

Caracterización del comportamiento geotécnico de un relleno todo-uno de difícil puesta en obra

J. L. García de la Oliva^{*}; J. Valerio Conde^{*}

Resumen: La utilización de materiales marginales en rellenos conlleva en ocasiones la realización de estudios "in situ" para evaluar las características geotécnicas del producto puesto en obra.

En este artículo se describen las técnicas empleadas para estimar los parámetros geotécnicos que controlan el comportamiento geotécnico de un relleno todo-uno de 40 m de altura, que formó parte de las obras de construcción de una autovía en el Noroeste de España.

El relleno se efectuó con esquistos precámbricos y ordovícicos con partículas de hasta 600mm de diámetro, compactadas en tongadas de 0,8 m con compactadores vibratorios pesados. Dado el elevado tamaño de las partículas se planteó el empleo de técnicas especiales para caracterizar los parámetros de deformabilidad del relleno. Con este fin se utilizó el análisis espectral de ondas superficiales (AEOS) para obtener las curvas de dispersión a partir de las que se definiría la variación del módulo de rigidez transversal, G, del medio. Los resultados obtenidos mediante esta técnica se compararon con los procedentes de un ensayo estático efectuado utilizando como sobrecarga los metros finales del relleno y controlando las deformaciones con un micrómetro deslizante (R02).

1 INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se recogen los resultados de los trabajos realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para la caracterización de un relleno 40m de altura.

La deformación del relleno ha sido obtenida utilizando dos métodos:

- Análisis espectral de ondas superficiales (método dinámico AEOS).
- Registro de las deformaciones provocadas en el cuerpo del relleno por la construcción de sus 8m superiores. Las deformaciones han sido determinadas utilizando un micrómetro deslizante.

Estas técnicas han permitido evaluar la variación del módulo de deformación con la profundidad para niveles de deformación comprendidos entre 10^{-6} y 10^{-5} en el primer caso y entre 10^{-3} y 10^{-2} en el segundo. En los puntos siguientes se comentan los resultados de los trabajos realizados con ambas técnicas.

^{*} Laboratorio de Geotecnia del CEDEX

2 DESCRIPCIÓN DEL RELLENO

En el emplazamiento donde se construyó el relleno aparecen esquistos ordovícicos moderada a ligeramente alterados cubiertos por aproximadamente 1,5m de materiales cuaternarios que fueron excavados junto con la zona superior de roca más alterada previamente a la ejecución del relleno.

En las figuras 1 y 2 se recogen las secciones longitudinal y transversal del relleno. Su máxima altura es de 40m y se apoya sobre una ladera con una inclinación media de unos 5º.

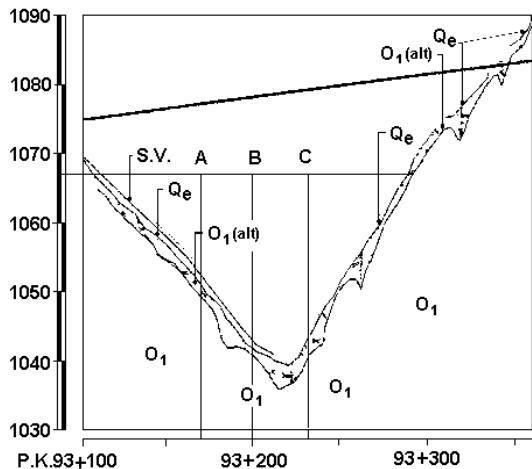


Figura 1.- Sección longitudinal del relleno en el área de estudio

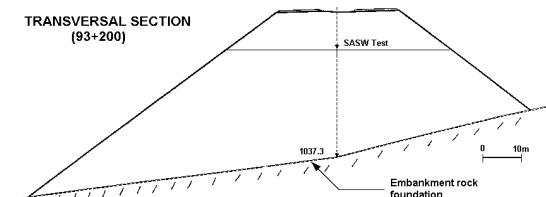


Figura 2.- Sección transversal del relleno

El relleno fue ejecutado con esquistos y pizarras precámbricos y ordovícicos. Los materiales se dispusieron en tongadas de unos 0,8m de espesor (valor máximo) y fueron compactados mediante 5 pasadas dobles de compactadores vibratorios de 18 t, trabajando con una velocidad máxima de 3 Km/h.

El tamaño máximo de partícula considerado fue de 600mm. En la figura 3 se recoge la granulometría característica del material.

