

II JORNADA SOBRE MATERIALES MARGINALES EN OBRAS VIARIAS

Sevilla, 21 Marzo 2007

Ponencia sobre: “Ejecución de rellenos con materiales yesíferos”

Autor: Antonio Soriano

Resumen: En esta ponencia se describen algunos resultados del uso de materiales yesíferos en la ejecución de rellenos para obras de diferentes autovías que hoy están operativas y de alguna que hoy está en fase de construcción. La conclusión que parece deducirse de las experiencias previas es que el uso de materiales yesíferos, con las debidas precauciones es posible sin que ello merme la calidad del servicio posterior. Pero el largo plazo que se requiere para confirmar esa idea, hace que el tema sea objeto de mayor consideración.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se describen algunas experiencias previas conocidas por el autor y se incluyen datos conocidos de otras experiencias más recientes.

Los yesos que aparecen en la península Ibérica están asociados principalmente a las formaciones triásicas (Keuper) y a las formaciones miocenas. Estas últimas conforman los depósitos yesíferos de la cuenca del Tajo y del Ebro, donde se han obtenido las experiencias descritas en esta ponencia.

Las obras de donde se ha obtenido información son la Ronda Sur de Zaragoza, la Radial 4 de Madrid y la nueva autovía de Burgo de Ebro.

2. EXPERIENCIA PREVIA

Cronológicamente y citando únicamente aquellos casos de los que se tiene alguna información fehaciente publicada, deben considerarse los siguientes trabajos:

2.1. Autovía Zaragoza-Alfajarín

La reseña puede verse en el artículo de Jiménez Salas y otros presentado al Congreso Internacional de Mecánica del Suelo de Moscú (1973) donde se habla de colapso de los limos yesíferos. Se describen los ensayos realizados por Carlos Faraco que formarían parte de su tesis doctoral así como las experiencias de otros autores (J. L. de Justo y M. Romana).

Parece concluirse de esta experiencia que el uso de los limos yesíferos no es conveniente en los terraplenes. El interesado debe leer la publicación y tesis doctoral mencionadas para obtener una idea más precisa acerca de este problema.

2.2. La experiencia de Tembleque

Esta experiencia llega a nuestros días algo difusa. La cita J. M. Rodríguez Ortíz en el simposio de geotecnia vial, Vigo 1994. Conviene que el lector interesado la consulte. Se trata de información no muy documentada relativa a un relleno (terraplén) que tuvo mal comportamiento y exigió varias reparaciones posteriores.

2.3. La experiencia de Burgos-Malzaga

En este caso la documentación es algo más completa. Antes de utilizar yesos en los terraplenes de esta autopista se identificaron varios rellenos de RENFE; contruidos con yesos y con buen comportamiento aparente. Con ese antecedente, en la autopista mencionada se construyeron rellenos con porcentajes variables de yesos y de alturas considerables. No se han observado

problemas a largo plazo. Una cita más extensa puede verse en la publicación del MOPT "Terraplenes y pedraplenes".

2.4. Las experiencias en Aragón

Se han utilizado yesos, juntos con margas, en la formación de terraplenes de carreteras de diversas obras de Aragón.

2.4.1. Carretera Nacional II

2.4.2. Autopista A-2

2.4.3. Carretera Nacional 240

2.4.4. Carretera Comarcal 129

2.4.5. Carretera Comarcal 222

2.4.6. Carretera de acceso al Casino Montesblancos

Estas experiencias no están muy documentadas (al menos no se conocen publicaciones específicas que traten de estos temas). El uso de los yesos no parece haber planteado problemas de importancia.

Según indican los responsables de la conservación, sólo existe algún problema local en la última de las carreteras mencionadas y está asociado al mal funcionamiento de una obra de drenaje transversal.

También existe un fallo local en la autopista A-2 en el PK 72 y debido, como el anterior, al fallo local de una obra de drenaje.

La experiencia más interesante es la que menciona J.M. Rodríguez Ortiz en el Simposio de Geotecnia vial de Vigo (1994) donde cita veinticuatro datos de control de asientos postconstructivos de varios terraplenes de Zaragoza (autovía). Los asientos se comenzaron a medir un año después de colocar el firme. Los asientos medidos oscilan entre 1 cm y 15 cm para alturas de terraplén de 2 m a 15 m. La nube de datos asiento-altura que puede verse en su publicación parece insinuar dos tipos de comportamiento. Unos en los que la

relación s/H es del orden de 0,6% y otros en los que se alcanza el 1.2%. No se tiene noticia del estado actual de estos terraplenes ni detalles de los materiales con los que fueron contruidos, aparte de su calificación genérica: margas con yesos.

Recientemente también se ha utilizado de forma abundante el yeso del mioceno del Ebro para construir la “Ronda Sur de Zaragoza”

Como resumen de las experiencias previas que se han podido conocer pueden destacarse los siguientes aspectos:

- El yeso se ha utilizado en buen número de ocasiones en España para formar el cuerpo de los terraplenes.
- La documentación técnica de estos casos no es muy extensa. La experiencia previa no ha sido bien transmitida.
- Las opiniones de autores que han publicado sobre este asunto son variadas: hay unos más bien pesimistas en este tema y otros, sin embargo, muestran cierto optimismo acerca de la posible utilización.

Aunque existe una utilización limitada (ramales de un nudo en la M-45) y reciente de suelos con yesos en Madrid (ver Domínguez y otros en el simposio de geotecnia de Barcelona, 2000) aún no se tienen noticias del comportamiento a largo plazo de esta utilización de yesos.

No se han encontrado referencias internacionales claras del uso del yeso en los terraplenes de carreteras. Algunas referencias negativas se mencionan en USA (Ohio) utilizando sulfatos cálcicos artificiales productos de la desulfuración de los gases de la combustión del carbón.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA ROCA DE YESO

El yeso es una roca blanda y soluble. Ambas características son negativas cara a su utilización como material de construcción.

La resistencia de la roca de yeso y su densidad están íntimamente ligadas. La máxima densidad y resistencia ocurren con rocas íntegras, no fisuradas y sin contaminaciones térreas.

Por las investigaciones previas a su uso en la R-4 llevadas a cabo por el autor de estas notas, parece existir correlación también clara entre la densidad y la velocidad de propagación de ondas (de compresión o de corte). La deformabilidad instantánea (módulo de elasticidad), también está estrechamente ligada a la densidad.

Estas características mecánicas básicas quedan ilustradas en las Figs. 1, 2 y 3, que corresponden a los datos de formaciones de yesos miocenos del valle del Ebro, cerca de Zaragoza.

Pero la característica que más interesa conocer es la fluencia de esta roca a carga constante. Los resultados de los ensayos de fluencia con testigos de yeso masivo sometidos a carga vertical constante quedan ilustrados en la Fig. 4.

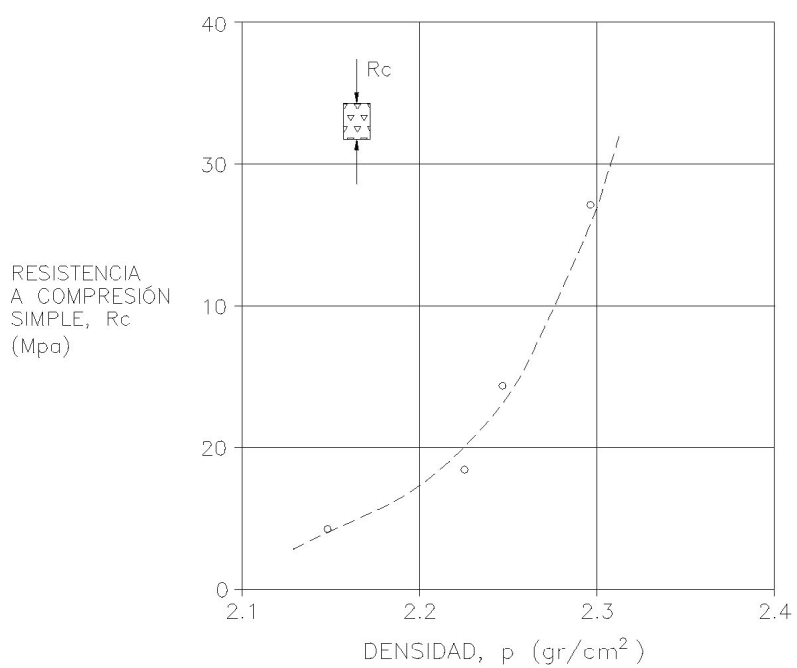


FIG. 1.- DENSIDAD Y RESISTENCIA DEL YESO (VALORES TÍPICOS)

