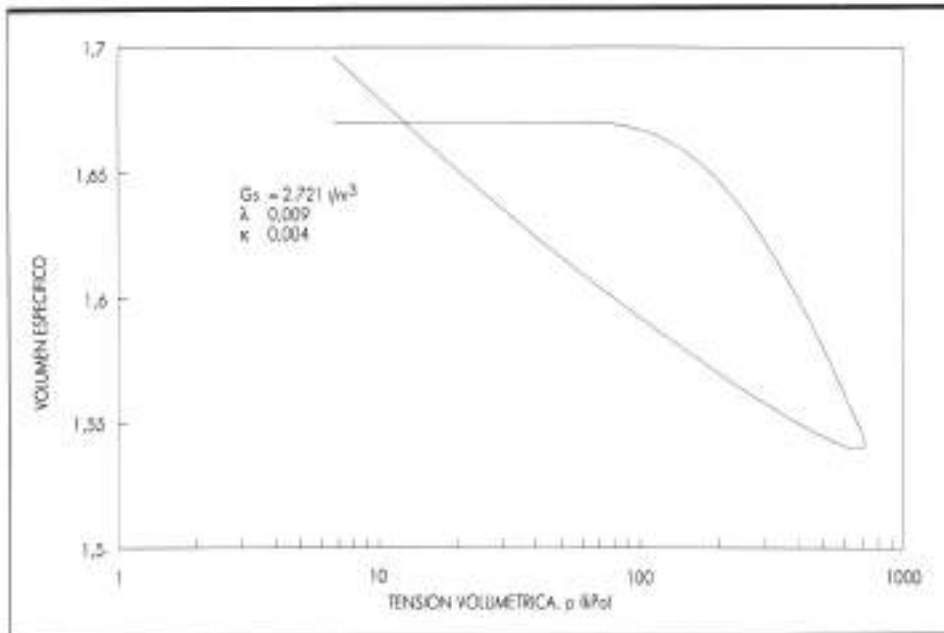


FIGURA 3. Ensayo edométrico realizado con la arcilla saturada de Canales.

3.1. MODELO DE CAM-CLAY (Schofield and Wroth, 1968)

$$\delta = M - \eta$$

$$H_L = \frac{1+e}{\lambda - \kappa} \cdot p' \cdot M \cdot \frac{\delta}{1 + \delta^2}$$

3.2. MODELO DE CAM-CLAY MODIFICADO (Burland, 1965; Roscoe y Burland, 1968)

$$\delta = \frac{M^2 - \eta^2}{2 \cdot \eta}$$

$$H_L = \frac{1+e}{\lambda - \kappa} \cdot p' \cdot \frac{\delta \cdot (M^2 - \eta^2)}{2 \cdot \eta \cdot (1 + \delta^2)}$$

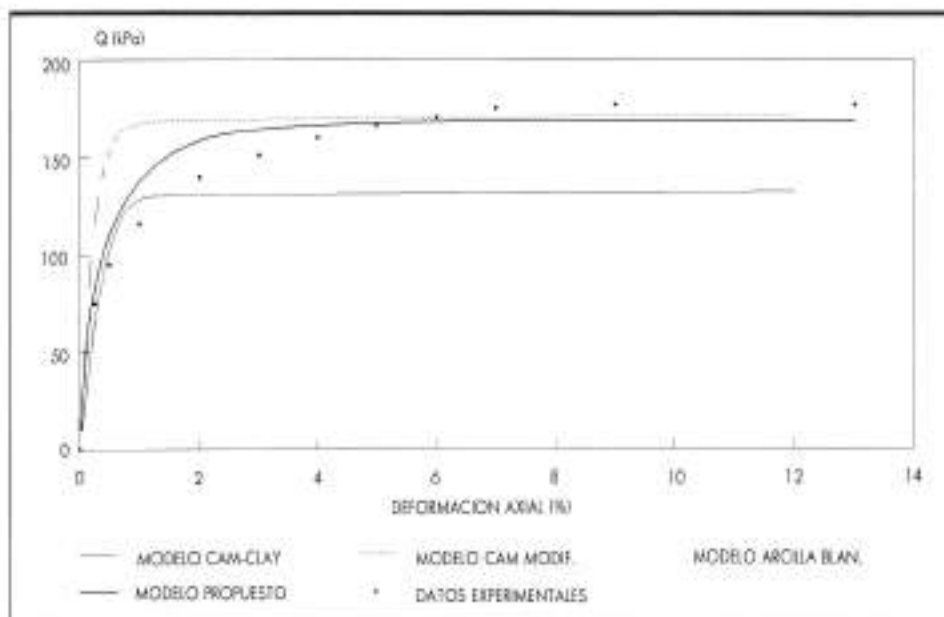


FIGURA 4. Ensayo CU - $P_0 = 300 \text{ kPa}$.