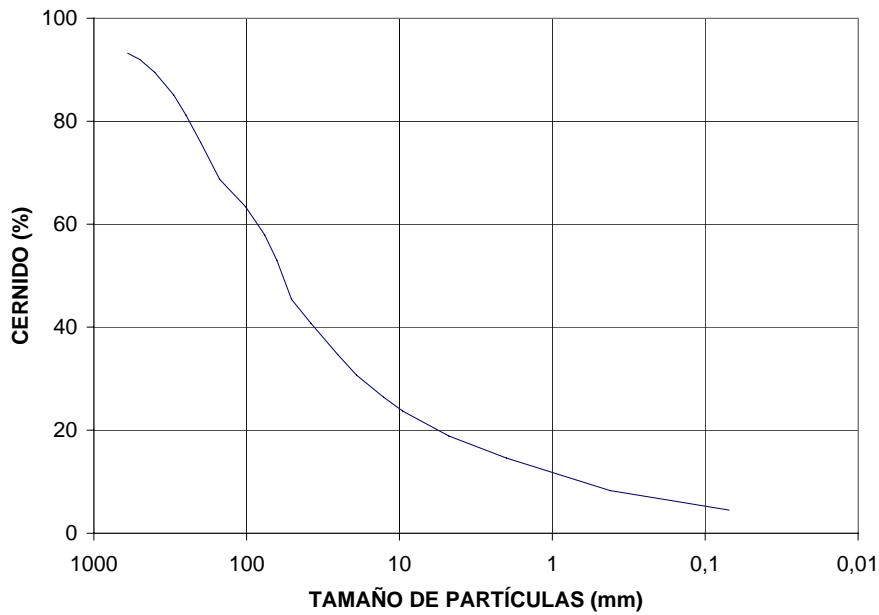
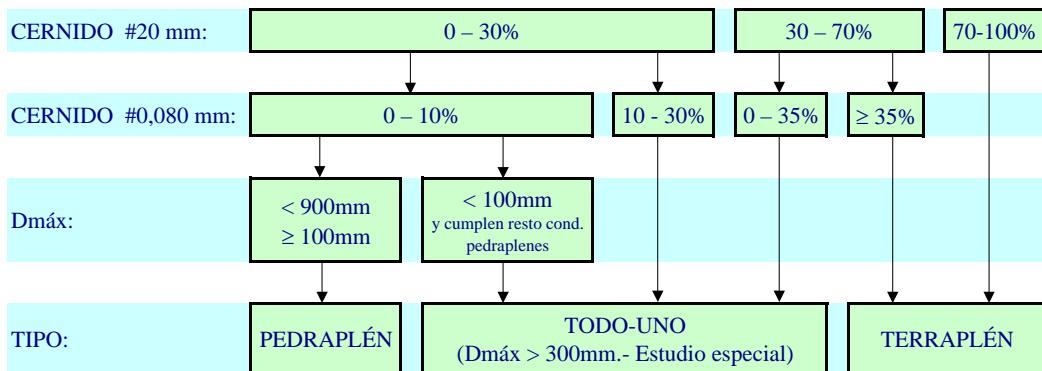


Figura 3.- Granulometría característica del material de relleno

Esta curva granulométrica corresponde a un material de tipo todo-uno, en el límite de los valores correspondientes a un pedraplén (cernido por el tamiz 20 UNE algo superior al 30%) (figura 4).



NOTAS.- Granulometrías sobre material compactado

Figura 4.- Clasificación de los rellenos en función de su granulometría (PG-3)

Los ensayos de densidad "in situ" efectuados sobre el material compactado presentaron densidades secas de $21,4 \text{ kN/m}^3$ y contenidos de agua de aproximadamente el 8 %.

Según se define en el artículo 333 del PG-3, "los materiales para rellenos todo-uno que no cumpliendo los requisitos necesarios para ser utilizados como material para terraplenes ni para pedraplenes, cumplan las condiciones granulométricas anteriores pero que tengan un tamaño máximo superior a trescientos milímetros (300 mm), requieren un estudio especial, aprobado por el Director de las Obras, para su utilización en rellenos todo-uno".

El relleno objeto de estudio se efectuó con materiales de tipo todo-uno formados por esquistos y pizarras con abundantes partículas lajosas, con forma inadecuada, que, junto con el elevado espesor de las tongadas y la altura del relleno, justificó la conveniencia de efectuar un estudio especial para garantizar su comportamiento aceptable.

En este contexto, el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX fue encargado de caracterizar los parámetros de deformabilidad del relleno ejecutado.

3 ALCANCE DEL TRABAJO

3.1 *Descripción del método del análisis espectral de ondas superficiales*

Dentro de las técnicas geofísicas que está desarrollando actualmente el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para la caracterización de las propiedades elásticas del terreno, ocupa un lugar preferente el Análisis Espectral de Ondas Superficiales (AEOS).

Esta técnica constituye un método no destructivo muy adecuado para obtener la velocidad de las ondas S del terreno (V_s), sobre todo en aquellos casos en los que, por haber capas superficiales más rígidas, no es posible utilizar los métodos tradicionales de refracción. Por otro lado, su rapidez de ejecución y su carácter "global" ofrecen claras ventajas frente a otras técnicas como el "cross-hole", "down-hole" e "in-hole", que exigen la perforación de sondeos.

