

## TÍTULO DE LA COMUNICACIÓN:

“Procedimiento y comportamiento de terraplenes realizados con materiales yesíferos”.

AUTORES: D. Francisco Javier Castanedo Navarro, Ingeniero de Caminos, Profesor UCM  
D. Rafael Pérez Arenas, Dr. Ingeniero de Caminos, Profesor UPM  
D. Carlos Oteo Mazo, Dr. Ingeniero de Caminos, Catedrático Ingeniería del Terreno

## RESUMEN

Se ha incluido en la presente comunicación una exposición de la experiencia actualmente existente sobre la colocación de materiales predominantemente yesíferos en terraplenes de carreteras, así como los procedimientos o normativas existentes en la normativa internacional para materiales similares y que pueden adaptarse a terraplenes en que se incluyan materiales yesíferos.

Para cada una de las obras realizadas en España con estos materiales en que hayan intervenido algunos de los autores de esta comunicación, se ha incluido la sección tipo del terraplén zonado realizado, incluso elementos de encapsulado, así como el proceso constructivo para la ejecución del relleno y procedimientos de control, que dada la singularidad de estos materiales deberían basarse en criterios distintos a los tradicionales, que están basados en la obtención de la densidad y humedad in situ, conceptos que no serían representativos del comportamiento futuro de los yesos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los materiales marginales e inadecuados, de acuerdo con las prescripciones del PG-3, 2002, se encuentran los materiales yesíferos, bien sea en forma de predominio de roca yesífera o como margas o arcillas yesíferas.

De acuerdo con las prescripciones del PG-3, 2002, según el contenido en yesos estos materiales pueden colocarse según distintas prescripciones, pero en cualquier caso siempre que el contenido en yesos sea inferior al 20%.

En la comunicación de Soriano presentada al II Jornada sobre Materiales Marginales en Obras Viarias, celebrada en Sevilla en 2007, se citan las siguientes obras en que se han utilizado margas yesíferas con distintos porcentajes de yesos, aunque las mismas no están muy documentadas, pero en las que parece que no se han planteado problemas de importancia:

- Carretera Nacional II
- Autopista A-2
- Carretera Nacional 240
- Carretera Comarcal 129
- Carretera Comarcal 222
- Carretera de acceso al Casino Montesblancos

Igualmente deben destacarse las referencias sobre evolución de asientos en varios terraplenes de la A-2 que figuran en la publicación de Rodríguez Ortiz al Simposio de Geotecnia Vial de Vigo, 1994.

Se realiza en esta comunicación la exposición de varias obras realizadas con la utilización de materiales yesíferos, en distintos porcentajes e incluso claramente por encima del límite del 20% reflejado en las prescripciones anteriores.

## 2. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES Y CRITERIOS DE UTILIZACIÓN DE MATERIALES SOLUBLES Y QUE PUEDEN PRESENTAR FENÓMENOS DE COLAPSO Y REBLANDECIMIENTO DE LOS CONTACTOS ENTRE PARTÍCULAS

Las características fundamentales de los materiales yesíferos de cara a su colocación en rellenos de infraestructuras viarias serían las siguientes:

- La solubilidad de estos materiales.
- La colapsabilidad que presentan los rellenos con este tipo de materiales cuando presentan un porcentaje apreciable de arenas y limos.
- La degradación de los contactos entre partículas, sobre todo en presencia de agua.

Estas tres pautas de comportamiento igualmente las experimentan otro tipo de materiales inexistentes en España, pero muy abundantes en Francia y el Reino Unido, como son las cretas (chalk) que además también pueden contener hasta un 30% de sulfatos  $\text{SO}_3$ , esto es casi el 50% de yesos, pero con la única diferencia de que también existe un predominio de carbonato cálcico pero de origen fosilífero y por tanto con mucho mayor contenido en huecos que provoca una reducida densidad en la creta. De acuerdo con esto, parece que las recomendaciones y normativas existentes en el Reino Unido y Francia para la utilización de cretas podrían ser extrapolables para la realización de terraplenes con yesos, siempre que no existiera otro material de mejores características que pudiera utilizarse.

### \* Recomendaciones de Gran Bretaña (para cretas)

La gran extensión que dentro de Gran Bretaña ocupa el sustrato de cretas ("chalk") hace que no sólo exista una normativa general del Reino Unido, sino también normativas o recomendaciones locales en cada condado.

Aparte de las metodologías por condados, hay una normativa general, que es la reflejada en la Norma LR-806 (Ingoldby y Parsons) sobre la utilización de cretas en rellenos, incluida dentro de la Normativa del TTRL.