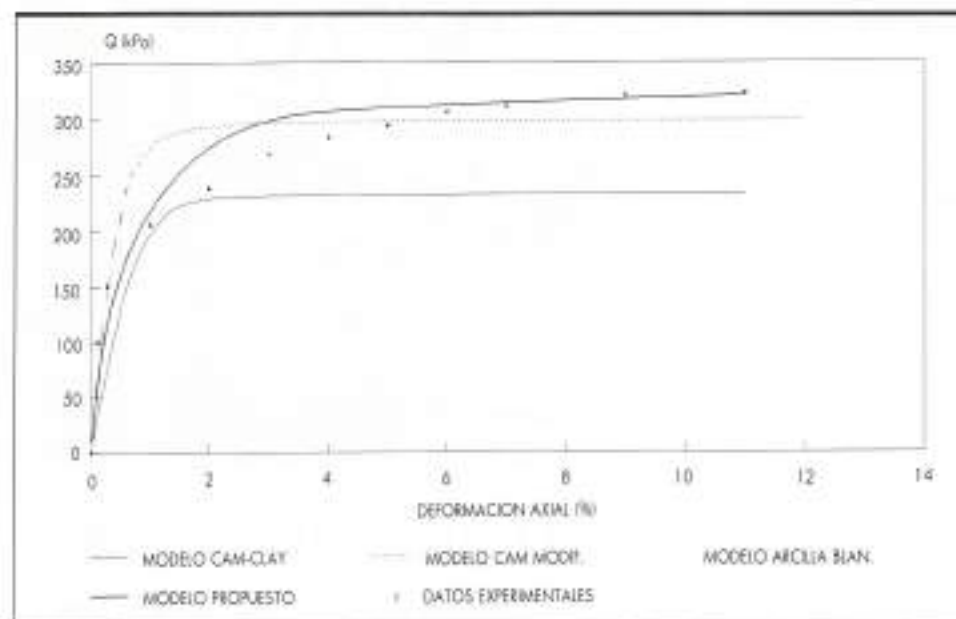


FIGURA 5. Ensayo CU - Pa = 500 kPa.

3.3. MODELO DE ARCILLA BLANDA

(Pastor et al., 1989)

$$\delta = (1 + \alpha) \cdot (M - \eta)$$

$$H = H_0 \cdot p' \cdot f(\eta)$$

$$f(\eta) = \left[1 - \frac{\eta}{M} \right]^n \cdot \frac{1 + \delta_0^2}{1 + \delta^2} \cdot \operatorname{sig} \left(1 - \frac{\eta}{M} \right)$$

siendo $\delta_0 = \delta(p', \eta)_{\eta=0} = (1 + \alpha) \cdot M$,

$\alpha = 1,1$ y $n = 2$.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este trabajo y del estudio comparativo realizado entre los cuatro modelos utilizados para reproducir el comportamiento de la arcilla del núcleo de la Presa de Canales en ensayos triaxiales consolidados y sin drenaje se puede concluir que:

- 1.º Puede utilizarse la hipótesis básica de la Plasticidad Asociada para modelizar dicho comportamiento.
- 2.º Los modelos de Cam-clay, Cam-clay modificada y de arcilla blanda predicen un comportamiento elasto-plástico excesivamente rígido al principio en el que se producen grandes deformaciones una vez que la carga alcanza un determinado valor.
- 3.º El modelo que aquí se propone se muestra más flexible para reproducir la forma de las curvas de los ensayos al establecer una transición más gradual entre el comportamiento rígido inicial y el plástico final.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a don Vicente Cuéllar por su impulso y dirección en el estudio del tema y en la realización del artículo y a don Manuel Pastor por sus comentarios críticos durante la elaboración del trabajo.