Para la realización del ensayo AEOS es preciso utilizar una fuente vibratoria que origine vibraciones en el terreno en el rango de frecuencias deseado y cuya magnitud sea medible. En este trabajo, efectuado por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, se han usado dos tipos de fuentes de energía: barrido lineal de frecuencias mediante un vibrador (foto 1), Valerio (1990), y caída de una masa desde una determinada altura. La primera fuente se empleó para obtener la curva de dispersión del relleno con separaciones entre sensores variables entre 0,5 y 4m y la segunda fuente, con una masa de 1000 kg cayendo desde una altura de 5m, para distancias entre sensores en el rango comprendido entre 8 y 32m.

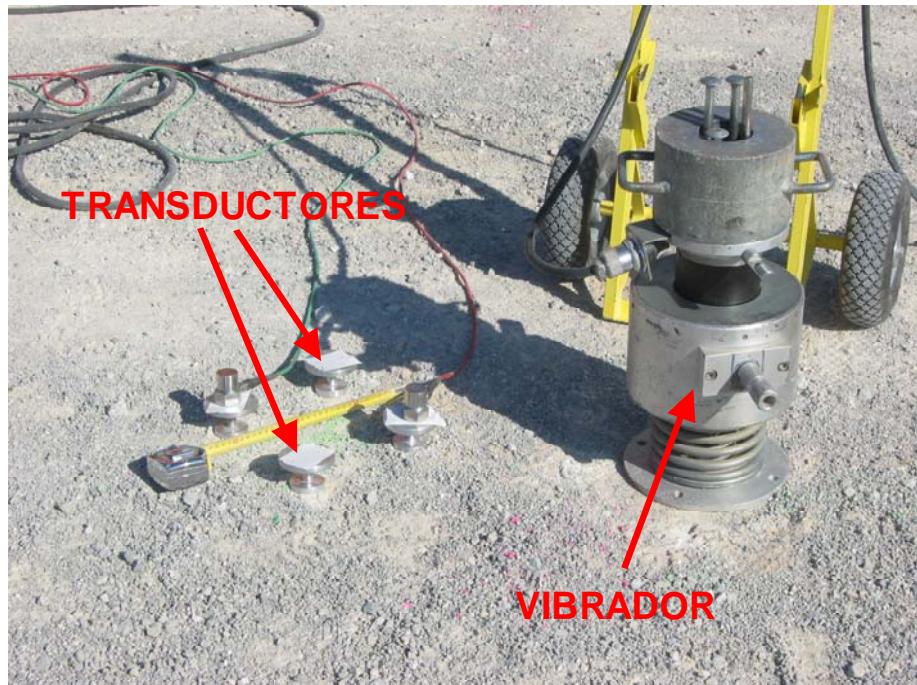


Foto 1.- Vibrador para ensayo AEOS

Actualmente, la segunda fuente citada ha sido sustituida por un dispositivo de impacto análogo a los Deflectómetros de Impacto (FWD), expresamente proyectado para este fin (foto 2).



Foto 2.- Vehículo y remolque con el dispositivo de impacto para realizar el ensayo AEOS

La metodología utilizada en los ensayos con los dos tipos de fuentes vibratorias comentadas se esquematiza en la figura 5. Para conocer la velocidad de propagación de las ondas superficiales en la vertical de un punto determinado (P) se colocan dos transductores de aceleración o de velocidad (A y B), uno a cada lado de P y equidistantes del mismo.

La fuente vibratoria aplicada en la superficie del terreno (C) genera en los puntos A y B dos señales temporales: A(t) y B(t). Con estas señales, un Analizador de Espectros o un Ordenador calculan en tiempo real la función de coherencia, $\gamma_{AB}^2(f)$, y la fase, $\theta_{AB}(f)$, de la función densidad espectral cruzada de energía $G_{AB}(f)$, en función de la frecuencia, f. Ambas funciones quedan almacenadas para su posterior análisis.

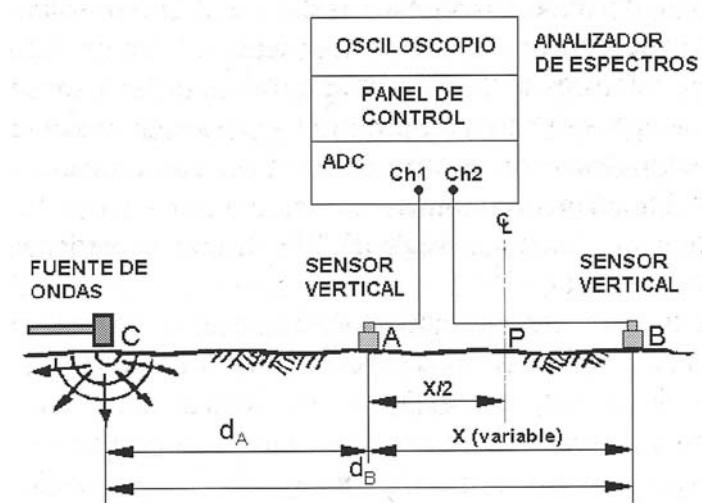


Figura 5.- Esquema de ejecución del ensayo AEOS

El significado de la función $\theta_{AB}(f)$ es el siguiente: a cada valor de frecuencia "f" en Hz, le corresponde un valor de desfase $\theta_{AB}(f)$ entre A y B, estando relacionado este desfase con el tiempo de recorrido (t_{AB}) de una onda de frecuencia "f" entre ambos transductores mediante la expresión:

$$t_{AB} = \frac{\theta_{AB}(f)}{360 f}$$

, donde $\theta_{AB}(f)$ viene expresado en grados, f en Hz y t_{AB} en segundos.

