

Uso de materiales yesíferos en rellenos de infraestructuras viarias

Los materiales yesíferos tienen una utilización limitada, pero, cuando abundan, deben ser empleados siempre con la máxima seguridad.

Ignacio González Tejada, ICCP (UPM); Claudio Olalla Marañón, Dr. ICCP (UPM); Manuel Romana García, Dr. ICCP (GETINSA); Alfonso Cimadevila Salcines, I. de Minas (GETINSA); y Vanessa García Fernández, Geóloga (GETINSA).

Resumen

Los materiales yesíferos se encuentran en muchas zonas de España y es frecuente que las obras lineales atraviesen terrenos en los que están presentes. Por razones de índole económica, medioambiental y geotécnica es cada vez más necesario que estos materiales naturales formen parte de los terraplenes de las infraestructuras viarias (carreteras y ferrocarriles), de modo que éstas se

construyan con una mayor compensación de los volúmenes de material de relleno y desmonte, con todas las ventajas que ello supone.

En los últimos años, se han construido algunos terraplenes utilizando rocas yesíferas, y son muchas las Administraciones, las empresas y los ingenieros que han mostrado su interés por la construcción con este tipo de materiales. Gracias a los estudios e investigaciones acerca de sus características geotécnicas y a la depuración de las técnicas de construcción más adecuadas para lograr los objetivos deseados, se pueden presentar ya algunas ideas y resultados sobre qué tipos de materiales yesíferos existen y sus posibilidades de utilización y tratamiento.

Se incluyen las consideraciones y

los tratamientos que se empiezan a aplicar en los materiales yesíferos por algunas normativas (españolas y extranjeras) y se incorpora un resumen de las principales experiencias españolas en terraplenes viarios sobre las que se tiene constancia.

Palabras clave: Material marginal, yesos, ensayos, rellenos, sostenibilidad.

1. Introducción

El terraplén es una infraestructura viaria que se tiene que definir por su fin último y no sólo por los materiales que lo componen. Esto hace que la atención en el diseño se debe dirigir a conseguir que el tránsito sobre ella se produzca en las condiciones de seguridad y funcionalidad oportunas al

servicio del que se trate (automóviles, trenes convencionales o de alta velocidad, etc.). También se debe garantizar que sus cualidades permanezcan a lo largo del tiempo.

Por razones de índole económica, social y ambiental, la tendencia actual en Geotecnia Vial es aprovechar al máximo los materiales presentes en el trazado, para la construcción de infraestructuras viarias. Esta tendencia está haciendo que las normativas sean más permisivas a medida que los conocimientos técnicos son mayores.

En este marco, existe un notable interés en utilizar materiales que contienen yeso o sales, tan presentes en la Península Ibérica. De hecho, ya existen algunas experiencias españolas en la utilización de yesos en el núcleo de terraplenes. Aunque la información técnica es escasa, se va disponiendo de un estado de conocimiento cada vez más detallado y completo.

En general, un material se puede utilizar como relleno de un terraplén siempre que cumpla (Escario, 1986):

- Que sea posible su puesta en obra en las debidas condiciones y con los controles habituales.
- Que la obra ejecutada sea estable a lo largo del tiempo.
- Que las deformaciones que se produzcan durante toda su vida resulten tolerables.

Atendiendo a estos tres requisitos básicos, se presenta a continuación una metodología de diseño adaptada a los terraplenes construidos con materiales yesíferos. Con ello, se pretende establecer un intento de clasificación de estos materiales pensada fundamentalmente para decidir cómo ejecutarlos.

2. Aspectos geotécnicos

2.1. Criterios generales

La ejecución de un relleno es un trabajo continuo que implica las fases de proyecto, construcción y servicio. Estas tres fases vienen marcadas por qué material se está utilizando y cómo se está disponiendo.

Así, por ejemplo, en el caso de construcción de terraplenes con ro-



Aspecto de materiales con yesos. Se aprecia su color blanquecino.

cas blandas, resulta interesante el esquema desarrollado por la *Federal Highway Administration* para la construcción de terraplenes con pizarras de origen sedimentario (figura 1).

Para tener en cuenta cómo disponer el material en un terraplén, es fundamental plantear qué aspectos geotécnicos se deben seguir en el diseño y ver en qué aspectos puede afectar el tipo de material al resultado.

La compensación de tierras es uno de los objetivos fundamentales en una obra lineal. Por ello es conveniente enviar a vertedero la menor cantidad posible de material. Por otro lado, las propiedades geotécnicas que tiene un material de relleno no dependen sólo de sus características intrínsecas, sino también del procedimiento de ejecución. Este segundo aspecto es al que se debe prestar mayor atención.