6. BIBLIOGRAFIA

1. ATKINSON, J. H., y BRANSBY, P. L. «The Mechanics of Soils. An introduction to the Critical State Soil Mechanics».
2. BALASUBRAMANIAN, A. S., y CHAUDHRY, A. R. «Deformation and strength characteristics of Soft Bangkok clay», J. Geotech. Eng. Div. ASCE, 104, N.º GT9, 1153-1167.
3. CUELLAR, V. (1989). Informe sobre el comportamiento dinámico de la Presa de Canales para la Dirección General de Obras Hidráulicas, Laboratorio de Geotecnia, CEDEX. Madrid, diciembre.
4. MROZ, Z., y ZIENKIEWICZ, O. C. (1984). «Uniform formulation of constitutive equations for clays and sands», Mechanics of Engineering Materials, C. S. Desai and R. H. Gallagher (eds.), Wiley, Ch. 22, pp. 415-449.
5. NOVA, R. (1982). «A constitutive model for soil under monotonic and cyclic loading», Soil mechanics-Transient and Cyclic Loads, eds. G. N. Pande and O. C. Zienkiewicz, Wiley.
6. PASTOR, M.; ZIENKIEWICZ, O. C., y CHAN, A. H. C. (1989). «Generalized Plasticity and the Modelling of Soil Behaviour», Intern. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 13.
7. PASTOR, M., y ZIENKIEWICZ, O. C. (1990). «Modelos jerárquicos de comportamiento de suelos bajo carga cíclica», Cuadernos de Investigación, C23, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
8. PIETRUSZCZAK, S., y STOLLE, D. F. E. (1986). «Dynamic behaviour of saturated sand: predictions based on multiple neutral loading loci concepts». Proc. II, Int. Conf. Num. Models

in Geomechanics, G. N. Pande y W. F. Van Impe (eds.), pp. 669-678, M. Jackson and Son Pub.

9. ROSCOE, K. H., y BURLAND, J. B. (1968). «On the generalised stress/strain behaviour of "wet" clays», in J. Hayman and F. A. Lockhead (eds.), Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp. 535-609.

10. ROSCOE, K. H., y POOROOSHAB, H. B. (1963). «A theoretical and experimental study of strains in triaxial compression tests on normally consolidated clays», Geotechnique, 13, 12-38.

11. SCHOFIELD, A. N., y WROTH, C. P. (1968). Critical State of Mechanics, McGraw-Hill, London.

12. ZIENKIEWICZ, O. C., y MROZ, Z. (1984). «Generalized plasticity formulation and applications to geomechanics», Mechanics of Engineering Materials, C. S. Desai and R. H. Gallagher (eds.), Wiley, Ch. 33, pp. 655-679.

13. ZIENKIEWICZ, O. C., y PANDE, G. N. (1977). «Some useful of isotropic yield surfaces for soil and rock mechanics», in G. Gudehus (ed.), Finite Elements in Geomechanics, Wiley, Ch. 5, 179-198.

FLYGT



¡Alquile una bomba sumergible Flygt!

Economía:

Comprar una bomba para un trabajo eventual o transitorio puede ser una inversión poco rentable. Simplemente alquilela, y pague sólo el tiempo que la utilice.

Disponibilidad:

Usted puede conseguir, **cerca y con toda rapidez**, el equipo de bombeo que necesite.

Servicio:

Detrás del equipo de bombeo que Ud. alquila, está la Organización Técnica TFB, que atiende más de 25.000 instalaciones en España y que le asegura su permanente funcionamiento.

Garantía:

FLYGT tiene la gama de bombas sumergibles más extensa del mundo, y la Red de Servicio TFB es la más completa y eficaz en todo el territorio nacional.

FLYGT es, en España:

TFB

TECNICAS DE FILTRACION Y BOMBEO, S.A.

MADRID, 28040 - Alameda, 24 - Tel. (91) 533 85 88
 BARCELONA, 08013 - Lepanto, 140 - Tel. (93) 232 47 81
 BILBAO, 48960 (Ara) - Conde de Echea, 7 - Tel. (94) 453 81 84
 VALENCIA, 46100 (Quart de Poblet) - Ernesto García Raga, s/n - Tel. (96) 162 32 48
 SEVILLA, 41007 - J. M.ª de Ybarra y Gómez Rúa, 20
 Polígono Industrial Ota, Arellano - Tel. (95) 407 30 00
 ALMERIA, (951) 26 15 11 - BURGOS, (947) 22 22 22 - CIUDAD REAL, (928) 21 51 25
 GRANADA, (958) 26 77 27 - LA CORUÑA, (981) 256 66 66 - HUELVA, (959) 25 12 28
 HUESCA, (974) 22 99 16 - LEÓN, (983) 26 23 75 - MÉRIDA, (924) 30 17 57
 OVIEDO, (985) 579 71 51 - PALMA DE MALLORCA, (971) 38 22 01
 LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, (928) 31 26 17 - SALAMANCA, (923) 50 00 07
 SAN SEBASTIAN, (943) 37 07 86 - SANTANDER, (942) 34 76 49
 VALLADOLID, (933) 39 06 77 - VIGO, (986) 27 13 07 - ZARAGOZA, (976) 44 26 76