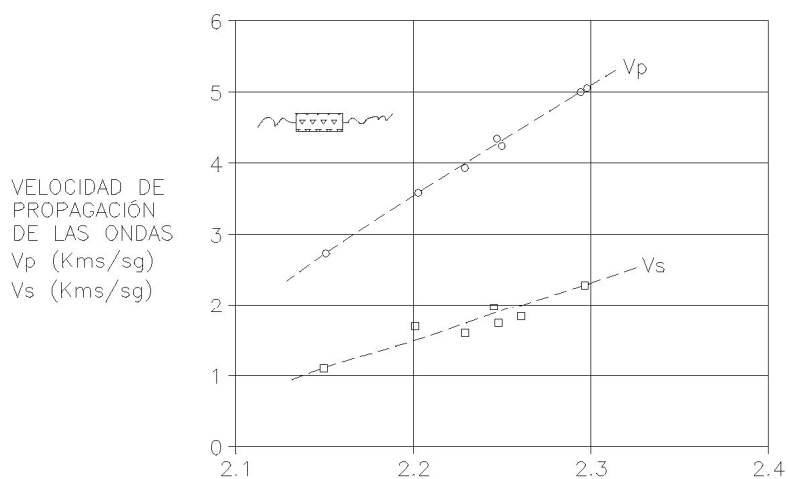


FIG. 2.- DENSIDAD Y VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL YESO

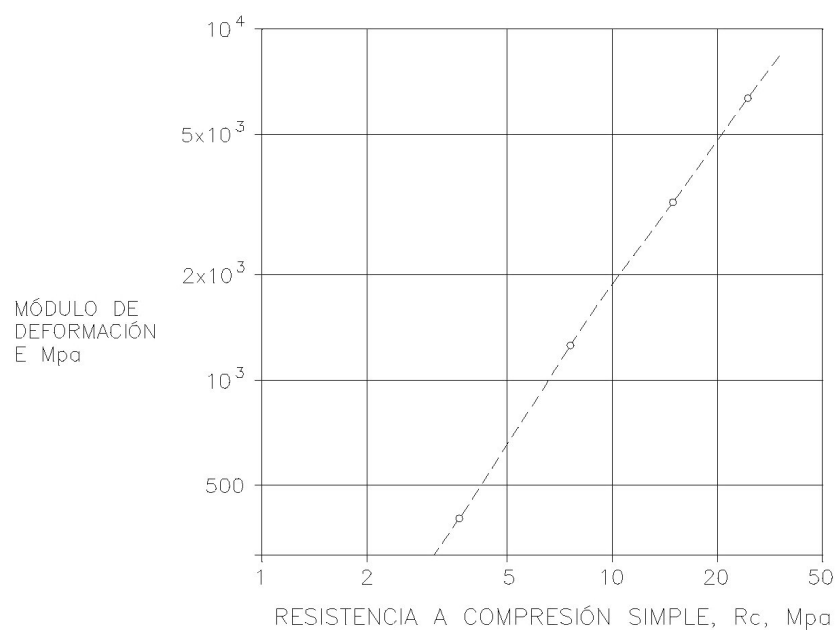


FIG. 3.- RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD DEL YESO

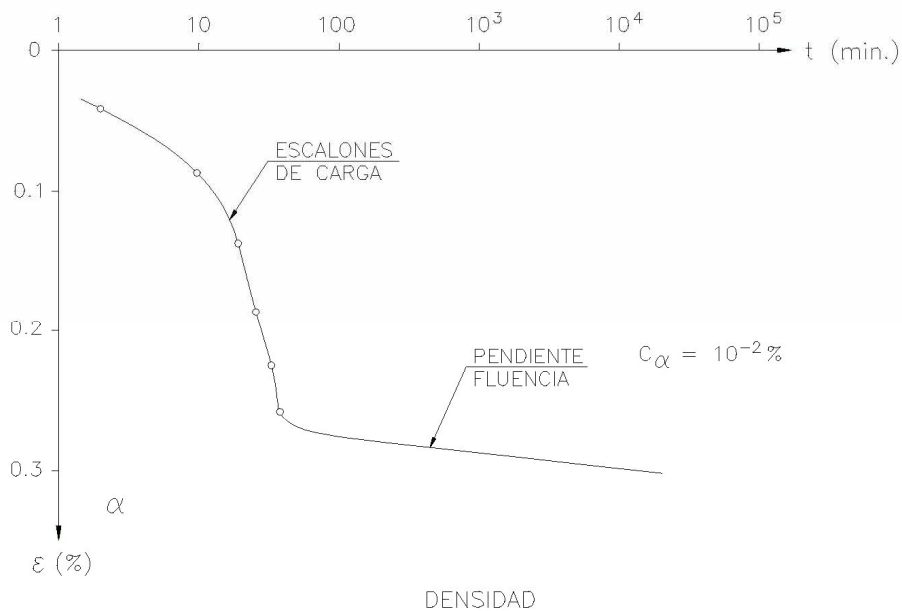


FIG. 4.- FLUENCIA DEL YESO EN COMPRESIÓN CONFINADA (25kp/cm²)

En este caso concreto de la R-4 se han realizado ensayos con probetas talladas a partir de los bloques de yeso, obteniéndose correlaciones cualitativamente semejantes a las antes mencionadas, como puede verse en las Figs. 5, 6, 7 y 8.

Las diferencias esenciales entre estos yesos de la R-4 y los anteriormente citados, procedentes de la cuenca del Ebro en Zaragoza, quedan patentes cuando se comparan los gráficos de resultados de ensayos correspondientes a uno y a otro. En R-4 parece que la roca de yeso es algo menos densa, menos resistente, transmite las ondas sónicas con similar (quizás menor) celeridad y tiene una deformación instantánea (módulo de elasticidad) y diferida que, en términos globales son equiparables.

La relación entre el módulo de elasticidad dinámico (E_d), deducido de los ensayos sónicos en laboratorio y el módulo de elasticidad estático (E_e) medido, también en laboratorio, con LVDT en ensayos de compresión simple, resulta ser del orden de 6 (valor medio). Ver Fig. 9. Pero los pocos datos existentes no permiten precisar este valor ni su posible variación en función de la densidad aparente del yeso o de otros parámetros de estado.

4. LA MEZCLA DE YESOS Y ARCILLAS EN LABORATORIO

Sería imaginable construir un pedraplén de yeso, usando únicamente el yeso masivo fragmentado. El comportamiento teórico de un pedraplén de yeso, sin ningún otro suelo o roca que lo acompañe, tiene importancia al menos como elemento límite para compararlo con el que después interesa; el de las mezclas de yeso con otros suelos.

Es muy interesante el trabajo de J. M. Rodríguez Ortíz, antes citado, en el que se da cuenta del resultado de unos ensayos edométricos sobre fragmentos de roca de yeso.

En el proceso de deformación de escolleras de yeso se observan tres componentes o fases bien diferenciadas.