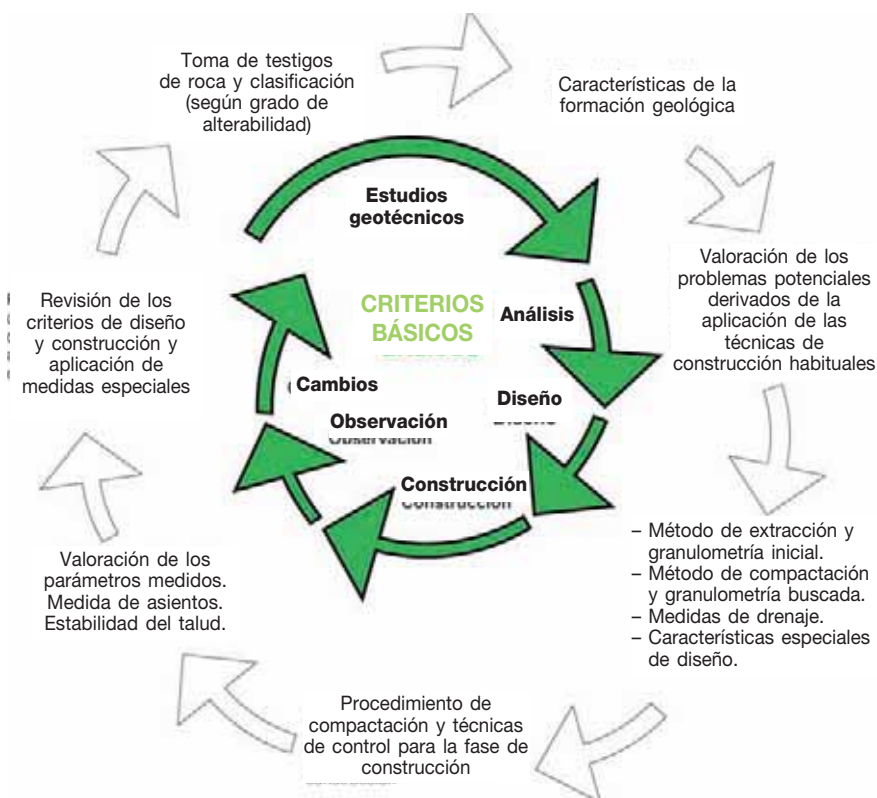


Figura 1: Criterios generales de diseño de rellenos con pizarras sedimentarias (Traducción y adaptación del original. *Federal Highway Administration, FHWA* 1980)

- | | |
|------|---|
| I | Arcillas y limos yesíferos, con yeso disperso en porcentaje inferior al 30%. |
| II | Arcillas y margas con yeso nodular o disperso. |
| III | Yeso terroso, en masas con algunos nódulos o terrones y eventual contenido de arcilla o limo. |
| IV | Alternancia de yesos y margas. |
| V | Yesos estratificados. |
| VI | Yesos masivos con fracturas, huellas de disolución o inclusiones margosas. |
| VII | Yesos masivos sanos, de tipo poroso, sacaroideo o regular. |
| VIII | Yesos masivos de tipo cristalino o alabastrino. |

Clasificación de Rodríguez Ortiz (1994).

La utilización de rocas y suelos yesíferos como materiales de relleno hasta ahora no ha sido nada habitual, bien por la falta de un conocimiento apropiado o bien por la prohibición expresa de las normativas.

En España, el actual Pliego de Condiciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) limita el contenido máximo de yeso al 20%. Si tiene más de este porcentaje sólo permite utilizarlo en aquellos casos en que no existan otros suelos disponibles y siempre que su uso venga contemplado y convenientemente justificado en el Proyecto. Si tiene entre el 5 y el 20% de yeso o tiene más de un 1% de sales solubles, hace falta realizar un estudio especial, aprobado por el Director de las Obras.

También en España, el Pliego del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) de 2008 limita al 15% el contenido de yeso.

La normativa francesa GTR (LPCP, 2003) divide las rocas salinas en dos grupos. Las que tienen menos de entre el 30 y el 50% de yeso y menos de entre el 5 y el 10% de sal soluble, y se pueden utilizar en terraplenes, tratándose como otras rocas blandas (arcillosas o carbonatadas), pero teniendo en cuenta la solubilidad. Si se supera alguna de las anteriores proporciones, se descarta *a priori* su utilización.

Al margen del tratamiento que reciben los materiales yesíferos en las normativas, conviene analizar qué tipo de formaciones evaporíticas existen y si pueden utilizarse.

Generalmente en estas formaciones geológicas conviven carbonatos (calizas y dolomías), sulfatos (yeso y anhidrita), cloruros y otras sales. Estas rocas aparecen masivamente en algunas ocasiones, y otras están mezcladas entre sí y con arcillas.

El yeso, a su vez, en la naturaleza puede presentarse en distintas rocas naturales con estructuras diferentes (espejuelo, laminar, fibroso, nodular, sacaroideo y alabastrino). También existen otros sulfatos de calcio en la naturaleza, inestables a presión atmosférica y con presencia de agua, como son la anhidrita natural y la basanita (hemihidrato de yeso).