Una vez conocido t_{AB} es inmediato determinar la velocidad de fase, V_R , ya que:

$$V_R = \frac{X}{t_{AB}}$$

, siendo "x" la distancia entre transductores (figura 5). La velocidad V_R calculada corresponde a una longitud de onda, λ , de valor:

$$\lambda = \frac{V_R}{f}$$

Repitiendo el proceso para diferentes frecuencias, se puede obtener la velocidad de fase " V_R " en función de la frecuencia "f" o en función de la longitud de onda " λ ", es decir, la Curva de Dispersión Experimental.

Por otra parte, es importante señalar que la función de coherencia, $\gamma^2(f)$, se utiliza para seleccionar el rango de frecuencias en las que se aplica el proceso de cálculo comentado.

Esto se debe a que $\gamma^2(f)$ es una función, en el dominio de la frecuencia, análoga a la del cuadrado del coeficiente de correlación, de forma que:

$$0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$$

En esta expresión la función de coherencia valdrá 0 cuando las señales $A(t)$ y $B(t)$ no estén relacionadas, y valdrá 1 cuando haya una dependencia lineal entre ellas. En general, se exige un valor igual o mayor de 0,90.

Según se indica en la figura 1, se efectuaron ensayos en los emplazamientos A, B y C, separados 30m entre sí.

En las figuras 6 y 7 se representan la curva de dispersión experimental obtenida en el emplazamiento C y la curva teórica ajustada a los datos experimentales mediante un programa desarrollado por el profesor J.M. Roessel (1991) en la universidad de Texas.

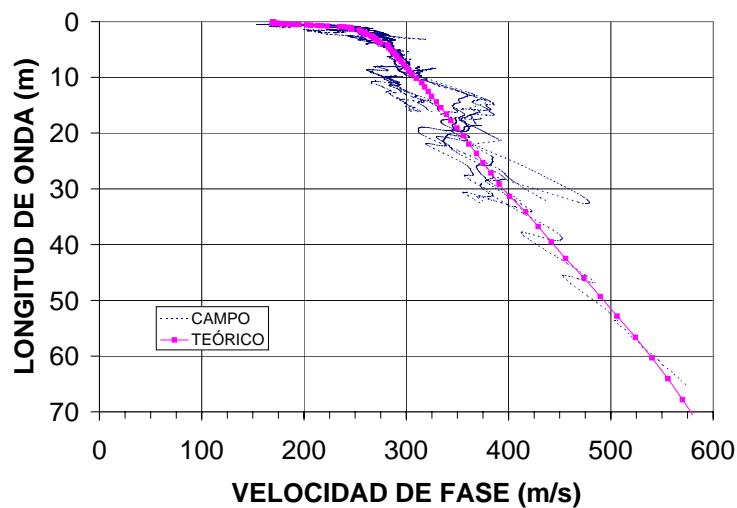


Figura 6.- Curvas de dispersión en el punto C

Es destacable que las curvas experimentales de dispersión exhibieron un primer tramo liso para longitudes de onda de hasta 8 a 10m, seguido por un segundo tramo, con longitudes de onda superiores, donde aparecieron frecuentes picos. Estas características se detectaron también en las curvas experimentales de dispersión obtenidas en los emplazamientos A y B.

En la figura 7 se representa el perfil con las velocidades de ondas de corte en el punto C. Una vez conocidas estas velocidades, puede determinarse el módulo de elasticidad, E_D , correspondiente a rangos de deformación comprendidos entre 10^{-6} y 10^{-5} .