De acuerdo con esta Normativa general, se recomienda la colocación de la creta en tongadas gruesas de 300 a 700 mm, con compactación mínima para evitar romper los nódulos, siendo suficiente por ejemplo 4 pasadas de rodillo liso de 20 KN/m a 80 KN/m.

Las condiciones de compactación, variarán según la naturaleza de la creta y en función de los siguientes parámetros:

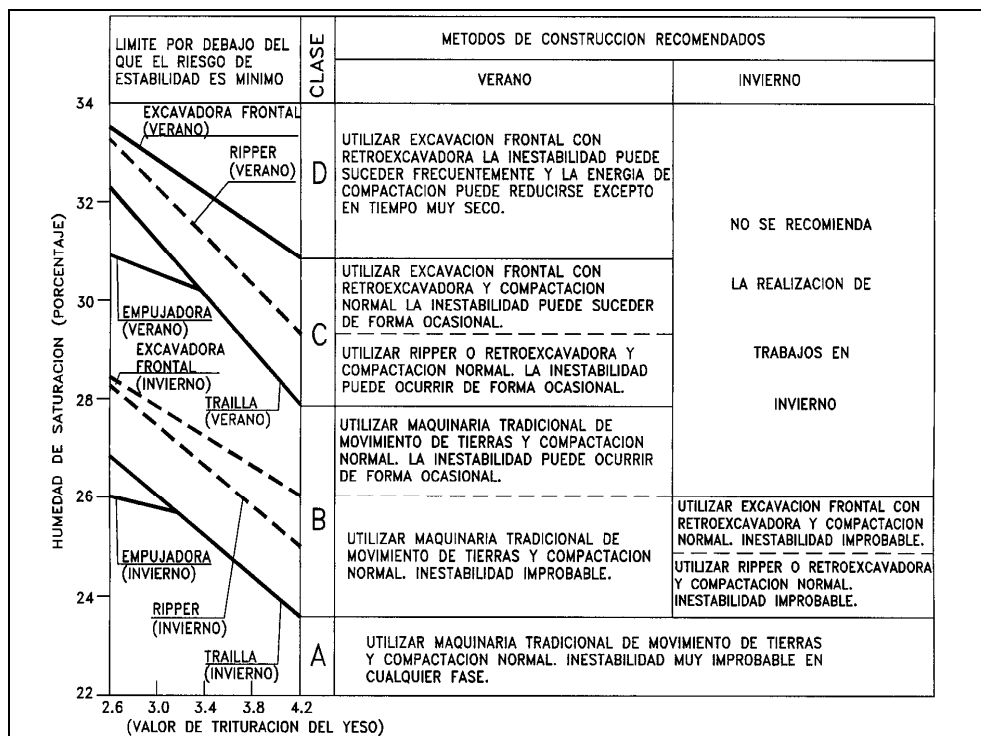
- Un nuevo parámetro definido como "Chalk crushing value" o ccv equivalente al ensayo tradicional de carga sobre zahorras, y realizado en el mismo molde que el utilizado para arcillas blandas con el MCV, que puede verse en la foto 2.1.



Foto 2.1.- Detalle del equipo MCV con el que se obtiene el índice “CCV”

- Porcentaje de humedad para la saturación de la creta o el yeso, lo que viene a indicar qué volumen de porosidad al aire le queda a esta formación para evitar el riesgo de colapso por contenido en agua superior al límite líquido en caso de su disgregación.

Definiéndose cuatro calidades de creta “A, B, C y D” en el cuadro 2.1 sin traducir las recomendaciones.



Cuadro 2.1 – Recomendaciones colocación cretas en función del índice Chalk crushing value

Las recomendaciones francesas consideran que deben tenerse en cuenta unos parámetros complementarios, en que se considere además el estado de humedad natural del yeso

respecto a su humedad de saturación, puesto que en las zonas meridionales de Europa estos materiales, como todos los demás, suelen tener grados de saturación claramente inferiores al 100%.