Una clasificación interesante de los materiales yesíferos es la propuesta por Rodríguez Ortiz (1994), en que se ordenan en grupos según sean más o menos competentes.

2.2. Comportamiento de los yesos

Hasta hace unos pocos años sólo se tenían en cuenta las características intrínsecas de los materiales ya que se buscaba clasificar los suelos en grupos homogéneos, dado que las

operaciones de manejo del material y ejecución dependen, a efectos prácticos, de los contratistas de las obras, de los plazos, etc. y en general se suponía que era difícil poder garantizar unos procedimientos mínimos. Actualmente algunas normativas, como la francesa (LPCP, 2003), se centran en los mecanismos de ejecución apropiados para cada material, e incluyen para su utilización la necesidad de disponer, entre otros, de ensayos de alterabilidad y de considerar los factores ambientales.

Tradicionalmente, en Geotecnia Vial, se han diferenciado, tanto para el proyecto como para la ejecución, tres grupos de materiales, atendiendo a su granulometría:

■ Tipo “suelo”: Se ha tendido a clasificar mediante ensayos sencillos, en grupos homogéneos cuyo comportamiento se conoce muy bien y a exigir un valor determinado de la densidad.

■ Tipo “pedraplén”: No hay un cri-



Aspecto de los materiales con granulometría tipo terraplén en su ensayo. Foto: Hernán Patiño.

terio único para identificar cuándo un material puede constituir un pedraplén según sus propiedades (resistencia y alterabilidad), su granulometría (una vez puesto en obra) y la forma de los granos. Se suele exigir un parámetro determinado en algún ensayo (placa de carga, por ejemplo). La normativa francesa asigna un

método de compactación según el tipo de roca y añade algunas restricciones.

■ Tipo “*todouno*”: Tratar como suelo o como roca según composición.

La baja resistencia a compresión simple del yeso (menor a 40 MPa, valor del yeso cristalizado sin intercalaciones) hace que sea imposible que éstos formen pedraplenes. Además la compactación del relleno alterará en gran medida la granulometría inicial, alcanzándose fácilmente configuraciones tipo suelo.

Sin pretender ser taxativo, se puede presuponer que las mezclas de yeso – arcilla con más del 50% de arcilla se traten como “suelos” (arcilla yesíferas) mientras que las mezclas con más yeso, se consideran como “*todounos*” o “suelos”, dependiendo de la resistencia de la roca y de la granulometría que se alcanza una vez dispuesto en obra y compactado.

Si se trata como tipo “suelo”, se pueden realizar ensayos convencionales, pero tomando algunas precauciones, entre las que se citan:

- Los materiales yesíferos y salinos son muy solubles, con cinética de disolución rápida, por lo que han de estar dispuestos de modo que queden aislados de los flujos de agua (superficial o subterránea).

- La presencia de algunos minerales salinos (halita, glauberita, etc.) puede hacer que la disolución sea extremadamente rápida.

- Algunas formas de presentarse estas rocas son inestables y la trituration y adición de agua pueden activar reacciones que supongan expansiones o colapsos. Así por ejemplo, la anhidrita natural en presencia de agua tiende a hidratarse, en un proceso expansivo y relativamente rápido (varios meses).

- El yeso tiene agua libre y agua constitutiva, y los métodos habituales para medir la humedad pueden dar errores (tanto en campo como en laboratorio), por lo que hay que tenerlo en cuenta.

- La humedad afecta a las defor-

maciones a largo plazo.

Si se trata el material como un “*todouno*”, lo habitual es construir previamente terraplenes de ensayo, para decidir el método preciso de compactación. Las propiedades que más afectan al comportamiento de éstos son la granulometría, la forma de las partículas y la calidad de la roca. La mejor granulometría es la

tamiento de pizarras sedimentarias (también rocas blandas y alterables), señala especialmente como buena práctica de control la atención a las curvas granulométricas y el control de la compactación mediante mecanismos adecuados.

La normativa francesa (LPCP, 2003) incluye sistemas de medición de la fragmentabilidad de las rocas



Ensayo de materiales yesíferos.
Fotografía: Hernán Patiño.

que tiene gradación continua. Sin embargo, lo que interesa conocer es cómo es ésta una vez puesta en obra, ya que el cambio de la curva granulométrica parece ser un parámetro muy indicativo que permite calificar el comportamiento de una determinada roca (Soriano, 1989).

Por esto, analizar la evolución de la granulometría en la construcción, teniendo en cuenta la resistencia a compresión simple del material y la alterabilidad (mediante algún ensayo determinado, aún por definir) y correlacionar éstas con el comportamiento tensodeformacional del conjunto parece ser un buen método para poder estimar las deformaciones.

Esta línea ha sido seguida por la *Federal Highway Administration (FHA, 1980)*, que, refiriéndose al compor-

como mecanismo de clasificación (variación del parámetro de la curva granulométrica D_{10} en un ensayo de compactación).