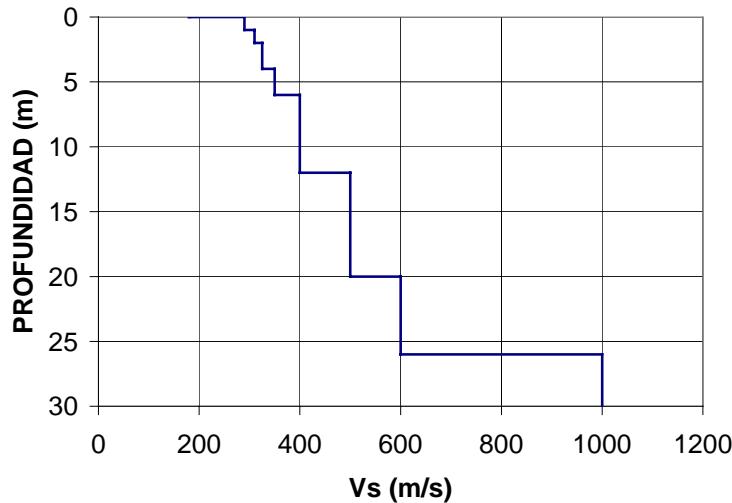


Figura 7.- Perfil con velocidades de ondas de corte en el punto C

3.2 Micrómetro deslizante

El elevado tamaño de las partículas del relleno hacía inviable la ejecución de placas de carga convencionales para evaluar la deformabilidad del relleno y se optó por utilizar los metros superiores del relleno como sobrecarga y estimar la deformabilidad del material a partir de la información suministrada por las deformaciones provocadas por dicho relleno.

El micrómetro deslizante utilizado en este trabajo, desarrollado por el Swiss Federal Institute of Technology mide con una gran precisión la componente longitudinal de los movimientos relativos de puntos situados en el interior de una perforación, en intervalos de 1 m.

Para ello, deben fijarse al terreno unas marcas metálicas de medida sobre las que se apoyará el micrómetro para efectuar las lecturas (figura 8).

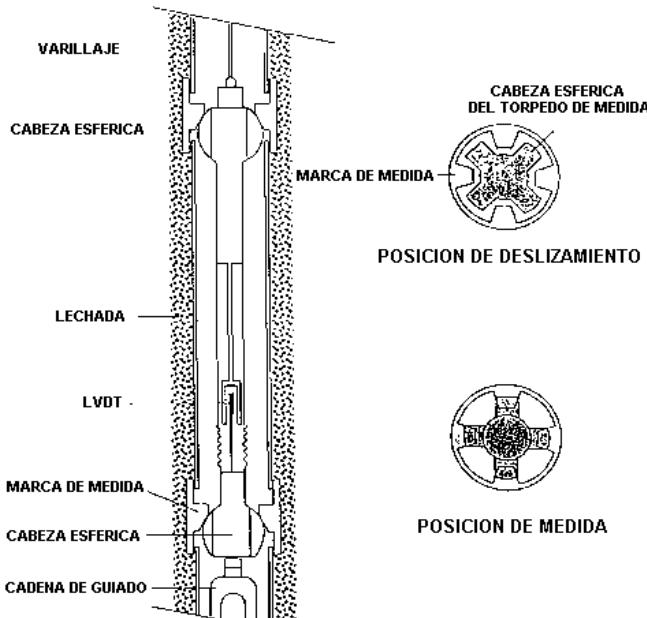


Figura 8.- Micrómetro deslizante

Las piezas metálicas y la entubación se fijan al terreno mediante una inyección de lechada de cemento.

Al efectuar cada ciclo de lecturas, se fija el micrómetro deslizante entre cada dos marcas consecutivas, con la ayuda de un varillaje de guiado. De esta forma se mide la variación de la distancia entre cada dos marcas.

El torpedo de medida presenta las siguientes características técnicas:

- Longitud base del torpedo: 1000mm
- Rango de medida: $\pm 10\text{mm}$
- Sensibilidad: 0,001mm
- Precisión: "0,003mm

Este equipo presenta una aplicación directa en estudios en los que se precise conocer la distribución de desplazamientos a lo largo de una línea. Su gran precisión permite obtener información de deformaciones fiable, en intervalos de tiempo reducidos.

En el problema objeto de estudio se ha considerado su empleo con el fin de conocer con precisión la evolución y distribución de las deformaciones en el cuerpo y cimiento del relleno, por efecto de la sobrecarga debida al relleno de los últimos metros de relleno. Con este fin, cuando el relleno alcanzó la cota 1069 (8 m bajo coronación), se efectuó una perforación de 43 m de profundidad que atravesaba el relleno, penetrando unos 10 m en roca sana. En esta perforación se fijó la entubación del micrómetro con las marcas de medida. Dada la elevada permeabilidad del relleno fue necesario utilizar aditivos que limitasen la infiltración de la lechada en el cuerpo del relleno. A pesar de esto, el consumo de lechada fue claramente superior al teórico.

En la figura 9 se recogen los movimientos relativos, cada 2 marcas de medida. Las 4 primeras medidas son anteriores a la ejecución del relleno final y las dos últimas corresponden a fechas posteriores a la ejecución de dicho relleno, de 8 m. Se observa que las deformaciones registradas son del orden de $2 \cdot 10^{-3}$ a $20 \cdot 10^{-3}$.