El procedimiento para su colocación cumpliría las siguientes recomendaciones:

- \* Excavar separadamente
  - \* No utilizar ripper
  - \* Utilizar pala excavadora (retro)
  - \* Explotación frontal de 3-5 m de altura
  - \* No apilar ni acopiar
  - \* No trabajar en invierno (1 Nov-31 Marzo)
  - \* No hacer sandwich en terraplén
  - \* Reducir los esfuerzos de compactación
  - \* Camiones < 15 CUM
  - \* Sellar con 2 pasadas de rodillo de 2100 kg al final del día
  - \* Parar si se producen inestabilidades temporales
  - \* Retrasar el acabado del terraplén 1-2 meses.
- \* Normativa Francesa

La Normativa Francesa ha sido realizada fundamentalmente por M. Rat y M. Schaeffner., los cuales comentan que la Norma Inglesa del LR-806, tiene los siguientes inconvenientes:

- a) El CCV es un procedimiento poco repetitivo, ya que depende de la fuerza del operario.
- b) La categoría del yeso o creta "A, B, C ó D" depende poco del CCV
- c) No se tiene en cuenta el grado de saturación del yeso o creta, sino únicamente su humedad máxima.
- d) La determinación de la humedad de saturación de los trozos de yeso o creta es un proceso largo, y que claramente puede no ser útil.
- e) En yesos o cretas muy duras o muy alteradas no se puede realizar el ensayo CCV.

En función de estos inconvenientes, recomiendan otro tipo de clasificación y recomendaciones que siguen en general las normas básicas de la Normativa Francesa.

Así, en el gráfico de la figura 2.1 se representan los parámetros de clasificación basados en:

- Densidad seca de los bloques de creta.
- Humedad de los bloques de creta

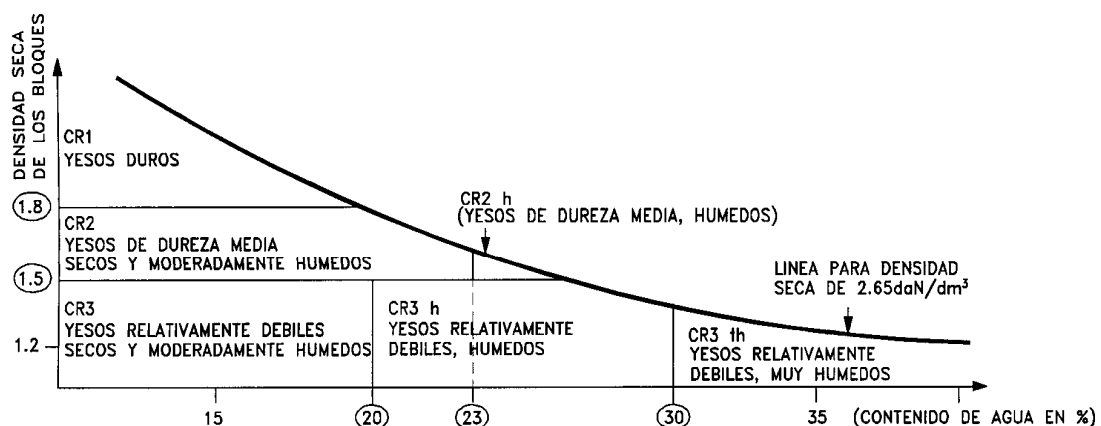


FIGURA 2: SISTEMA DE CLASIFICACION DE YESOS USADO EN FRANCIA

| TIEMPO                   | CODICIONES DE USO EN TERRAPLEN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LLUVIA MODERADA O FUERTE | SITUACION EN LA QUE NO ES POSIBLE ALCANZAR UNA ADECUADA CALIDAD EN LOS TERRAPLENES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| LLUVIA LIGERA            | R CAPAS DE ESPESOR MEDIO A PEQUEÑO.<br>C ALTA ENERGIA DE COMPACTACION.<br>H LA COMPLICACION DE MEZCLAR EL CONTENIDO DE AGUA JUNTO CON LAS DIFICULTADES DE LA COMPACTACION, QUE AUMENTAN EL RIESGO DE UN POSTERIOR EMPEORAMIENTO, IMPLICA QUE BAJO ESTAS CONDICIONES DEBERIA LIMITARSE SU USO PARA TERRAPLENES DE ALTURA MEDIA A BAJA.                                                                                                                                                                                          |
| SIN LLUVIA               | SOLUCION 1<br>E EXTRACCION DE FINAS CAPAS PARA ASEGURAR UNA BUENA FRAGMENTACION.<br>R EXTENSION DE DELGADAS CAPAS PARA CONSEGUIR LA TOTAL FRAGMENTACION Y ASEGURAR UNA BUENA COMPACTACION.<br>C ALTA ENERGIA DE COMPACTACION.<br><br>SOLUCION 2<br>R CAPAS DE ESPESOR MEDIO O PEQUEÑO.<br>C ALTA ENERGIA DE COMPACTACION.<br>H LA DIFICULTAD DE ALCANZAR UNA ELEVADA COMPACTACION MEDIANTE EL EMPLEO DE COMPACTADORES IMPLICA QUE ESTA SOLUCION SOLO PUEDA SER CONSIDERADA UNICAMENTE PARA TERRAPLENES DE ALTURA BAJA A MEDIA. |

FIGURA 3: CONDICIONES DE USO DE LA CLASIFICACION CR<sub>3m</sub> Y S EN TERRAPLENES.