FIG. 5.- RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE DE LA ROCA DE YESO

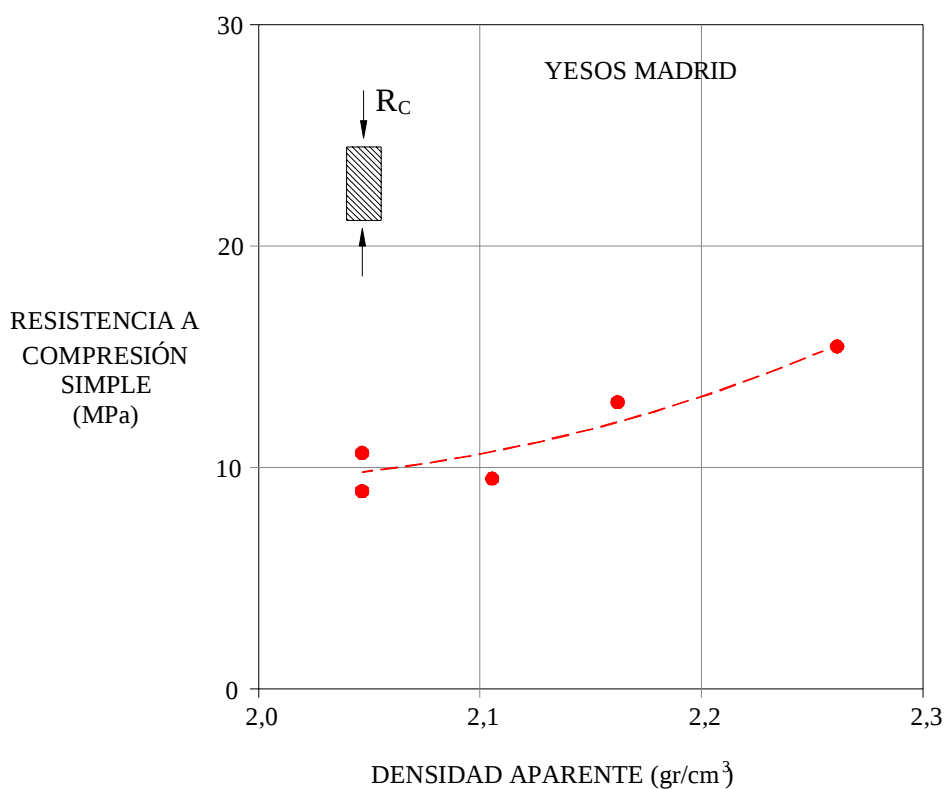


FIG. 6.- CELERIDAD DE LAS ONDAS SÓNICAS EN LA ROCA DE YESO

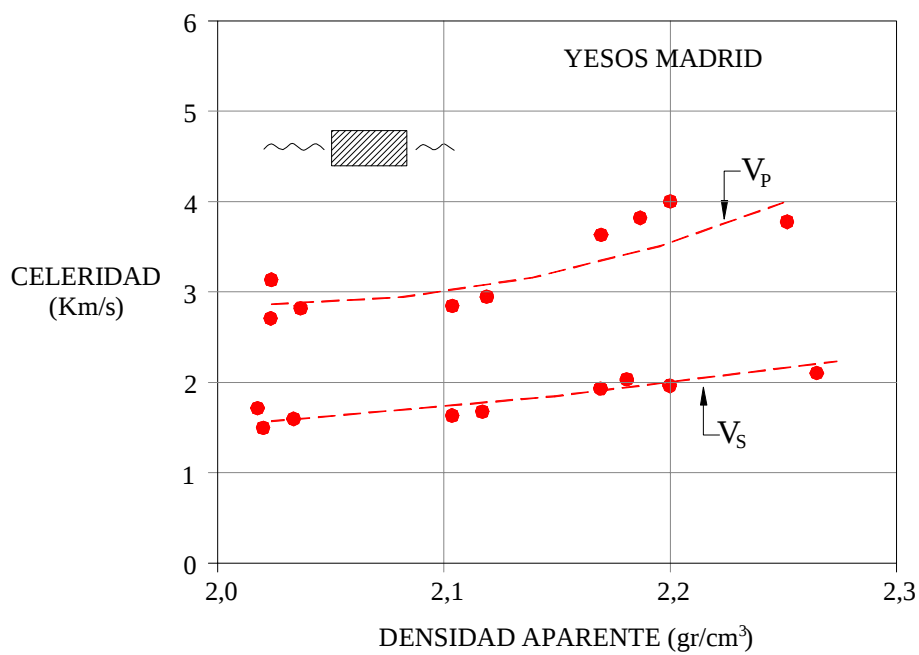


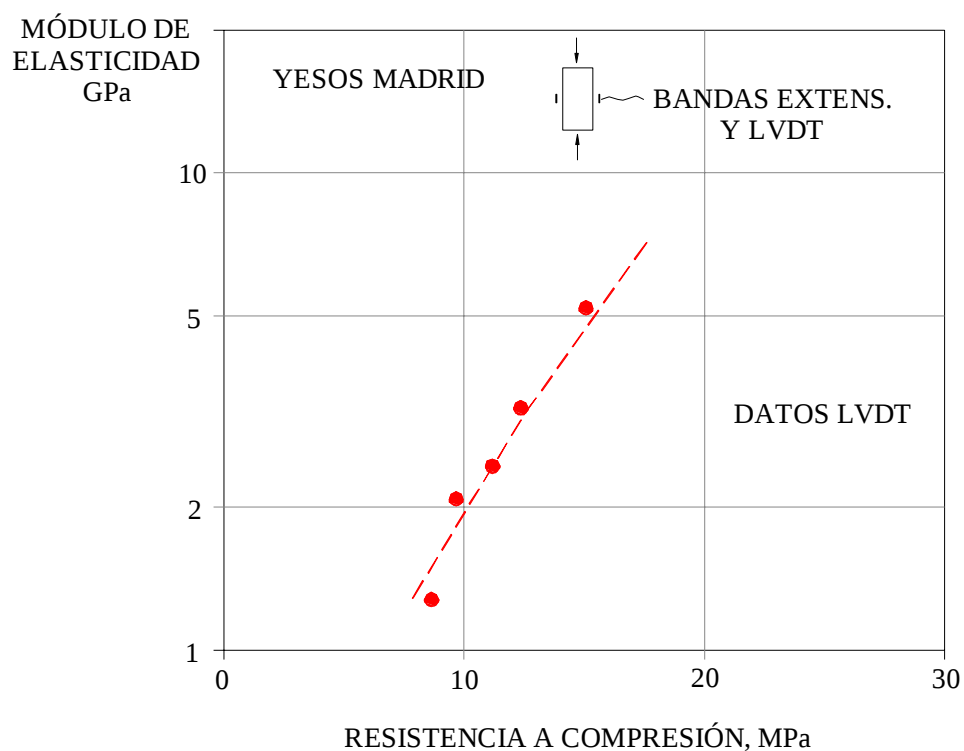
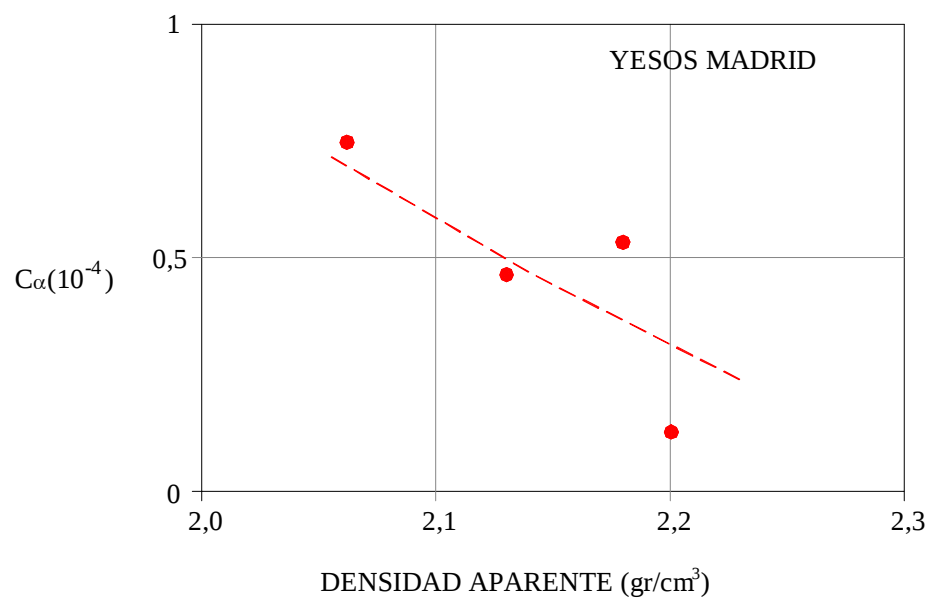
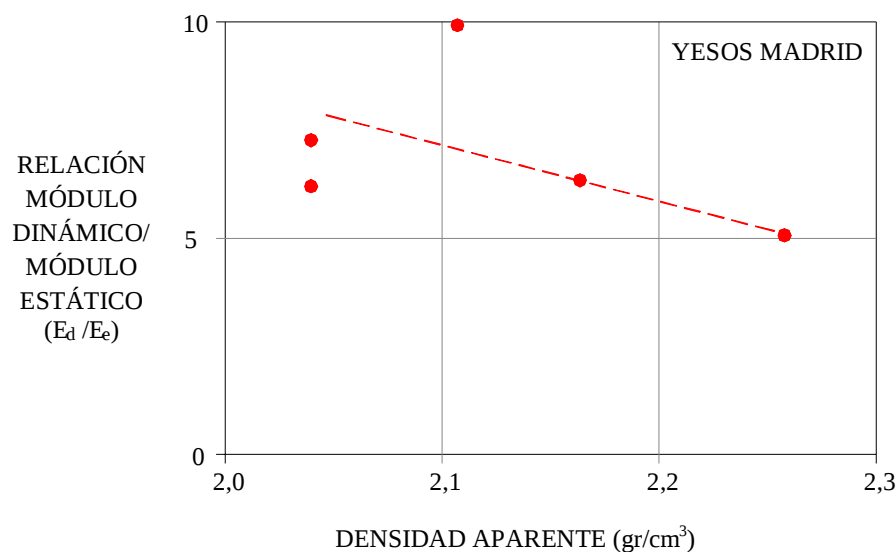
FIG. 7.- MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA ROCA DE YESO**FIG. 8.- ÍNDICE DE FLUENCIA DE LA ROCA DE YESO
($p = 25 \text{ kp/cm}^2$)**