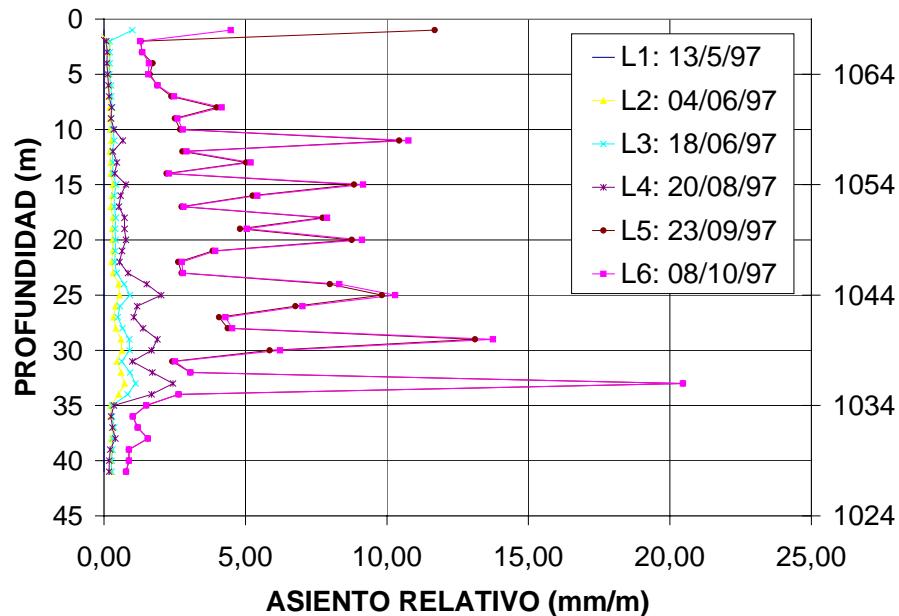


Figura 9.- Deformación vertical en función de la profundidad a partir de las medidas con el micrómetro deslizante

Con los datos de estas deformaciones se ha estimado el módulo de deformación del relleno, cada metro de profundidad, evaluando el incremento tensional provocado por la sobrecarga mediante la distribución de tensiones de Boussinesq. Este método no toma en consideración la influencia de la presencia de capas de distinta rigidez en la distribución tensional, pero se ha considerado suficientemente válido dada la anchura de la superficie cargada en relación con la profundidad estudiada. En la figura 10 se recogen los valores del módulo de elasticidad, E, obtenidos con estos criterios y considerando un coeficiente de Poisson de 0,3.

La distribución de módulos obtenida es muy irregular, con una sucesión de puntos de deformabilidad muy variable. Esto podría justificarse, bien por la heterogeneidad del material de relleno, o bien por la rigidización provocada en el relleno por las fugas de la lechada empleada en el sellado de la tubería de medida. Con el fin de suavizar estos valores, se realizó un segundo análisis considerando el relleno constituido por capas homogéneas, mediante el método de Steinbrenner. En la figura 10 se recogen los resultados de este segundo análisis.

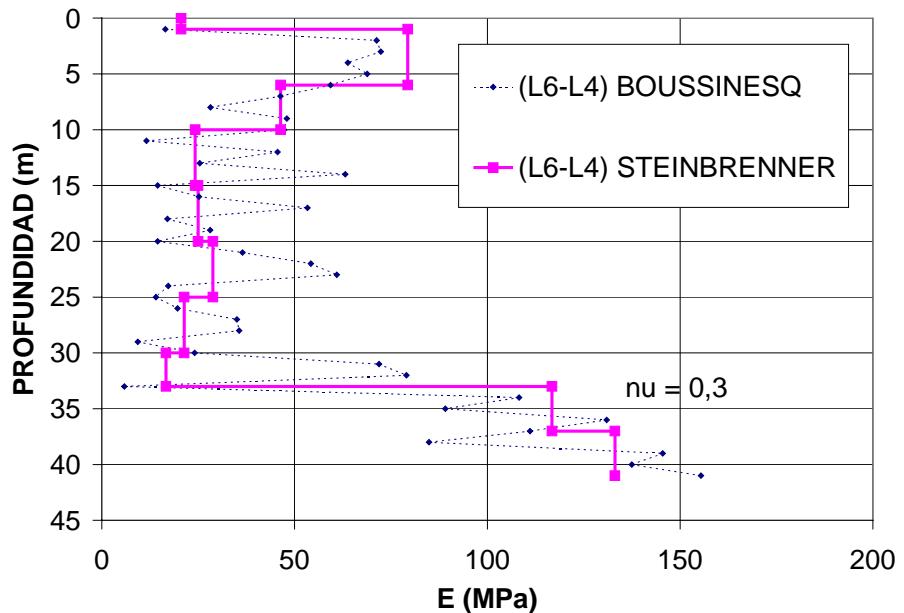


Figura 10.- Variación del módulo de deformación con la profundidad a partir de las medidas con el micrómetro deslizante

En ambos métodos de análisis se observa que el relleno presenta, para el rango de deformaciones citado($2 \cdot 10^{-3}$ a $20 \cdot 10^{-3}$), un nivel superior de unos 5 a 6 m, con un módulo de elasticidad próximo a los 80 MPa, y a mayores profundidades este valor baja, alcanzando valores de 20 a 25 MPa a partir de unos 10 m de profundidad.