VENTA • ALQUILER • SERVICIO

AVE

TREN DE ALTA VELOCIDAD

MADRID-SEVILLA

**VIAS QUE
LLEGAN LEJOS**



**COMPROMISO
DE FUTURO**

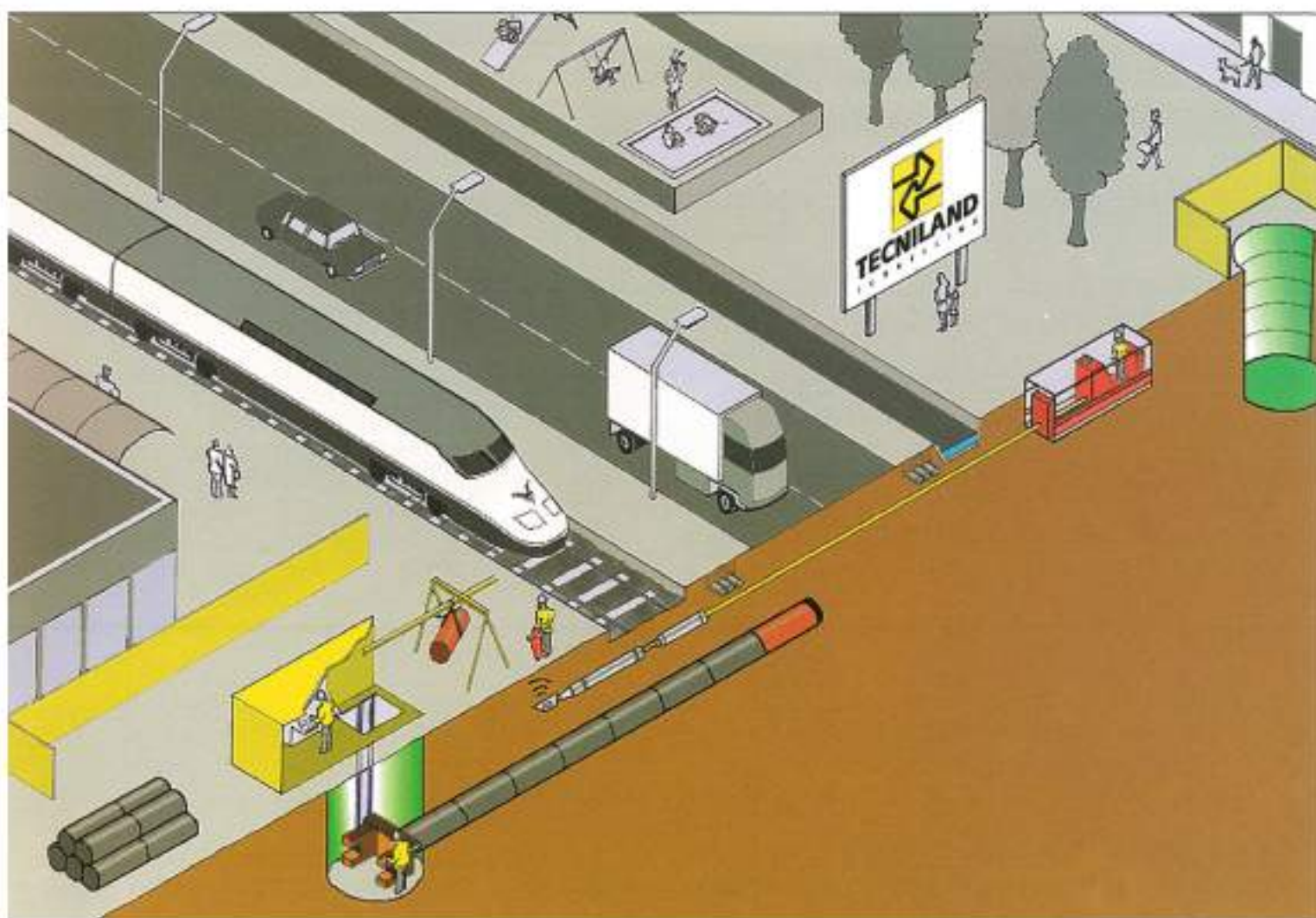


**FOMENTO DE
CONSTRUCCIONES Y CONTRATAS, S.A.**



TECNILAND

T U N N E L L I N G



... y en la superficie la vida sigue

ENTRE EN EL MUNDO NO-DIG

TECNILAND, Tunnelling le ofrece la más completa gama de Tecnologías NO-DIG para la instalación de cableado, tuberías y galerías visitables:

- Sin excavación
- Sin interferencias en el tráfico
- Sin molestias para los vecinos
- Con el menor coste social
- Con el menor impacto ambiental
- Con la mayor productividad

TECNILAND, Tunnelling es una División de:

TECNILAND, S.A. Edificio Numancia 1 - calle Viriato, 47 - 2ª planta. 08014 BARCELONA Tel. (93) 430 09 33 Fax: (93) 430 65 42
DELEGACIONES: MADRID - LA CORUÑA - MÁLAGA - SANTANDER - SEVILLA - VALENCIA