FIG. 9.- RELACIÓN MÓDULO DINÁMICO/MÓDULO ESTÁTICO



- Compresión instantánea, que alcanza, en esos ensayos, hasta cerca del 10% cuando se comprime la escollera (de tamaños 4 a 5 cm) con cargas de 4.2 kp/cm². El módulo edométrico medio resulta en el entorno de 40-50 kp/cm².
- Colapso por humectación. Resulta excepcionalmente importante en los dos ensayos. Es del orden del 5%. Absolutamente inadmisibile en ninguna obra.
- Fluencia diferida. También muy importante. Del orden del 1 al 4% al mes. En caso de ser de velocidad constante o aproximadamente constante, no sería soportable en las aplicaciones prácticas.

La rotura de contactos entre fragmentos de yeso hace que las “escolleras” de yeso sean excepcionalmente deformables y en consecuencia su uso, en grandes terraplenes, es desaconsejable.

La mezcla de yesos fragmentados a distintos tamaños y junto con las margas u otros materiales que los acompañan en la naturaleza, es el producto que intuitivamente parece más adecuado para ser utilizado en la construcción de terraplenes de carretera.

La mezcla de estos materiales en los depósitos miocenos puede caracterizarse con un parámetro clave que es el porcentaje de yeso. Es el número que más se utiliza en las experiencias previas. Las propiedades de la mezcla dependen fundamentalmente de ese dato.

La granulometría de las mezclas margas-yesos o arcillas-yesos depende del proceso de extracción, transporte, extendido y compactación. Con un proceso de trituración suficientemente intenso, teóricamente se puede conseguir la granulometría deseada de la mezcla. Con esta idea, puede concluirse que, dentro de un cierto rango, se pueden obtener las características que más interesen mediante la adecuación del proceso de puesta en obra.

En laboratorio y a pesar de usar probetas de grandes dimensiones, no es fácil ensayar muestras representativas del material. En este caso sólo se han usado moldes de 10" (edómetro Rowe) o probetas de 9" (ensayo triaxial). La limitación de tamaños es evidente, pues en obra se usarán fragmentos de yeso de mayores proporciones.

4.1. Granulometría, densidad y humedad

Las muestras ensayadas en laboratorio fueron tomadas de los terraplenes de prueba de los que después se hablará. Para preparar las probetas se eliminaron los tamaños superiores a $\frac{3}{4}$ " y con ello se consiguió una granulometría continua artificial con un porcentaje de finos del orden del 50%.

La mezcla se compactó en todos los ensayos tratando de obtener una densidad seca igual al 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado, que en este caso, realizado previamente, condujo a los valores siguientes:

Densidad seca máxima: $\gamma_{\text{máx}} = 1,92 \text{ t/m}^3$

Densidad óptima: $w_{\text{opt}} = 9\%$

Los valores indicados son la media de dos determinaciones.

Los suelos que acompañan a los yesos son limos y arcillas de baja plasticidad ($IP \cong 10\%$). Debe decirse que no es fácil realizar los ensayos de determinación de los límites de Atterberg pues, además de algunas otras complicaciones, en algunos ensayos se ha observado el endurecimiento (“fraguado”) de las muestras. En todo caso se ha contrastado que las posibles arcillas que acompañan a los yesos en el trazado de la R-4 no son expansivas, no existen esmectitas en las muestras ensayadas.

La humedad natural de las muestras recibidas en laboratorio está en el entorno del 4-5%. Para la granulometría indicada antes (fracción $< \frac{3}{4}$ ”) esta es la humedad natural esperable en la época de estío (Agosto de 2002) cuando se ejecutaron los terraplenes de prueba.

En esto de la humedad conviene aclarar que no se contabiliza el agua de constitución del yeso. En los ensayos de laboratorio se han determinado las humedades secando las muestras con temperaturas bajas ($\cong 40^{\circ}\text{C}$) para no eliminar esa parte de agua, que en este caso, con tanto yeso, supondría una cantidad importante.

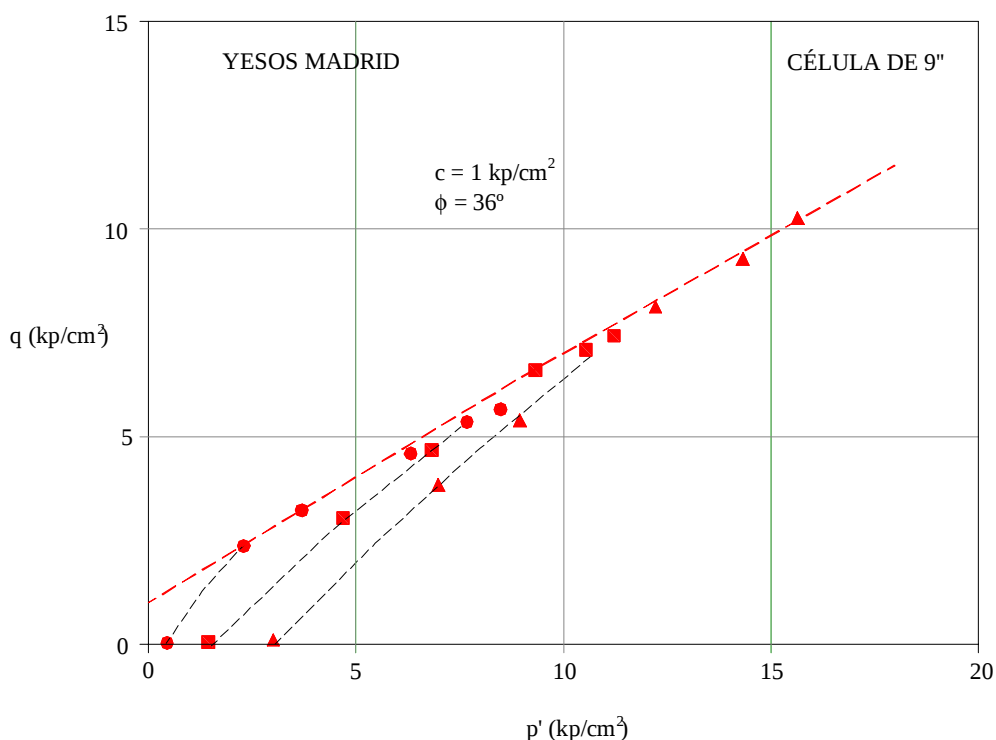
4.2. Resistencia y deformabilidad

Las probetas sometidas al ensayo triaxial C.U. de 9” de diámetro han indicado una resistencia que puede aproximarse con los siguientes valores de los parámetros del criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

$$c' = 1 \text{ kp/cm}^2 \qquad \phi' = 36^{\circ}$$

La calidad de este ajuste puede verse en la Fig. 10. El material se comporta elásticamente al comienzo del ensayo antes de alcanzar deformaciones axiales del orden del 1% y después exhibe cierta dilatancia generándose presiones intersticiales negativas. En el diagrama de la Fig. 10 se han representado las tensiones efectivas para valores de la deformación axial del 1%, 2%, 5%, 10% y 20% en cada una de las tres probetas ensayadas.