El material, en todo caso, mantiene su carácter evolutivo, de modo que igual que en el material tratado como “suelo” se exige un sistema eficaz de encapsulado.

3. Diseño de terraplenes

3.1. Estudio de préstamos

Para analizar la viabilidad de un préstamo hay que atender a una serie de factores. Adaptando los criterios propuestos, para cualquier formación geológica en general, por Román (1994) a este caso, se destacan los siguientes:

- Disposición de los materiales

evaporíticos en la zona de préstamo y forma y extensión del mismo. Normalmente en las formaciones evaporíticas se presentan secuencias de yeso (capas basales) mezcladas con arcillas o margas, halita (capas intermedias) y sales potásicas y magnésicas (capas más altas). Es frecuente que los movimientos geológicos, tales como fracturas y fallas, hayan alterado la disposición inicial.

- Tipo de maquinaria a utilizar en el arranque, la extracción y el transporte.

- Posición del nivel freático, previsiones meteorológicas. El agua puede comprometer el buen funcionamiento de la obra, por lo que tiene que estar controlada la humedad en todo el proceso. En épocas lluviosas no se puede construir con estos materiales.

- Estabilidad de la excavación.
- Afecciones a terceros.
- Impacto ambiental y visual.

3.2. Cimentación

La necesidad de garantizar una buena cimentación del terraplén es común a todos los materiales de relleno y se deben contemplar los efectos sobre la resistencia y deformabilidad.

Sin embargo, la presencia de niveles freáticos altos o de aguas superficiales y la permeabilidad del terraplén, pueden comprometer de manera especial el buen comportamiento de los materiales evaporíticos, si el sistema de encapsulado es ineficaz.

3.3. Diseño geométrico

Los taludes habituales en terraplenes viarios (1.5H:1V; 2H:1V) obedecen muchas veces más a criterios prácticos de construcción que a requerimientos por exigencias estrictas de resistencia estructural. Las características geotécnicas del yeso hacen que estos valores sean apropiados en cuanto a la resistencia de la estructura en su conjunto, aunque sí pueden afectar a las deformaciones previstas en el conjunto, en la medida en que con taludes más verticales se producirán mayores deformaciones.



Talud y fondo de excavación en materiales yesíferos.

3.4. Protección del material

Es importante que en el diseño se especifique el sistema de encapsulado y la zonificación del terraplén.

Los materiales yesíferos tienen que estar debidamente encapsulados en el núcleo del terraplén, para evitar el contacto directo con la intemperie y con el agua. La construcción de espaldones, cimienta y coronación de arcilla o la disposición de materiales de aislamiento tiene que ser considerada necesariamente en el proyecto y en la planificación de la obra.

Existen dos tendencias en el encapsulado: capa de arcilla compactada con intensidad o membranas impermeables. Las experiencias españolas han utilizado ambos sistemas de encapsulado.

Lo que se pretende con estas técnicas es evitar la afección del agua a los materiales yesíferos.

3.5 Extracción y colocación (extendido y compactado)

Hay que tener en cuenta, especialmente que:

- La obtención de una configuración granulométrica adecuada de los materiales yesíferos puede exigir un mecanismo de extracción de las rocas yesíferas determinado, de modo que la granulometría inicial sea apropiada, y sobre todo que la energía de compactación sea suficientemen-

te intensa como para conseguir el fin buscado.

- Generalmente es deseable compactar del lado seco y sin apenas humedecer el material, por lo que es necesario utilizar equipos de compactación pesados (de rodillos o tipo “pata de cabra”) que pulvericen el material o lo lleven a granulometrías estables. El nivel de compactación tiene que ser intenso (Soriano, 2002 y 2007; Simic, 2004; Castaneda, 2007). Un sistema tipo mixto, con el uso de un rodillo liso y del “pata de cabra” puede ser adecuado, si se consigue desmenuzar mecánicamente el material para acercarlo a la granulometría deseada (continua y extendida).

- Si se trata de una mezcla de arcillas expansivas con presencia de sulfatos, no se puede añadir cal para mejorar sus propiedades mecánicas, ya que ésta reacciona con los sulfatos y produce etringita, que es expansiva (Olalla et al., 2004; Simic, 2007). El límite de sulfatos difiere según las normativas, pero suele estar por debajo o del orden del 1%.

3.6. Control

No está definido cuál es el procedimiento de control más apropiado para estos materiales. La presencia de yeso puede condicionar la utilización de mecanismos de control habituales.

De manera complementaria a las prácticas clásicas de control del compactado, algunas recomendaciones al respecto son:

- El densímetro nuclear puede medir no sólo el agua libre sino también el agua constitutiva. Por eso se tienen que efectuar de manera permanente y cambiar las correcciones adecuadas de los resultados obtenidos (Soriano, 2002).