Figura 2.1 - Parámetros de clasificación normativa francesa

La variación en el criterio de la Normativa Francesa se basa pues fundamentalmente, en que puede entenderse que las crestas no tienen por que estar saturadas, lo que por el contrario es mucho más usual en climas más húmedos como en el Reino Unido.

### 3. EXPERIENCIAS EN LA UTILIZACIÓN DE ARCILLAS YESÍFERAS Y YESOS EN ESPAÑA

Hay una amplia experiencia de colocación de materiales yesíferos, aunque en muchos casos no se haya publicado la misma, y con comportamientos muy dispares.

#### a) Autopista Burgos-Málaga

Una primera referencia es el Tramo entre Burgos y Pancorbo de la Autopista Burgos-Málaga, con alturas de terraplenes de 3,0 a 30,0 m y construidos en los años 1976-1977, y que viene citado en el Manual de Terraplenes y Pedraplenes del MOPT.

El porcentaje de yeso se mantenía en valores del 30 al 40 %, con granulometría de predominio del tamaño grava, y englobados en una matriz arcillosa.

Los rellenos se construyen sin protecciones especiales, en tongadas de 30-40 cm y con una compactación muy cuidada para garantizar que las gravas de yeso quedan englobadas en una matriz arcillosa.

La compactación que se realizó del lado seco y con rodillo vibratorio de 12 Tn.

Para documentar la decisión de utilizar este material especial, se investigaron además Terraplenes del FF.CC. Madrid- Irún construidos con estos materiales que no habían presentado problemas, y en ese momento con más de cincuenta años desde su ejecución.

#### b) CN-340 en la zona de Xátiva

Otra referencia bibliográfica de mayor interés es la publicada por Morilla (1994), en el III Simposio Nacional de Geotecnia Vial de Vigo, en la que se expone el empleo de las arcillas con yesos del Triásico en la zona de Xátiva (Valencia).

En esta publicación se recoge un estudio exhaustivo de mezclas de yeso/arcillas con porcentajes del 0/100, 40/60, 55/45, 70/30, 85/15 y 100/0.

Las arcillas son de plasticidad media, con predominio de illita y contenido reducido de montmorillonita; el límite líquido es del orden de 40 y con índice de plasticidad de 13-14.

Como conclusión del estudio, para su empleo en el núcleo se recomienda como viable la compactación mediante rodillo vibrante y alta energía de compactación, en tongada de 30 cm, y con humedad no superior a la óptima Proctor menos 2 %.

#### c) Pedraplenes de yesos en paso sobre Tramo II de M-45

Dentro del Tramo II de la M-45 se realizó en los terraplenes de aproximación de un paso superior de un camino el empleo de materiales yesíferos, en el tramo entre la A-3 y el vertedero de Mercamadrid.

El estudio realizado para el empleo de este material se basó en los siguientes puntos:

- El material a utilizar debía proceder del ripado, con lo que su granulometría sería bastante extendida.
- Los índices IPI (CBR sin inundar) deben ser superiores a 20, con colapsos inferiores al 2% y en un rango de humedades que debe estar comprendido entre el 9 y 13%, de acuerdo con el gráfico adjunto:
- Estructura de terraplén zonado constituido por las distintas partes según la figura 3.1.

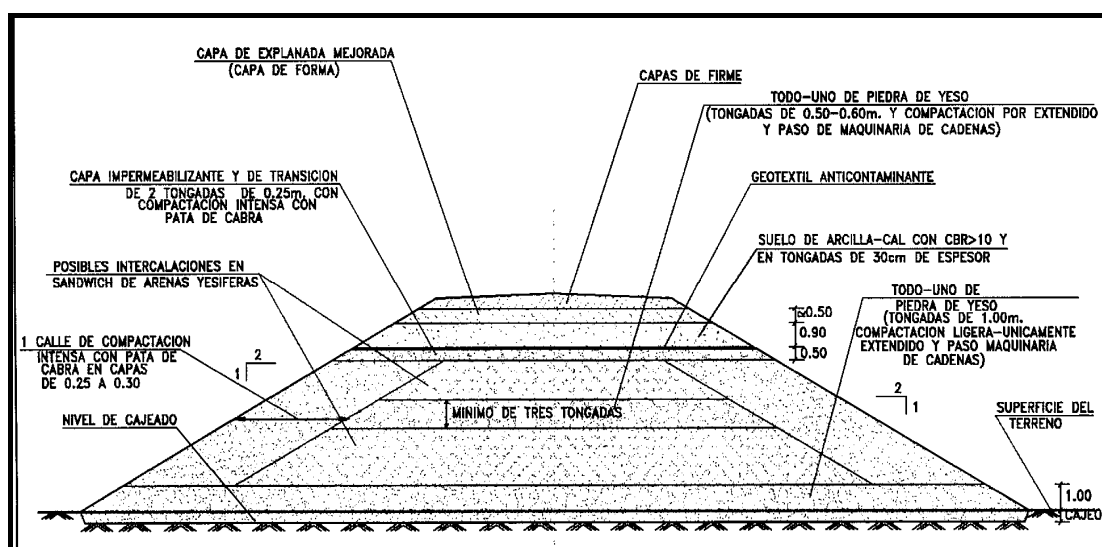


Figura 3.1 – Sección tipo terraplén experimental con yesos en M-45

El método constructivo propuesto es un sistema mixto entre las recomendaciones inglesas y francesas que seguidamente se exponen, y así se tienen:

- Para cimiento y núcleo, pedraplén de yeso realizado según la normativa inglesa y controlado por las especificaciones de ésta para materiales de clase 3 (TRRL Laboratory Report 806).
- Para espaldones y capa de transición, terraplén de yeso ripado realizado según las recomendaciones francesas (Rat y Schaeffner, 1979).

#### d) Carretera de Circunvalación M-50

Dentro del tramo de la Carretera de Circunvalación M-50 desde la autopista A-42 hasta su unión con la A-6, cuya construcción venía incluida dentro del contrato de la Concesión de la R-3 y R-5, se utilizaron suelos marginales con contenido en yesos del 5 al 35%.

El arranque se realizó mediante ripado con bulldózer y la carga mediante retroexcavadora. El transporte en el interior de la obra se ejecutó con dumpers.

El rango de humedad de puesta en obra se situó entre -2 y +2 puntos de la humedad óptima, lo que suponía aproximadamente un 2% por encima de la humedad natural del material.

En la figura 3.2 se muestra la sección tipo utilizada con este material arcilloso yesífero.

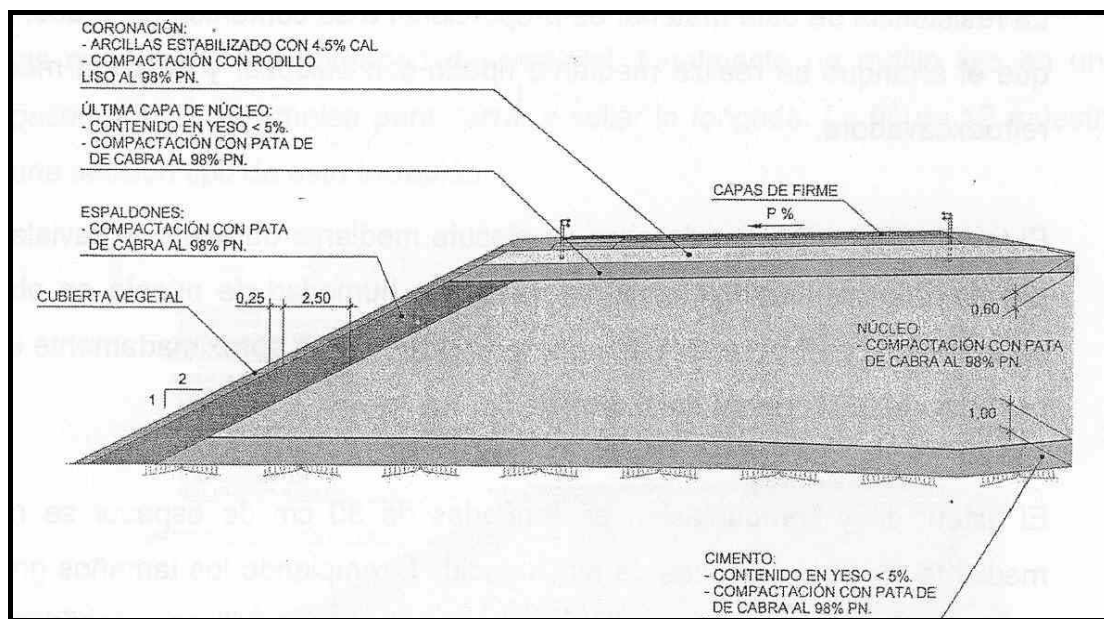


Figura 3.2 - Sección tipo de terraplén ejecutado con arcillas yesíferas en la M-50