**FIG. 10.- RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL C.U.
MEZCLA DE YESOS CON ARCILLAS**



La deformabilidad observada en triaxial para acortamientos ya superiores al 1% puede ajustarse mediante un modelo hiperbólico cuyos parámetros son:

$$K = 900 \quad N = 0,2 \quad R_f = 0,95$$

En los ensayos edométricos realizados en seco, en la célula Rowe, se obtienen módulos edométricos crecientes a medida que avanza el ensayo, aumentándose la presión, según se indica en Fig. 11. Estos ensayos “secos” se han continuado durante varios días en algunos escalones de carga para poder medir el valor en la deformación diferida y obtener una idea del índice C_α . Los valores de C_α se recogen gráficamente en Fig. 12. La proporción C_α/C_c parece independiente de la carga aplicada y queda en el entorno indicado en esta última figura.

FIG. 11.- MÓDULOS EDOMÉTRICOS SECOS. MEZCLA DE YESOS Y ARCILLAS

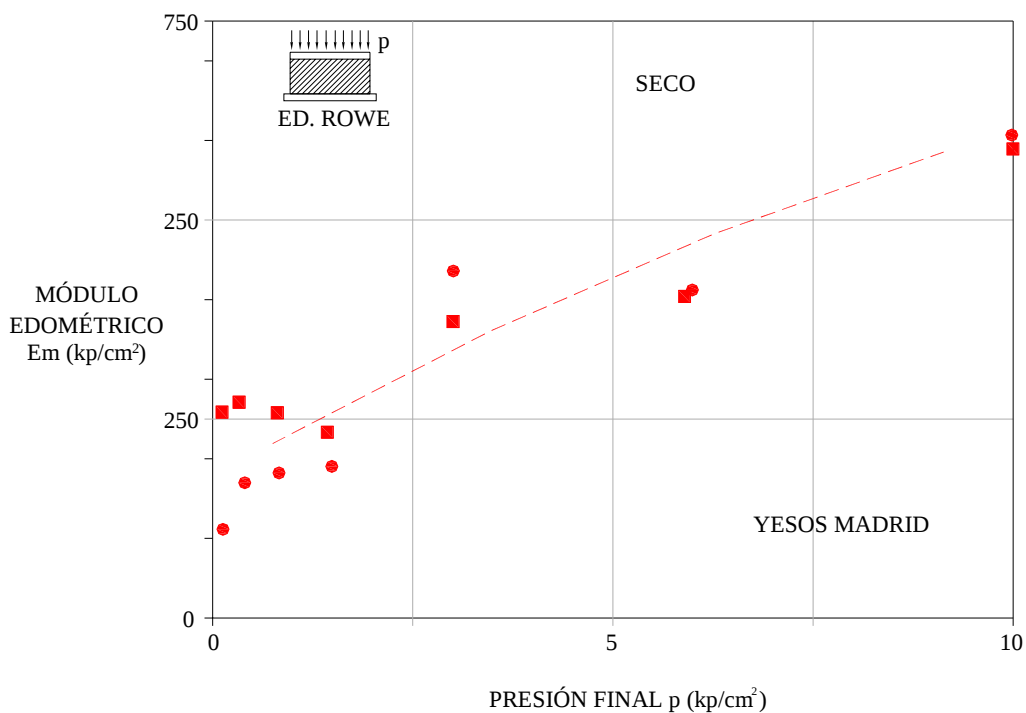
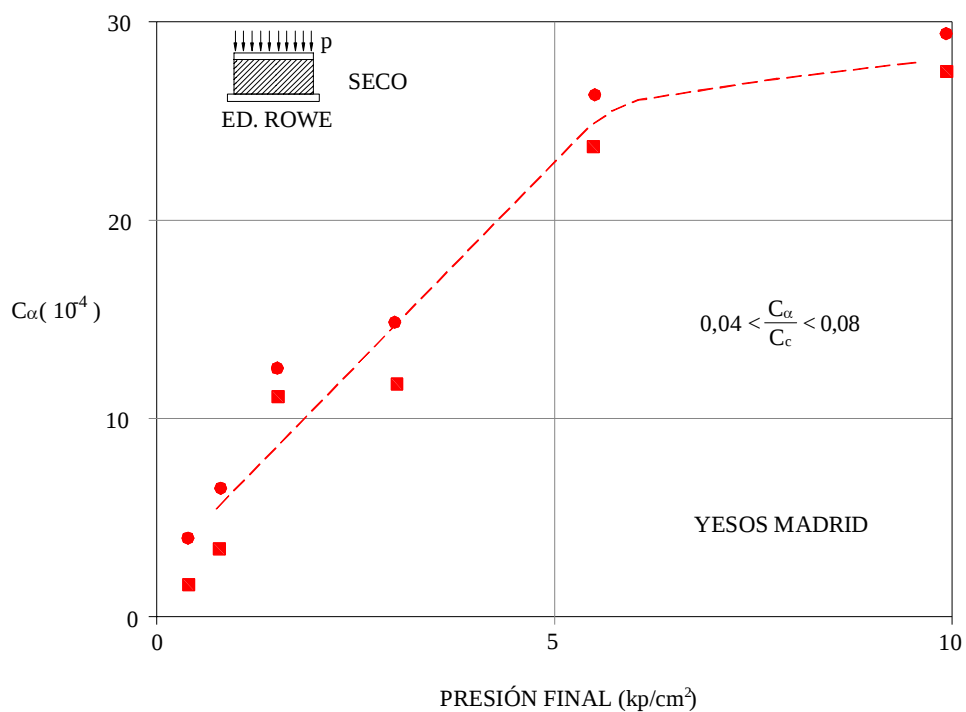


FIG. 12.- ÍNDICES DE FLUENCIA SECOS. MEZCLA DE YESOS Y ARCILLAS



El mismo material, en la misma célula Rowe pero previamente saturado, ha conducido a mayores deformabilidades tanto primaria como secundaria; las deformaciones observadas son del orden del doble de las que se observaron en seco. La proporción que parece existir entre la deformación diferida y la instantánea sigue siendo similar a la que se estima a partir de los ensayos en seco. Ver Figs. 13 y 14.

Ha de resaltarse que los ensayos de fluencia no se han mantenido durante tiempo suficientemente amplio como para corroborar que la ley de fluencia es natural (de velocidad decreciente linealmente con el tiempo). Además la estimación de los valores de C_α es poco precisa habida cuenta el tipo de equipo de ensayo. Los datos que se incluyen deben considerarse sólo como orientativos y útiles únicamente para conocer las tendencias de su variación y un orden de magnitud de su posible valor.

5. TERRAPLENES DE PRUEBA

Las pruebas de compactación en campo se comenzaron tanteando diferentes equipos y distintos procedimientos (Pruebas 1, 2 y 3). Finalmente en la prueba nº 4 se usó ya un procedimiento de construcción similar al que después se dirá y que fue el que guió la ejecución de la obra.

El aspecto del terraplén de prueba nº 4 puede verse en Fig. 15 donde se incluye una fotografía del terraplén de yesos cuando se realiza un “ensayo de macrodensidad”.

Sobre este terraplén se realizaron diferentes ensayos. El ensayo de macrodensidad, que aparece en la fotografía, condujo a densidades aparentes algo por encima de 2 t/m^3 , lo que concuerda bien con el valor esperado.