- La medida en laboratorio de la humedad requiere el secado y pesado a dos temperaturas distintas (40 °C y 105 °C), a las que se espera que el yeso pierda el agua libre y el agua constitutiva, respectivamente.

- Los ensayos de macrodensidad en campo son especialmente adecuados, cuando las granulometrías son extendidas (tipo todouno). La dificultad surge a la hora de utilizar agua para medir el volumen, por la posible afección de este al material de relleno si no se efectúa con las precauciones adecuadas.

- El control de la humedad de obra mediante otras técnicas como el *Speedy Water Meter*, basado en la adición de reactivos químicos y medición de la concentración, puede ser adecuado.

- Otros mecanismos como la placa de carga estática o la placa dinámica son muy apropiados para estos materiales. Los primeros ya se incluyen en algunas normativas españolas como mecanismos de control para pedraplenes y todounos. Los segundos ya se incluyen en las normativas francesas o alemanas (Fdez. Tadeo, 2006 y Saldaña et al., 2004).

- Durante la compactación se ha observado, en algunas ocasiones, la generación de nódulos, aglomerados de materiales, grumos, etc. que pueden afectar negativamente al comportamiento del conjunto (Burbano, 1999).

4 Comportamiento

4.1. Generalidades

Los tipos de fallo de terraplén más frecuentes son: rotura del cimient,



Probeta fabricada con materiales yesíferos. Fotografía: Hernán Patiño.

rotura del contacto entre cimient y terraplén, rotura del cuerpo del terraplén, deslizamientos superficiales, asentamientos del cimient, expansiones y retracciones, colapso, deformaciones de fluencia, subsidencia, erosiones y asentamientos locales junto a estructuras (Soriano, 1994).

De todos estos modos de fallo, la utilización de materiales yesíferos en el núcleo del terraplén podría incidir fundamentalmente en:

- Expansiones y retracciones (por hidratación de fases anhidras).
- Colapso (por disolución del material).
- Deformaciones de fluencia (largo plazo).

La influencia en todos ellos tiene que ver con el carácter de roca blanda y la naturaleza evolutiva del yeso.

4.2. Colapso por disolución

La solubilidad del yeso y de las sales es muy superior a la de otras rocas también solubles (tales como las calizas). No cabe duda que el único modo de garantizar el buen funcionamiento de las rocas evaporíticas es asegurar que el núcleo de yeso se mantiene en todo momento al margen de flujos de agua e incluso de los cambios de humedad.

4.3. Expansiones y retracciones

Las rocas evaporíticas tienen un

fuerte carácter evolutivo, de modo que la presencia de agua puede suponer expansiones, presiones de hinchamiento y disminución de volumen.

Las expansiones en el caso del yeso pueden deberse a la hidratación de las fases anhidras (de Villanueva y G^a Santos, 2002) o al crecimiento dinámico de cristales (Esteban, 1990; GETINSA, 2007; Alonso y Olivella, 2008).

Es frecuente la presencia de proporciones de anhidrita mezcladas con el yeso dihidratado. Al triturar el material, estas fracciones pueden entrar en contacto con el agua libre y rehidratarse. La anhidrita natural tiene distinto sistema cristalográfico que la anhidrita obtenida al deshidratar yeso aljez en estufa. El proceso de hidratación es doble: disolución y precipitación. Este proceso es mucho más lento y algo más expansivo que el de la anhidrita artificial.

Para atenuar los efectos perniciosos de estas rehidrataciones en el conjunto, es necesario conocer la composición mineralógica del material para evitar en la medida de lo posible la adición de agua libre que pueda hidratar estas fracciones.

Además de la hidratación de la anhidrita, el crecimiento dinámico de cristales (disolución del yeso y precipita-

ción en núcleos más favorables) es un fenómeno que puede producir expansiones y presiones de hinchamiento. Este fenómeno es especialmente importante en sistemas abiertos (como, por ejemplo, la excavación de un túnel) donde el crecimiento dinámico de cristales en las fisuras se debe a los flujos de agua y aire. Cuando el yeso está en contacto con el agua se inicia la disolución de éste hasta que el agua se satura. Si el sistema está en contacto con la atmósfera y se evapora, aumenta la concentración y el yeso comienza a precipitar, haciéndolo en los núcleos favorables a ello que son generalmente otros cristales. Si, además, el agua puede circular es más notable el crecimiento de cristales en las zonas más favorables (fisuras, por ejemplo).

Existen algunos materiales yesíferos, como los limos yesíferos de Aljafarín, con estructuras colapsables (Faraco, 1972). Un lavado de estos materiales, en los que el yeso es una parte fundamental, produce el colapso por disolución. Estos suelos han sido estudiados por sus efectos perniciosos para cimentaciones, pero es necesario analizar cómo se comportarían si se utilizan como material de relleno, y, especialmente, cómo cambiaría su estructura durante la compactación).