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para estimar la deformabilidad de este tipo de rellenos como un conjunto y para estimar la evolución de los asientos postconstructivos se emplea en ocasiones el denominado "módulo de deformación". El valor de este módulo se determina habitualmente como el cociente entre la presión vertical (8 m de sobrecarga de tierras en este caso), en un punto dentro del terraplén y la deformación obtenida al dividir el asiento de ese punto y por el espesor del relleno.

Para estimar el asiento del punto donde se dispuso el relleno, los desplazamientos relativos dados en la figura 9 se integraron y se obtuvo un valor de 158 mm. A partir de dicho valor se obtuvo un valor del módulo de deformación de 40 MPa que se considera admisible. La figura 11 permite efectuar una estimación de los asientos postconstructivos previsibles.

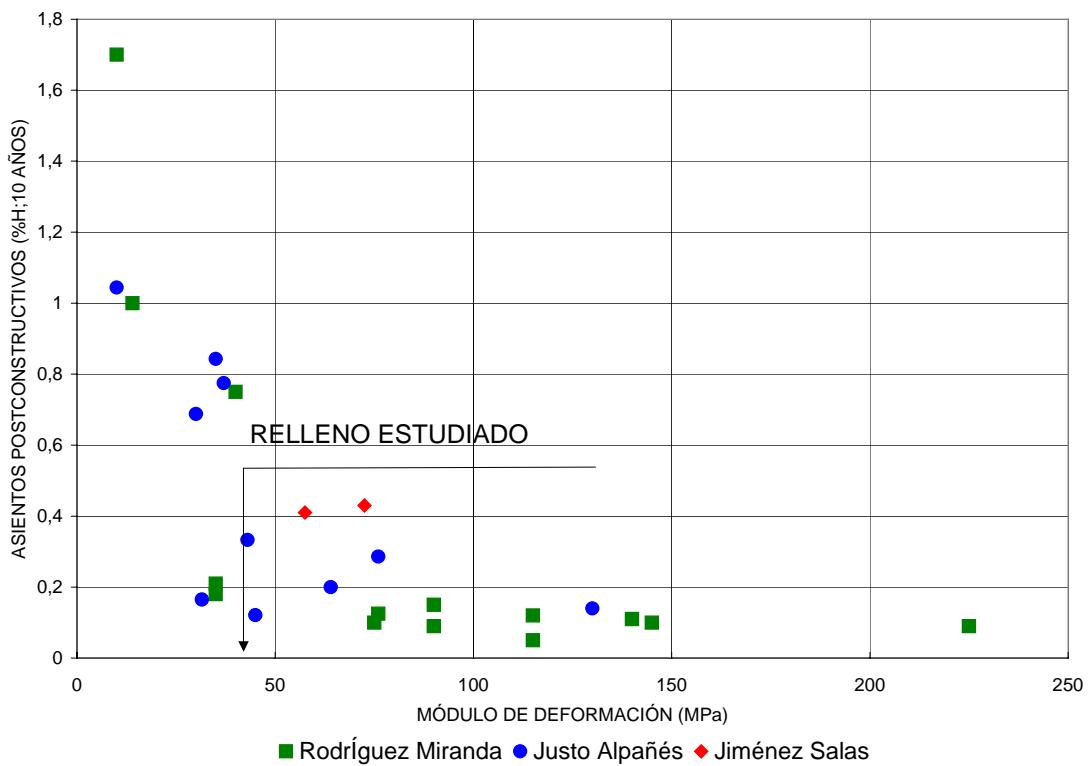


Figura 11.- Relación entre los módulos de deformación y los asientos postconstructivos en rellenos de tipo pedraplén y escollera.

Si se analizan en conjunto los módulos estático y dinámico obtenidos en este trabajo (figura 12), se obtiene un cociente $E_D/E_S = 7$ en la parte superior del relleno, donde se obtenían deformaciones estáticas de $2 \cdot 10^{-3}$. En esta zona, tanto los resultados de los ensayos estáticos como los de los dinámicos, presentan curvas suaves, reflejando probablemente la presencia de una zona homogénea (figuras 6 y 10).