Los ensayos de mayor interés son los relativos a la deformabilidad del material que se midió mediante cuatro ensayos de placa de carga de 600 mm de diámetro. El valor de los módulos E_1 y E_2 en esos ensayos fue (valores medios y desviación típica):

FIG. 13.- MÓDULO EDMÉTICO DE LA MEZCLA DE YESOS Y ARCILLAS

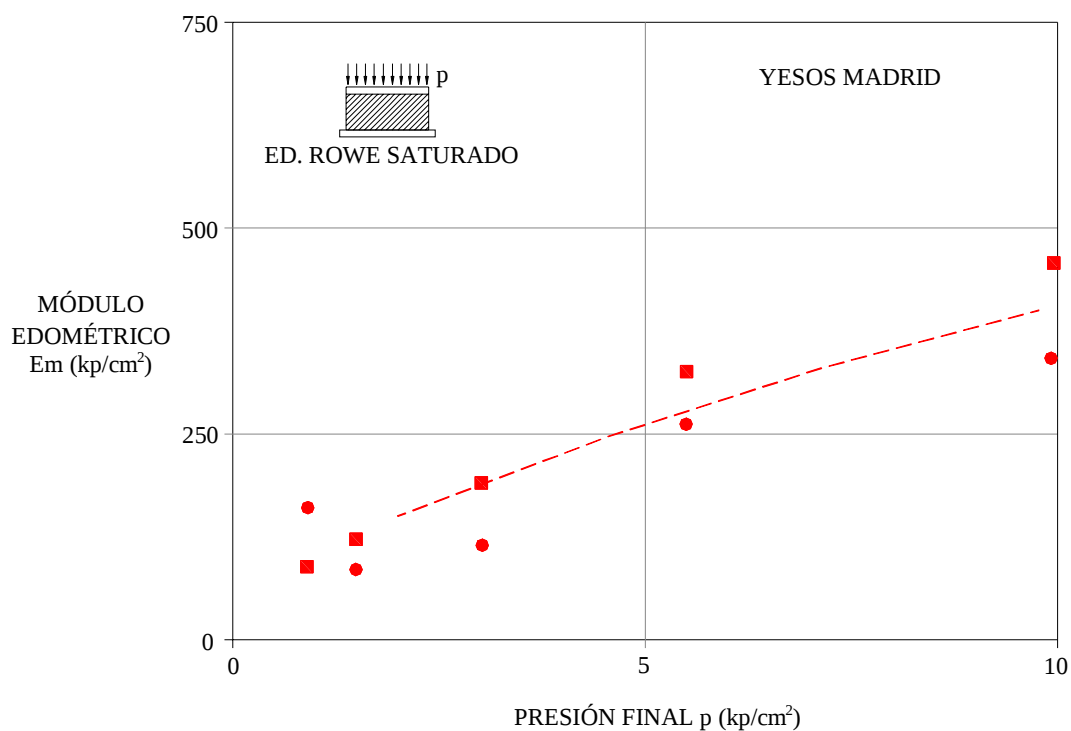


FIG. 14.- ÍNDICE DE FLUENCIA DE LA MEZCLA DE YESOS Y ARCILLAS

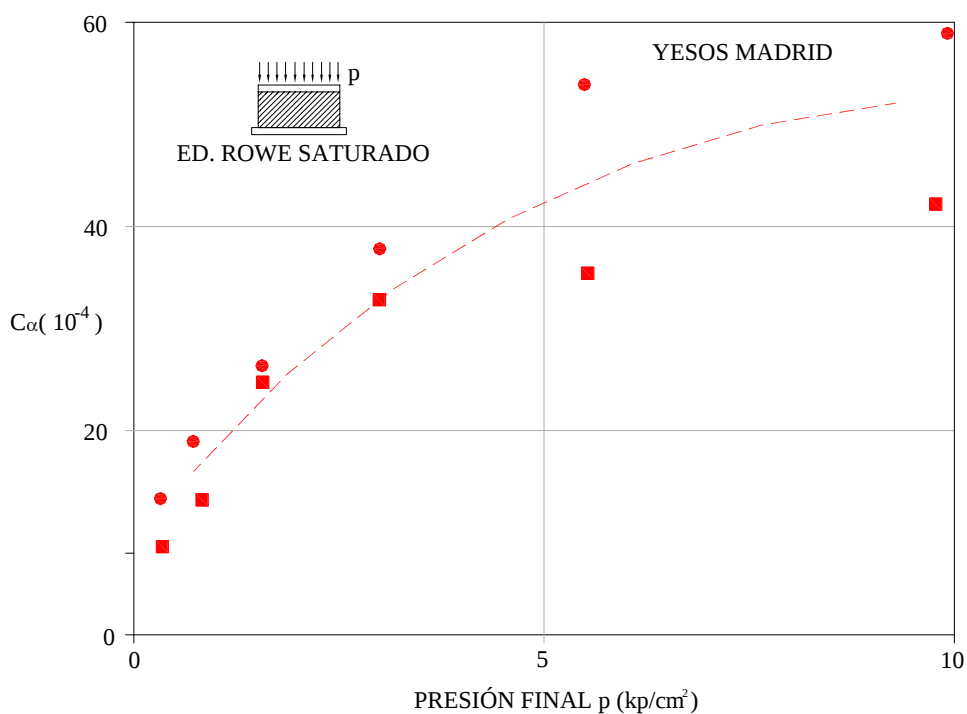




Fig. 15.- Aspecto general de un terraplén de yesos en R-4

$$E_1 = 57 \text{ MPa} \pm 13 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 133 \text{ MPa} \pm 12 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 2,4 \pm 0,4$$

Los ensayos de inundación para medir el posible colapso y la fluencia tras la humectación permitieron obtener los gráficos que pueden verse en Figs. 16 y 17.

6. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Tras considerar la información precedente (más bien durante el proceso de análisis), se definió la sección tipo del terraplén a construir (Ver Fig. 18).