4.4. Deformaciones de fluencia

Es necesario, en este tipo de materiales, conocer cómo evoluciona su comportamiento a lo largo del tiempo, para identificar posibles problemas que afecten al servicio.

Una vez evitados errores en la construcción que puedan suponer expansiones o disoluciones, la fluencia y los factores que la condicionan, son los factores que hay que estudiar más importantes en cuanto a su afección al servicio de la estructura.

Las deformaciones de fluencia se producen lentamente y se pueden deber a cambios en la humedad, consolidación secundaria en suelos blandos y, especialmente en este caso, a la degradación de los contactos entre partículas, rotura de las mismas y posterior reordenación. Este



Construcción de una explanada o plataforma sobre materiales yesíferos con aportación de suelo.

último proceso depende de la fluencia de la roca (deformación bajo carga constante) y de la pérdida de resistencia a largo plazo que se produce en los fragmentos del aljéz. Esta fluencia de las rocas se explica por las deformaciones diferidas entre los planos de los cristales de la roca, o por la generación y crecimiento de las propias fracturas.

La presencia de agua aumenta ambos efectos, porque facilita el deslizamiento entre planos de cristales y porque disminuye la resistencia. La temperatura, el nivel de tensiones y la presión de confinamiento afectan a la magnitud del fenómeno. Pero en el caso de materiales evolutivos, como el yeso, la presencia de agua aumenta además la fluencia por causas fisicoquímicas, por lo que es muy importante controlar su presencia en el proceso constructivo.

5 Experiencias con materiales yesíferos en España

A continuación se recogen, de manera muy sintética, algunas experiencias españolas de utilización en terraplenes de yesos o arcillas yesíferas en

España. Estos datos se han obtenido de artículos publicados o conferencias dictadas, y se refieren a obras ejecutadas recientemente, pues hasta hace unos pocos años las normativas eran más restrictivas y no permitían la utilización de materiales con un alto contenido en sulfatos.

Se tiene también constatación de otras obras de importancia llevadas a cabo en el entorno de la ciudad de Zaragoza, pero la no disponibilidad de documentos publicados ha impedido mostrar detalles de sus logros.

5.1. Terraplenes contruidos con yesos

– Pedraplén de yeso experimental en paso superior M-45 (Castanedo, 2007): Yeso procedente de ripado (granulometría extendida). IPI (CBR sin inundar) < 20, con colapso < 2% y $9 < \alpha < 13$. En el núcleo, relleno tipo sándwich, con todouno de yeso ripado, compactado en tongadas de 50 a 60 cm mediante maquinaria de cadenas, intercalado con capas de arenas yesíferas. Los espaldones, con ancho de 4,5 m, de yeso ripado colocado en tongadas de 25 ó 30 cm compactadas enérgicamente mediante pata de cabra.

– Ferrocarril de Pinto a San Mar-

tín de la Vega (Castanedo, 2007): El yeso obtenido por voladura (demasiado duro para el ripado) al que se exigió unas características granulométricas determinadas. El núcleo consistió en un todouno o pedraplén de yeso compactado en tongadas de 60 cm a 1 m, sobre un cimientado de todo uno y con una base de geotextil impermeable. La parte superior dispone de una capa de transición de todouno de yeso y va protegida por una lámina impermeabilizante y los espaldones de 2,40 m de anchura de arcilla tratada con cal (el mismo material que en coronación)

– Variante de la Carretera M-307 en San Martín de la Vega (Castanedo, 2007): Todouno de yeso colocado en tongadas de 0,90 m, protegido por espaldones de 2,40 m de material tolerable y lámina impermeabilizante. Los yesos eran desde masivos y cristalizados hasta yesos con intercalaciones margosas.

– Autopista R-4 (Madrid) (Soriano, 2007 y 2009): Todouno de yeso ($D_{max} < 25$ cm) dispuesto en núcleo encapsulado superior, lateral e inferiormente, compactado en tongadas de menos de 35 cm. La altura máxima del terraplén es de 16 m y la máxima altura de todouno dispuesto fue 12 m. El encapsulado lateral, de 2,50 m, se dispuso como sobrecancho del terraplén, admitiendo hasta un 30% de yeso y cubierto con 50 cm de tierra vegetal. El yeso queda en todo momento a más de 1,5 m de la coronación, lo que obligó a disponer de un material arcilloso impermeable entre la coronación y el núcleo.

5.2. Terraplenes contruidos con arcillas yesíferas

– Autopista Burgos – Málzaga (Soriano, 2002; Castanedo, 2007): Construida en los años 1976 y 1977, en el tramo comprendido entre Burgos y Pancorbo. La altura de los terraplenes oscilaba entre 3 y 30 m. Se trataba de una matriz arcillosa con porcentajes comprendidos entre un 30 y un 40% de yeso, con una granulometría predominante de grava.

Se construyó sin especial protección y con una compactación muy cuidada (tongadas de 30 ó 40 cm, del lado seco y con rodillo vibratorio). No ha presentado problemas a largo plazo.