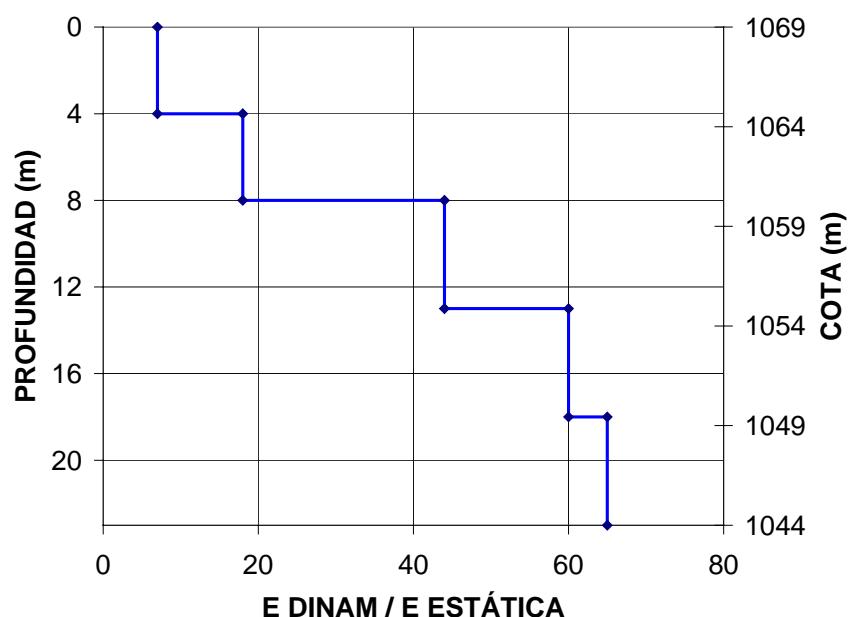


Figura 12.- Relación Edinám / E estático en función de la profundidad

Bajo esa zona, las deformaciones estáticas se incrementan en un orden de magnitud y la relación E_D/E_S varía entre 20 y 65 (figura 12). Estos valores parecen excesivamente elevados a pesar de que el relleno está constituido por materiales con forma sensiblemente laminar para los que sería previsible obtener cocientes E_D/E_S algo superiores a los correspondientes a materiales con partículas redondeadas. En estas zonas, tanto el ensayo estático como el dinámico presentan resultados con frecuentes picos (ver figuras 6 y 10).

Es posible que en las zonas en las que se han obtenido resultados con fuerte dispersión, la deformación del relleno no sea uniforme, dado tanto al espesor de las tongadas (0,8 m) como al efecto rigidizador que puede haber provocado el proceso de instalación del micrómetro en su entorno (debido a las fugas de lechada). Asimismo, estos hechos podrían justificarse considerando el comportamiento no lineal del material.

Finalmente, podría resaltarse que la variación de E_D con la profundidad, obtenida mediante el uso del método AEOS, es debida básicamente a la variación de la presión de confinamiento mientras que E_S no depende únicamente de la presión de confinamiento sino que asimismo se ve muy influida por las deformaciones tangenciales provocadas por la sobrecarga, que se incrementan con la profundidad hasta aproximadamente la mitad de la extensión horizontal de la sobrecarga. Esto podría explicar el incremento de E_D con la profundidad y el correspondiente decrecimiento de E_S que se obtuvieron con el empleo de estas técnicas.

5 CONCLUSIONES

Se ha obtenido un módulo de deformación global de 40 MPa en el estudio de los datos estáticos procedentes de un relleno todo-uno realizado con esquistos y pizarras compactados en tongadas de 0,8 m de espesor. A la vista de la experiencia en otros rellenos realizados en España, el valor citado se considera admisible.

Si se comparan los perfiles de los módulos de elasticidad obtenidos con el ensayo estático con los procedentes del ensayo dinámico AEOS, en la parte superior del relleno, en la que los resultados presentan una dispersión baja, se obtiene una relación $E_D/E_S = 0,7$ para niveles de deformación del orden de 10^{-3} . Sin embargo, bajo esa zona, donde las deformaciones medidas presentan dispersiones elevadas, con deformaciones del orden de 10^{-2} , se miden relaciones E_D/E_S notablemente superiores a las previsibles para dichos niveles de deformación. En los apartados anteriores se recogen posibles justificaciones de dicho comportamiento.

REFERENCIAS

- R01: Cuéllar, V. 1988. Análisis Espectral de Ondas Superficiales (1^a parte). Madrid. CEDEX
- R02: Cuéllar, V, García, J.L. Monte, J.L. & Valerio, J. 1999. Mechanical behaviour of a big rockfill highway embankment. XIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Amsterdam.
- R03: Cuéllar, V., Monte, J.L., Valerio, J., Kausel, E. & Roesset, J.M. 1993. Selection of drop masses to generate long period waves for SASW test. Proc. 2nd European Conference on Structural Dynamics. Eurodyn'93. Trondheim.
- R04: Rodríguez Miranda, M.A. 1986. Pedraplens. Simposio sobre Terraplenes, Pedraplens y otros Rellenos. Madrid. Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones
- R05: Roesset, J.M., Chang, D.W. & Stokoe, K.H.II 1991. Comparison of 2-D and 3-D models for the analysis of surfaces wave tests. Proc. 5th ICSDEE: 111-126.
- R06: Valerio, J. 1990. Estudio de sistemas multicapas mediante la propagación de ondas superficiales (20 parte). Madrid. CEDEX.