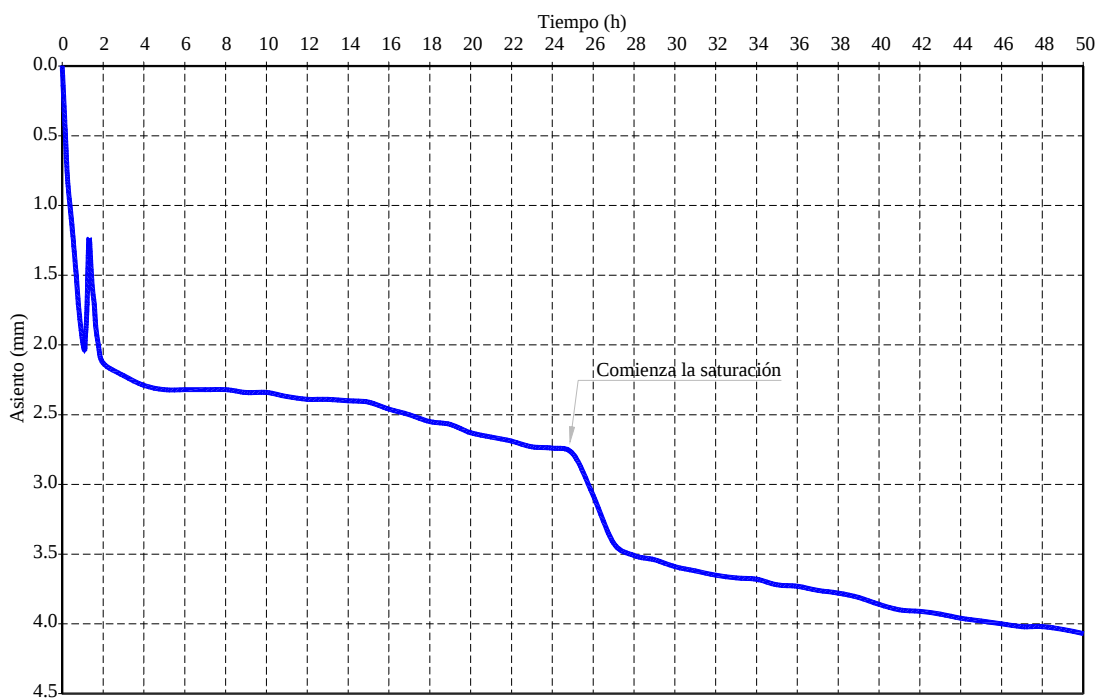


Figura nº 16.- Placa de carga 2. Larga duración e inundación

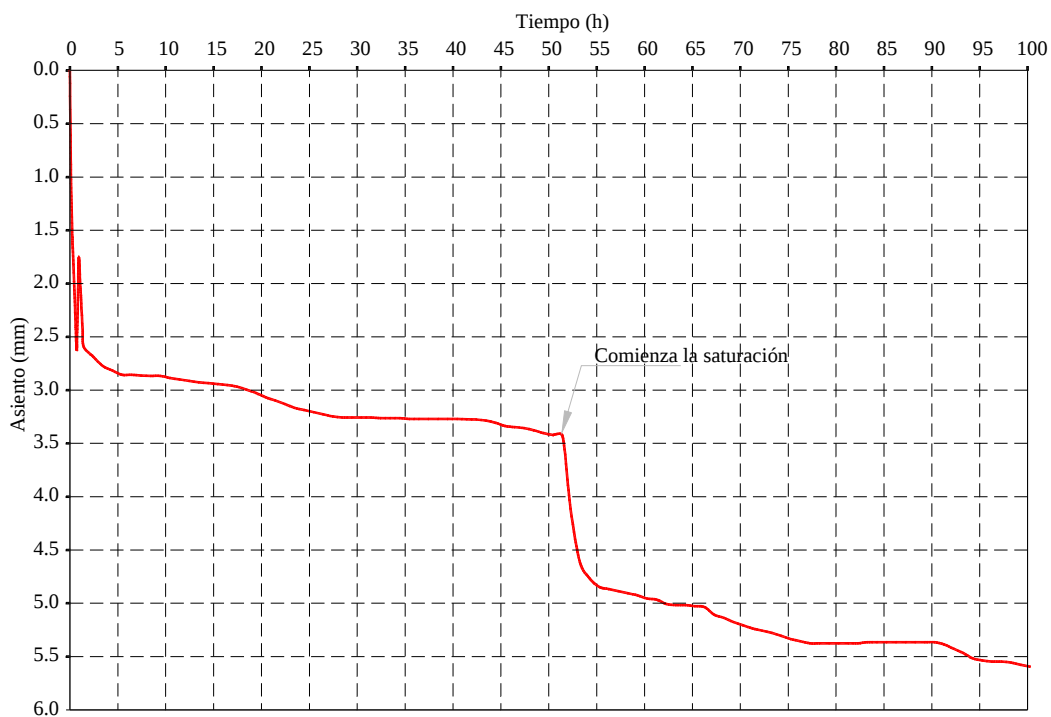


Figura nº 17.- Placa de carga 3. Larga duración e inundación

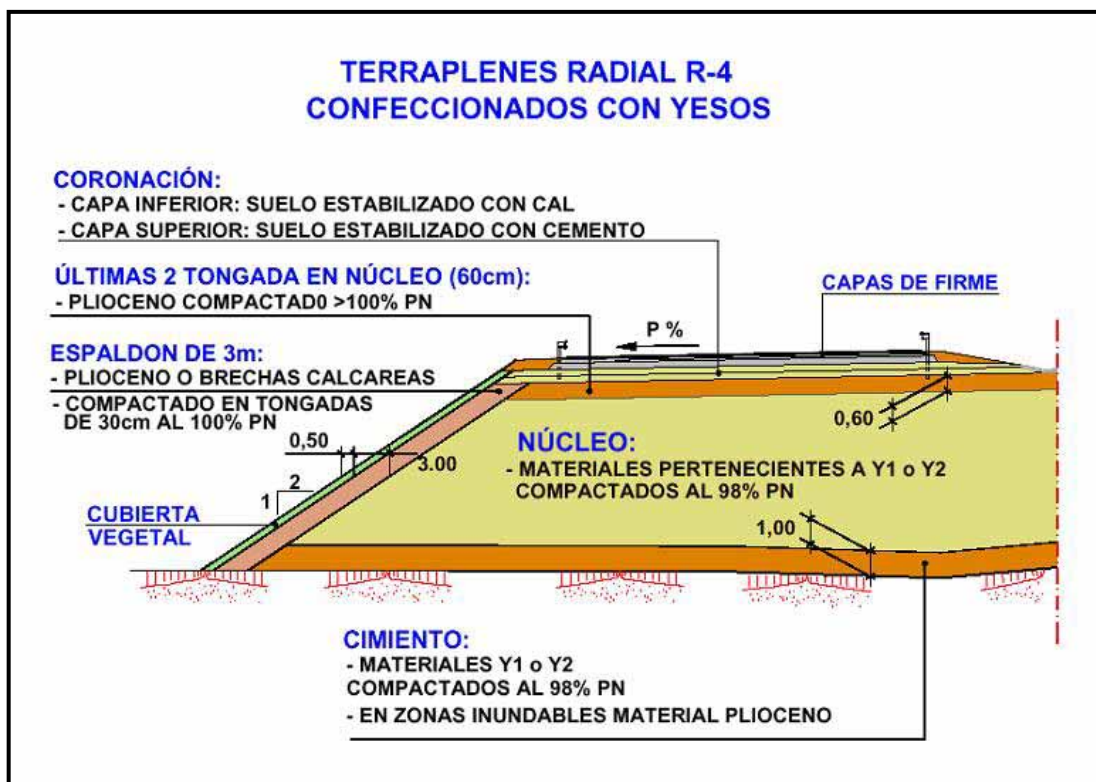


Fig. 18.- Sección tipo

Dicha sección tipo obedece a los siguientes criterios:

- 1) En general, en el cimiento del terraplén podrán emplearse materiales yesíferos. Únicamente se considera necesario disponer una capa de material plioceno en el cimiento del terraplén (banda de encapsulado inferior) en aquellas zonas que puedan estar afectadas por la posible circulación de agua. Por tanto, fundamentalmente será necesario disponer estos materiales en torno a las obras de drenaje. En un documento independiente se describe el tratamiento para estas zonas.
- 2) Los materiales yesíferos deben quedar, al menos, 1.5 m por debajo del nivel de rasante. Al parecer, la capa de coronación del terraplén y la sección del firme suman un espesor del orden de 90 cm, por lo que sería necesario disponer 60 cm de material plioceno interpuesto entre la coronación y los materiales yesíferos. Este material no debe presentar yeso en proporción alguna.

- 3) El terraplén se dispondrá con talud 2H:1V y estará formado bajo la capa de encapsulado superior únicamente por material yesífero. El encapsulado lateral se dispondrá en sobreancho añadido a la sección del terraplén con un ancho mínimo de 2.5 m.
- 4) En el encapsulado que se disponga en la zona de los derrames del terraplén se permite que el material presente hasta un 35% de yeso.
- 5) Los taludes se cubrirán con un espesor mínimo de 0.5 m de tierra vegetal vertida.
- 6) En las secciones en las que el cimiento presente una cierta pendiente transversal, habrán de extremarse las precauciones para evitar que el agua pueda infiltrarse por algún punto y circular por la base del terraplén. Por tanto, será necesario disponer cuneta en el pie del terraplén que permita conducir el agua a las obras de drenaje.

El procedimiento constructivo se guió por los criterios siguientes:

- El espesor de tongada compactada no será mayor de 35 cm.
- El tamaño máximo permitido en la tongada compactada será de 25 cm.
- La compactación debe asegurar que la densidad seca obtenida con el método nuclear sea superior a 1.55 t/m³. Este valor podrá adaptarse cuando se tenga más información, en función de las observaciones que se realicen al ejecutar los terraplenes.
- La humedad deberá incrementarse en un 2%. Parece que este incremento de humedad podría conseguirse con 2 ó 3 pasadas de cuba. En principio, la humedad medida con el equipo nuclear deberá estar comprendida en el rango

del 20 al 30%. Este rango se reducirá con los resultados que se obtengan en los terraplenes.

- Las tongadas presentarán una cierta pendiente transversal. En el anejo 7 apartado 6.4 del Proyecto de Construcción se indica: “Las tongadas deberán extenderse con pendientes transversales del orden de un seis por ciento”.

Con los resultados que se vayan obteniendo en la realización de los terraplenes, se podrá modificar alguna de las exigencias apuntadas e incluir alguna otra adicional.

En función de las observaciones obtenidas con la ejecución de los rellenos de prueba, parece que un posible procedimiento para alcanzar los requisitos exigidos podría consistir en: 6 pasadas dobles con tractor D10 o similar y 3 pasadas dobles con rodillo liso vibrante. Este procedimiento es meramente orientativo, pudiendo adoptarse cualquier otro que cumpla con las exigencias indicadas.

Con anterioridad a la ejecución de los espaldones de plioceno con los que se realice el encapsulado de los yesos, habrá de procederse al reperfilado del talud, eliminando los bolos que hayan quedado en los laterales de las tongadas. Esta actuación es de suma importancia y obliga a ejecutar un núcleo más ancho, del orden de 0.5 - 0.75 m a cada lado, material que se retirará en el reperfilado.

Debe aclararse que la determinación de la densidad seca y la humedad con el equipo nuclear en un terraplén de yesos conduce a una densidad aparente que se asemeja a la correcta, por eso se estableció que, al menos dicha densidad fuese del orden de 1,9 a 2 t/m³. La humedad, sin embargo, es mucho mayor que la real y por ese motivo se especifico (a modo orientativo) que este dato fuese del orden del 20% al 30% sabiendo que la mayor parte de esta agua (probablemente más de 15 puntos) sería agua de constitución del propio yeso. El control con el “troxler” se propuso únicamente con carácter orientativo. Más importancia se quiso dar al control del procedimiento.

Debe añadirse que la altura máxima de los terraplenes a construir alcanzaba puntualmente los 16 m y que, aunque en algún momento, se pensó en no pasar de 6

m en el espesor de terraplén construido con yesos (las capas no yesíferas inferior (1 m) y superior (1,50 m) deberían aumentar, en esos casos, la suma de sus espesores) en la realidad de la obra se ha llegado a colocar, ocasionalmente, espesores de terraplén con yesos por encima de los 12 m.

7. COMPORTAMIENTO

La obra de la R-4 comenzó a construirse en el año 2002, los trabajos de laboratorio y campo que se han descrito en esta nota se llevaron a cabo durante el verano de 2002.

A finales de dicho año se realizaron unos cálculos estimando los asientos que podrían producirse durante la construcción de un terraplén tipo. Ver Fig. 19.

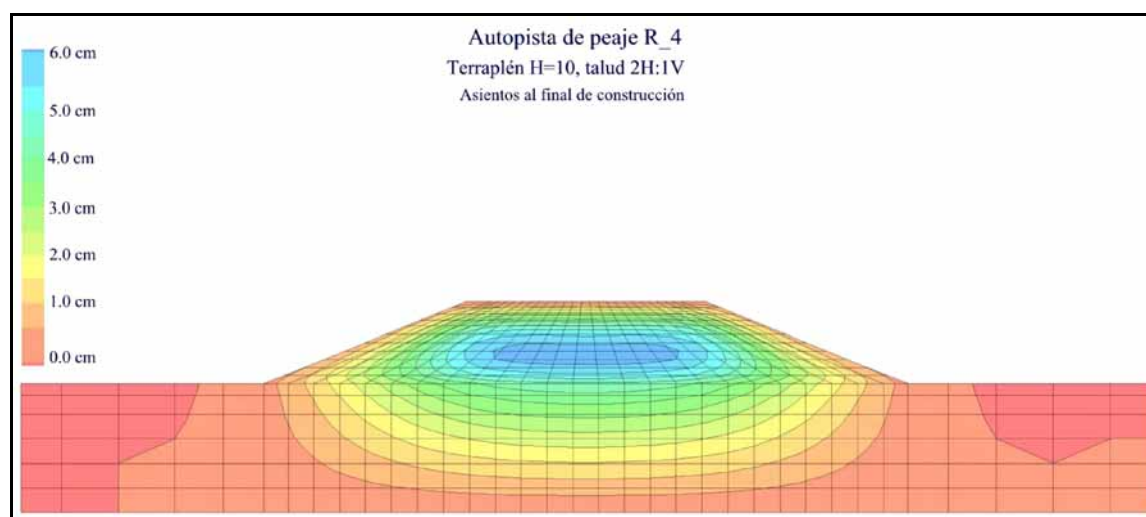


Fig. 19.- Perfil tipo de cálculo de asientos

Con ello se animó al constructor para que midiese los asientos durante construcción.

También se hizo una estimación de la velocidad de asiento durante el primer año de explotación de la obra, ver Fig. 20. Lógicamente se trataba sólo de un cálculo orientativo que se realizó únicamente para cubrir un aspecto esencial de la auscultación; no medir algo sin antes estimar el resultado esperable.

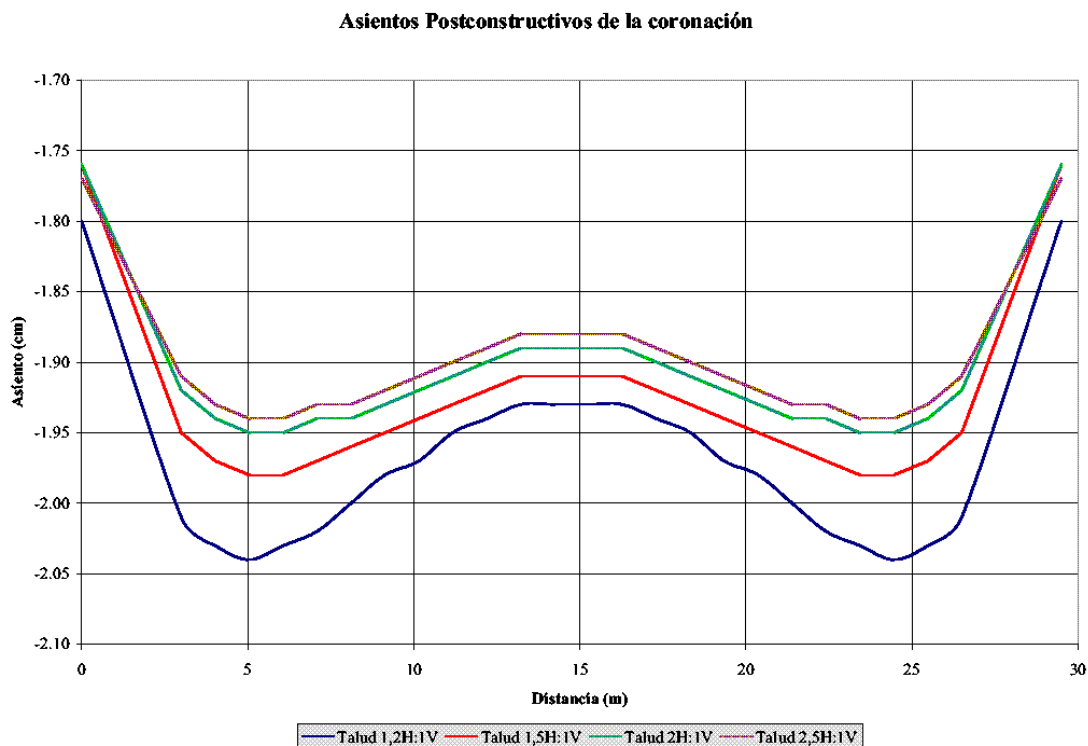


Fig. 20.- Estimación de asientos durante el primer año. Cálculos teóricos para varias pendientes del talud lateral

Se intentó medir el asiento de construcción en algún terraplén. Pero no se llegó a consumir el intento. Que se sepa no se ha seguido la recomendación reiterada de controlar asientos durante la explotación. Pero esto es común en este tipo de obras. Ahí está la R-4. Los resultados de esta experiencia los conoceremos como usuarios.