– CN-340 en Xátiva (Valencia) (Morilla, 1994; Castanedo, 2007): Mezclas de yeso y arcilla con porcentajes variados. Las arcillas son de plasticidad media (IP de 13 y LL de 40), con predominio de illita y un contenido reducido de montmorillonita. Se recomienda la compactación con rodillo vibrante y alta energía de compactación, en tongadas de 30 cm, o mediante un rodillo vibratorio pata de cabra con altura máxima de tongada de 20 cm, y con humedad no superior a la óptima del Proctor menos un 2% (es decir, del lado seco)

– Terraplenes en las autopistas del sureste de Madrid (Simic, 2004): Se utilizaron arcillas y arenas micáceas con yeso secundario en forma de cristales dispersos y nódulos diagénéticos en terraplenes. Se trata de materiales de granulometría y composición homogénea, con contenidos bajos en finos, y con contenidos me-

dios y altos en arenas ricas en moscovita e illita y elevados en yeso, intercalados con fracciones arcillosas donde el combinado de illita y moscovita es el mayoritario (siendo el de otros filosilicatos muy bajo). El potencial expansivo o de colapso de estas muestras es muy bajo (medido en cédula edométrica). El material se dispuso en el núcleo, encapsulado totalmente, con explanada y espaldones impermeables (y sin contenido de sulfatos). Para ello, se procedió al extendido y desmoronamiento de fragmentos del material con un Bulldozer y se compactó con un rodillo pata de cabra (de peso estático superior a 30 t) hasta alcanzar una densidad superior al 97% de la densidad Proctor Normal, mediante 6 u 8 pasadas dobles (en función de la proporción yeso y arcilla). La humedad natural era ligeramente superior a la del Proctor Normal. Un hecho destacado es que se observó un crecimiento con el tiempo de los módulos de deformación del segundo ciclo de carga y una reducción de la relación de módulos. Los ensayos de huella fueron satisfactorios, obteniéndose una media en seis tongadas de 3,2 mm.

– Terraplén de ensayo de margayeso (Soriano, 2002): Terraplenes contruidos con mezclas de margas y yeso (en relación 60% - 40%), dispuestos en obra de modo que el tamaño máximo de los bolos de yeso fuese inferior a 30 cm y las tongadas menores de 40 cm. El resultado fue $E_1 > 40$ MPa y $E_2/E_1 > 5$ MPa, con una fluencia apreciable ($>20\%$ en un día). El colapso también fue apreciable.

6. Conclusiones

1. Gracias a los ensayos de laboratorio y al estudio de la respuesta de los materiales yesíferos frente a los efectos del cambio de humedad, para las tensiones en que se encuentra, el estado del conocimiento de sus pautas de comportamiento es más profundo y extenso.

2. Las normativas nacionales e in-

Las normativas, con el paso de los años, han ido permitiendo, bajo determinadas restricciones y exigencias de control, el uso de materiales con un contenido importante de componentes yesíferos

ternacionales, con el paso de los años, han ido permitiendo, bajo determinadas restricciones y exigencias de control, el uso de materiales con un contenido importante de componentes yesíferos.

3. La colocación en obra de los materiales yesíferos debe pretender un máximo desmenuzamiento, un alto grado de compactación (preferiblemente del lado seco), la imposibilidad de variación de las condiciones de humedad y un control exhaustivo en obra.

4. Es necesario seguir investigando acerca del uso de materiales yesíferos en terraplenes de infraestructuras viarias. Además de ensayos de laboratorio, es muy interesante la construcción de terraplenes experimentales y posterior auscultación y experimentación, a lo largo de los años.

Reconocimientos

GETINSA y el Departamento de Ingeniería del Terreno de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid han colaborado en la investigación sobre el uso de materiales evaporíticos en terraplenes a través de un convenio firmado por la Fundación Agustín de Betancourt, dedicada a promover la investigación científica y técnica.

Los ensayos de laboratorio se realizaron con materiales evaporíticos provenientes del Mar de Ontígola, en la cuenca del Tajo. Las muestras se obtuvieron del material procedente de las excavaciones del túnel, que construye el ADIF, perteneciente al tramo: Aranjuez-Ontígola, de la futura L.A.V. Madrid-Valencia.

GETINSA y la UPM agradecen al Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) que les permitiese y facilitase la extracción de las muestras necesarias para la investigación. Estos materiales no son aptos para la construcción y plantean importantes problemas de interacción con las infraestructuras próximas por los riesgos asociados a fenómenos de disolución y expansividad.



Desmante en materiales yesíferos. Se aprecia la granulometría de todo uno del material en el pie del talud

Referencias

Alonso E. y Olivella, S., 2008. Expansive Gypsum Claystones: Mechanism and degradation models. Jornada técnica: Túneles en condiciones difíciles. Madrid. Sociedad Española de Mecánica de Rocas.