Con estas medidas se consiguieron unos terraplenes que combinan las mejores cualidades de sus componentes:

- \* Impermeabilidad debida a la matriz arcillosa que protege el yeso al envolverlo.
- \* Alta capacidad portante debida a los yesos.

#### e) Autovía Radial R-4

La autovía R-4 se desarrolla, en alguno de sus tramos, a lo largo de los depósitos yesíferos de la cuenca del Tajo, por lo que para construir los terraplenes existentes en proyecto se consideró necesario la utilización de los yesos que habrían de excavar en trincheras y medias laderas.

Se realizaron terraplenes de prueba para elegir los equipos y procedimientos de compactación más adecuados. Una vez analizada la información obtenida de los ensayos se definió la sección tipo del terraplén que se indica en la figura 3.3.

La altura máxima de los terraplenes a construir alcanzaba puntualmente los 16 m; sin embargo, el espesor máximo de terraplén con yesos ejecutado fue de 12 m.

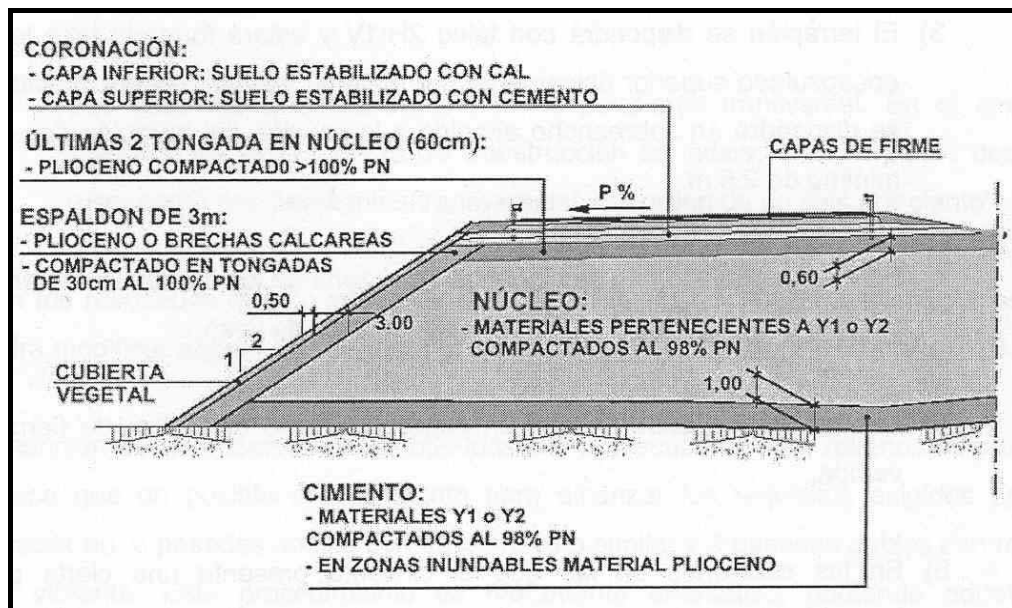


Figura 3.3 - Sección tipo de terraplén ejecutado con arcillas yesíferas ( $Y < 35\%$ ) en la R-4

Por lo tanto, los suelos de arcillas yesíferas con hasta un 15% de yeso se han reutilizado en la obra de la M-50 correspondientes a la concesión de la R-4 y en la propia radial R-4, efectuando rellenos de tipo encapsulado, garantizando la impermeabilización del material empleado en el núcleo.

f) Rellenos del ferrocarril de Pinto a San Martín de la Vega

La obra del ferrocarril de cercanías de Pinto a San Martín de la Vega, con parada en el Parque Temático de la Warner, fue promovido por la Comunidad de Madrid y cedido en su explotación a Cercanías de RENFE.

La mitad más próxima a S. Martín de la Vega de los terraplenes de la traza se realizaron con su núcleo constituido por yeso procedente de voladura, con alturas alcanzadas superiores a 20 m.

Los criterios generales que se siguieron para la ejecución de los terraplenes fueron:

- En principio se intentó que el material colocado procediera del ripado de los yesos, pero dada la dureza que presenta en esta zona este material, hacía inviable este procedimiento de ejecución, con lo que hubo que recurrir a la voladura. En la foto 3.1 puede verse la maquinaria que se utilizó para intentar el ripado del yeso, incluso mediante ripado en cruz.



Foto 3.1.- Equipo utilizado para el ripado

Para garantizar el empastado del material colocado e independientemente de que el material procediera de ripado o voladura, se exigieron las siguientes limitaciones granulométricas:

- Tamaño máximo menor de 1 m (el tamaño máximo será el diámetro de la esfera ideal que contuviera todo el volumen del bloque).
- Porcentaje en superficie proyectada de tamaños superiores a 50 x 50 menor del 60%.
- Porcentaje en superficie de material de tamaño superior a 20 cm > 70
- Porcentaje < 5 mm inferior a 40% del tamaño inferior a 20 cm.

En la figura 3.4 puede verse la sección de terraplén zonado para reutilización de yeso definida en Pinto-San Martín de la Vega.

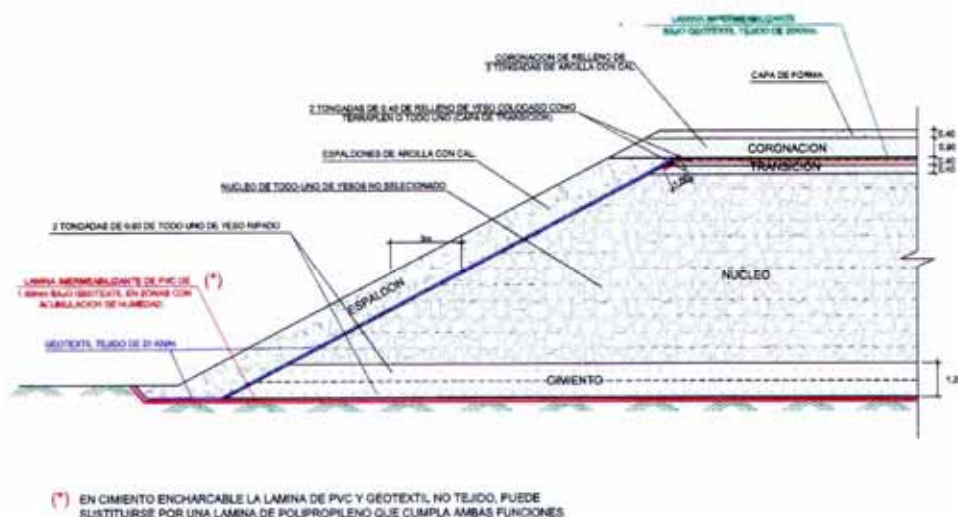


Figura 3.4 – Esquema sección tipo relleno para aprovechamiento de materiales yesíferos

g) Variante de la Carretera M-307 en San Martín de la Vega

Esta obra, promovida por la Comunidad de Madrid, y adjudicada a AZVI, se realizó principalmente durante el año 2.006, en que quedó finalizado el movimiento de tierras. Los

rellenos de esta obra se ejecutaron con yesos y margas yesíferas de la formación de la Cuenca Central de Madrid. En esta zona se ubican explotaciones de este material para su uso industrial y también numerosas escombreras de arcillas y margas yesíferas, cuyo menor porcentaje en yeso hace que no sea utilizable industrialmente.

La metodología seguida tanto para el encapsulado como para la colocación fue la siguiente:

- Encapsulado constituido por una lámina impermeabilizante tipo PEAD y espaldones de material tolerable procedente de préstamo, y que cumpliera unas condiciones suficientes de impermeabilidad. Coronación de suelo arcilloso tratado con cal para conseguir un material de suficiente capacidad portante pero que al mismo tiempo mantenga unas condiciones suficientes de impermeabilidad.
- Procedimiento de colocación, con humedad, espesor de capa, etc., definido en base a las recomendaciones inglesas y francesas para materiales similares, de forma que se consiga durante este proceso eliminar todos los contactos débiles entre granos.

En la figura 3.5 se muestra la sección tipo construida en los casos de apoyo de los rellenos en zonas no encharcables.

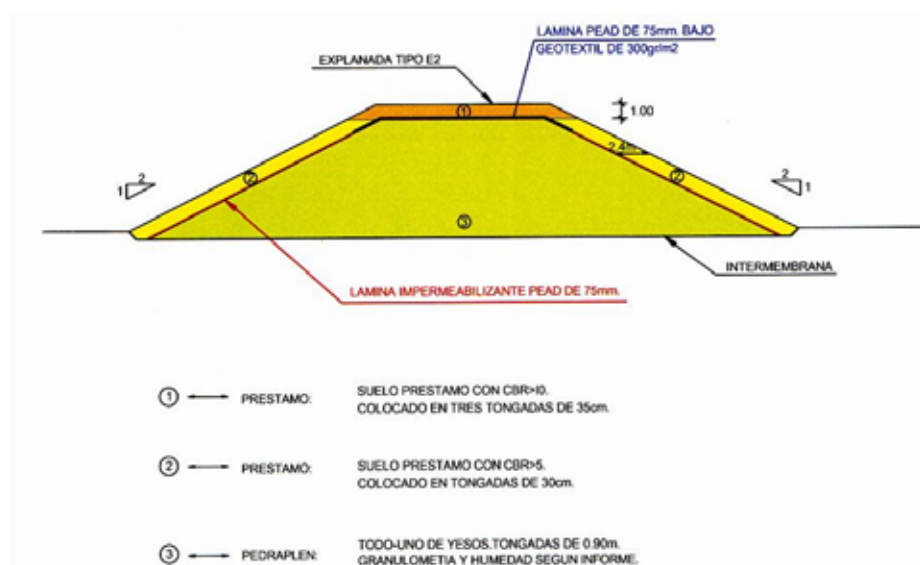


Figura 3.5 – Sección tipo apoyo de los rellenos en zonas no encharcables

El ancho de los espaldones, contruidos retrasados respecto al núcleo y con material procedente de préstamos, se redujo a 2.40 m que es la dimensión mínima de maquinaria de extendido y compactación.

Las necesidades de colocación y compactación se dedujeron en base a los valores del índice CCV y del grado de saturación.

En las fotos 3.2 y 3.3 se muestra un ejemplo del proceso constructivo para la ejecución de estos terraplenes.



Foto 3.2 - Extendido del material yesífero excavado



Foto 3.3 - Detalle de la lámina de protección del núcleo

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

Castanedo Navarro, F.J. (2007) "Metodología para el encapsulado y estabilización de yesos" II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias. En Sevilla

Clayton, D. (1977) "Chalk in Earth works" Performance and prediction. Journal of the Institute of Highway Engineering

Department of Transport /United Kingdom) HMSO (1986) "Notes for guidance on the specification for highway works"

Domingo Ayuso, et al. (2000), "Caracterización de los materiales yesíferos del Mioceno de la Cuenca de Madrid para su utilización en cuerpo de terraplenes y realización de un terraplén experimental". Congreso Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte.

GIF "Pliego General para rellenos" Documento G108.

Greenwood, J. (1989) "Specification of chalk for highway works" Chalk ICS 89, Brighton Polytechnic.

Guy, D.G. (1989) "Classification and assessment of chalk on the M25 around the Gade valley, Kings Langley, Hertfordshire" Chalk ICS 89, Brighton Polytechnic

Hinojosa, J.A. y Royo, J.L. (1986) "Resultados de la encuesta nacional sobre el comportamiento de terraplenes y pedraplenes. Simposio sobre Terraplenes, Pedraplenes y otros rellenos.

López Laborda J.R. y Secades Gallego, F. "Estudio sobre la evolución a medio y largo plazo de una mezcla limo yesífero con cal". Simposio sobre Geotecnia de las infraestructuras del transporte. Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (2000)

Ministerio de Fomento (2000) Orden Circular 326/00 "Geotecnia vial en lo referente a materiales para la construcción de explanadas y drenajes"

MOPT (1989) "Terraplenes y pedraplenes"

Morilla, I. (1994), "Propuesta de utilización de materiales yesíferos del triásico en el proyecto de terraplenes" III Simposio Nacional de Geotecnia Vial

Quibel, A. (1989) "Compactation of chalk" Chalk ICS 89, Brighton Polytechnic

Rat, M. & Schaeffner, M. (1989) "Classification of chalks and conditions of use in embankments" Chalk ICS 89, Brighton Polytechnic

SETRA-LCPC (1992) "Réalisation des remblais et des couches de forme"

Soriano Peña, Antonio (2007) "Ejecución de rellenos con materiales yesíferos" II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias. En Sevilla.

TTRL Report 806 (1977) "The classification of chalk for use as a fill material"