Burbano, G., 1999. Incorporation of unless or substandard products (high plasticity clay, gypsum...) for embankment construction. Ground treatments, ENCORD Workshop (Madrid).

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

Domingo Ayuso, A., Olías, I., Torroja, J., Castanedo, F. J. y Oteo, C., 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. Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte (Barcelona). Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica.

Escario, V., 1986. Materiales para la construcción de terraplenes. Simposio sobre terraplenes, pedraplenes y otros rellenos. Madrid. Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, Sociedad Española

de Mecánica de Rocas y Asociación Española Permanente de los Congresos de Carreteras.

Esteban, F., 1990. Caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica. Identificación de los mecanismos de hinchamiento. CEDEX, Cuadernos de Investigación, Vol. C28.

Faraco, C., 1972. Estudio del colapso de la estructura de los limos yesíferos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Fdez. Tadeo, C., 2006. Ensayo de placa de carga dinámica de 300 mm de diámetro. Boletín de la Asociación de Laboratorios Acreditados de la Comunidad de Madrid (ALACAM).

FHA, 1980. Design and Construction of Shale Embankments, Summary. Federal Highway Administration. FHWA-TS-80-219 PB89-0229330.

GETINSA, 2007. Informe interno sobre el Control y Vigilancia de las obras del proyecto: "Línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona-Frontera Francesa. Tramo Zaragoza-Lleida. (Subtramos III y IV).

Justo, J. L., 1971. Propiedades geotécnicas de los terrenos yesíferos. Congreso Hispano-luso-americano de Geología Económica. Madrid.

LCPC, 2003. Manual práctico para la utilización de los materiales naturales en la construcción de terraplenes

(extracto de la Guide Technique Réalisation des Remblais et des Couches de Formes). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

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

Morilla, I., 1994. Propuesta de utilización de materiales yesíferos del triásico en el proyecto de terraplenes. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo. Asociación Técnica de Carreteras.

Olalla, C., Fernández T. y Fraile, M. J., 2004. El ataque por los sulfatos a las estabilizaciones de suelos con cal. IV Simposio Nacional de Geotecnia Vial (Santander). Asociación Técnica de la Carretera.

Rodríguez Ortiz, J. M., 1994. Empleo y comportamiento de materiales yesíferos gruesos en rellenos. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial (Vi-

go). Asociación Técnica de Carreteras.

Román, F., 1994. Selección de préstamos. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo. Asociación Nacional de Geotecnia Vial.

Saldaña Martín, F., Crespo del Río, R., Fernández Carral, C., 2004. Comparación entre ensayos de carga con placa y ensayos con deflectómetro de impacto portátil.

Simic, D., 2004. Utilización en terraplenes de los materiales de las facies intermedias químico-evaporíticas del sureste de Madrid. IV Simposio Nacional de Geotecnia Vial (Santander). Asociación Técnica de la Carretera.

Simic, D., 2007. Experiencias del tratamiento con cal en las autopistas M-50 y R-4. II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias. Sevilla.

Soriano, A., 1989. Puesta en obra y compactación de rellenos en obras de infraestructura viaria. Simposio sobre el Agua y el Terreno en las Infraestructuras Viarias. Torremolinos

(España) 1989. Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones y Asociación Técnica de Carreteras.

Soriano, A., 1994. Características del comportamiento de terraplenes y pedraplenes. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo. Asociación Nacional de Geotecnia Vial.

Soriano, A., 2002. Los materiales yesíferos en la construcción de terraplenes. Jornadas sobre los suelos marginales en la construcción de Obras Lineales, INTEVIA, Sevilla.

Soriano, A., 2007. Ejecución de rellenos con materiales yesíferos. II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias (Sevilla). Asociación Técnica de Carreteras.

Soriano, A., 2009. Materiales yesíferos. Jornadas sobre Terraplenes y Pedraplenes en carreteras y ferrocarriles, INTEVIA, Madrid.

De Villanueva, L. y García Santos, A., 2001. Manual del yeso. Asociación Técnica y Empresarial del Yeso. CIE Inversiones Editoriales. Madrid. ■

RUTAS

REVISTA DE LA A.I.P.C.R. ESPAÑOLA

Para información y suscripciones pueden dirigirse a:

Asociación Técnica de Carreteras
Monte Esquinza, 24, 4.º Dcha.
Teléf. 91 308 23 18/19
28010 MADRID

☐ Talón

☐ Giro

☐ Transferencia

NOMBRE

CIF

DIRECCIÓN

TFNO. CIUDAD

PROVINCIA

AÑO 2009

FECHA:

FIRMA:

Deseo suscribirme por un año a la revista RUTAS, cuyo importe de 60,10 € para miembros de la A.I.P.C.R. y 66,11 € para no miembros (+ 4% I.V.A. y gastos de envío) correspondiente envío adjunto por: