



Filosofía del diseño y ejecución de terraplenes y su patología (II)

Philosophy of design and execution of earthworks and their pathology (II)

Carlos Oteo Mazo

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ing. del Terreno
Presidente del Comité de Geotecnia Vial de la A.T.C.

Resumen

Este artículo es la segunda parte del que, bajo el mismo título (Parte I), se ha publicado recientemente en esta Revista (nº 146). Se trata del texto correspondiente a la Conferencia que el autor impartió en la Jornada Técnica organizada por el Comité de Geotecnia Vial de la A.T.C., en marzo de 2011. Por la extensión del texto, ha tenido que dividirse en dos partes, aunque ambas se refieren a diferentes aspectos del diseño, ejecución y control de las estructuras de tierra para infraestructuras lineales.

PALABRAS CLAVE: Geotecnia vial, materiales para carreteras, terraplenes.

Abstract

This article is the second part of that under the same title (Part I) was recently published in this journal (nº 146).

This is the written form the lecture that the author gave at the Technical Seminar organized by Road Geotechnics Committee of the ATC in March 2011. By extension of the text, had to be divided into two parts, although both refer to different aspects of design, implementation and monitoring of earthworks to linear infrastructure.

KEY WORDS: Geotechnical road, materials for roads, embankments.

5. Sobre el control

El control merece atención especial, ya que, muchas veces, los criterios utilizados se emplean como “armas arrojadizas” desde la Asistencia Técnica contra el Contratista, con un rigor que la heterogeneidad del terreno no sabe reconocer.

En este artículo hemos tenido en cuenta expresamente la revisión de los métodos modernos de control de ejecución y las experiencias obtenidas en tramos de ensayos en pedraplenes y rellenos tipo todo-uno, precisamente para exponer las últimas posibilidades que, en la actualidad, pueden utilizarse.

Aquí queremos hacer sólo unos cuantos comentarios:

- El control clásico de densidad-humedad (aunque se utilice realmente el criterio adecuado que ya hemos expuesto anteriormente) no es siempre útil, ya que en muchos materiales – lo mismo que su límite líquido puede variar en 20 puntos en la misma formación y su contenido de finos puede hacerlo en 20-30%, como lo acredita la variación admitida por el propio PG-3 en su clasificación, hecho puesto de manifiesto en la *figura 23* [11] – la densidad óptima PM puede variar considerablemente. Así, en la *figura 24* puede verse como la relación humedad óptima PN – densidad óptima P.N. puede variar de forma apreciable, sobre todo en suelos marginales [11], lo que también puede suceder en suelos tolerables, debido a su posible contenido arcilloso.

- Ello obligaría a estar repitiendo, constantemente, los ensayos de compactación para tener bien definida la referencia, lo que –hoy– puede ser incompatible con la marcha de los trabajos de compactación (con movimientos de tierra de más de 400 000 m³/mes). Conocemos muchas discusiones al aplicar el criterio de humedad-densidad en suelos con finos, al no tener una referencia bien definida.
- Los ensayos de placa de carga están muy extendidos y pueden ser muy útiles, siempre que – a nuestro juicio – se utilice un valor de K adecuado, en función de E_{v2} , como ya hemos indicado en la *figura 18*). Sin embargo pueden ser algo lentos, por lo que el empleo de la placa dinámica (cuya normativa llevamos un tiempo empujando desde el Comité CTN 103 “Geotecnia” y desde el Comité de Geotecnia Vial de la A.T.C.) parece totalmente recomendable: más que prometedor empieza a ser una realidad.
- El ensayo de huella nos parece muy útil, ya que puede emplearse para materiales y tamaños diversos (terraplenes hasta pedraplenes) y puede ser un buen criterio de aceptación en estructuras de tierra y fondos de desmontes.

6. Algo sobre los materiales marginales

Como ya hemos comentado, los pliegos oficiales de prescripciones técnicas para obras lineales tratan, habitualmente, de

clasificar los posibles materiales de préstamo para terraplenes en grupos de características geotécnicas similares, de forma que su uso quede permitido -o prohibido- a partir de unas pocas y simples características (granulometría, plasticidad, etc). Este hecho parte de la idea que tuvo que desarrollarse en los años 30 del siglo XX para construir rápidamente pistas para aterrizaje de aviones; para lo cuál bastaba diferenciar algunos tipos de materiales y las condiciones de su puesta en obra. Nació así la clasificación de Casagrande, propiciada por el Cuerpo de Ingenieros norteamericano. La simplicidad y bondad inicial de esa idea se han ido extrapolando, y en la segunda mitad del siglo XX se desarrollaron una serie de clasificaciones, a fin de poder hablar de suelos con referencias análogas y poder permitir -o negar- su uso para obras viarias. Unas veces esas clasificaciones se mantenían más del lado del aspecto geotécnico (la Unificada del propio Casagrande), pero en general se dirigían más hacia el lenguaje de los ingenieros de carreteras: AASHTO, Clasificación francesa, PG-3 del año 1975.

Según estos criterios sencillos, el diseño de un terraplén es muy sencillo, en general, y está basado en ensayos de laboratorio sobre muestras alteradas. Con esos datos se procede a clasificar cada tipo de terreno de la zona, dentro de los grupos definidos por la normativa oficial. Si se cumple el o los criterios establecidos, el material previsto puede usarse (bien para núcleo, bien para coronación, como se distingue a veces) y se procede a incluir en el proyecto que en los terraplenes de determinada zona

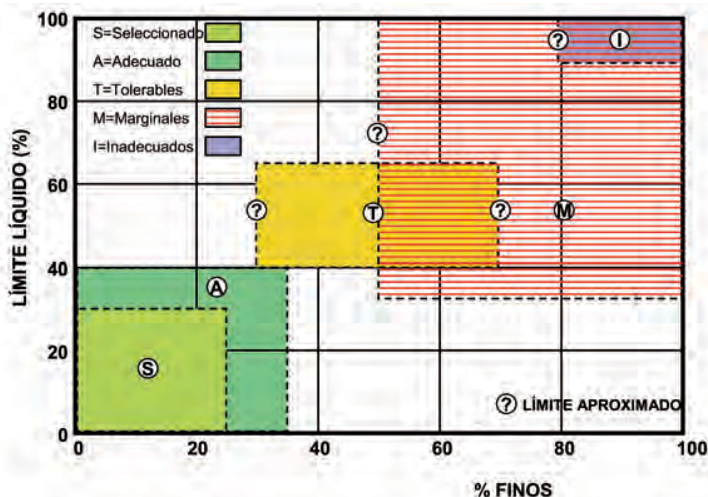


Figura 23. Relación entre el límite líquido y la granulometría habitual en los suelos distinguidos en el nuevo PG-3 (Oteo, 2007)

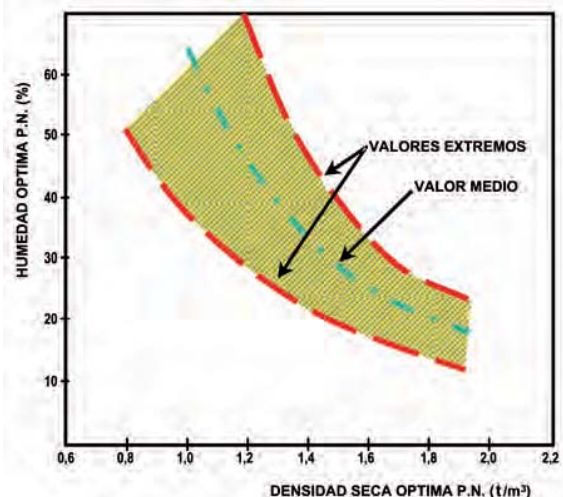


Figura 24. Relación media entre humedad y densidad óptimas, P.N., en suelos marginales (Oteo, 2007)

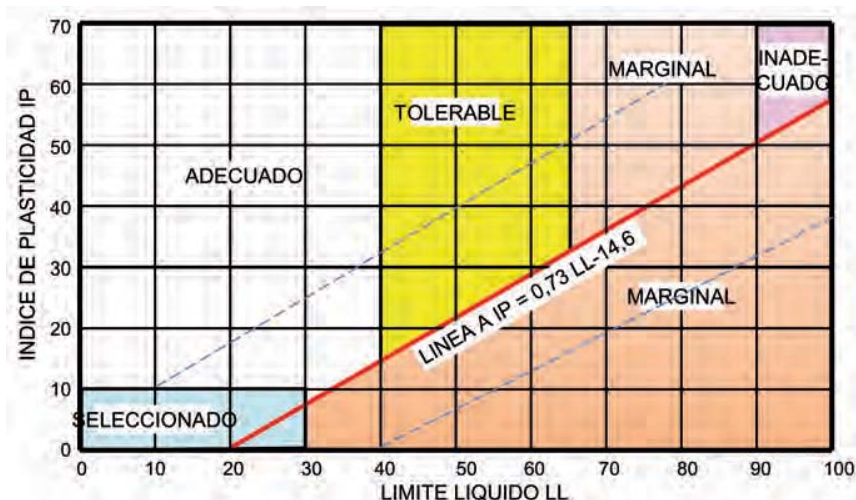


Figura 25. Clasificación de suelos para terraplenes según la plasticidad (Según se deduce del PG-3 del Ministerio de Fomento)

se utilizará ese material.

Acaba, así, el diseño de los aprovechamientos téreos para terraplenes y pedraplenes, lo cual suele ser admitido por muchas direcciones y controles de obra. El mayor aumento, en España, de los volúmenes de movimientos de tierra en obras viarias a finales del siglo pasado, puso en evidencia que no siempre existen esos materiales apropiados y que, en muchas ocasiones, debería ser preciso reutilizar todo lo que se excava en la propia obra (o de vertederos antiguos próximos), a fin de evitar grandes impactos ambientales y grandes costes de transporte.

La Orden Circular 326/00 del año 2000 cambia este panorama e incluye un nuevo tipo de material: El "marginal", supuestamente a caballo entre el "tolerable" y el "inadecuado", aunque normalmente se superpone con estos dos grupos.

Los materiales "marginales" del nuevo PG-3 son los que, no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados ni adecuados, ni tampoco tolerables por el incumplimiento de alguna de las condiciones indicadas para éstos, cumplen las siguientes condiciones:

- Contenido en materia orgánica inferior al 5%.
- Hinchamiento en ensayo de expansión inferior al 5%.
- Si el límite líquido (LL) es superior a 90, el índice de plasticidad (IP), será inferior al 73% del valor que resulta de restar 20 al límite líquido, o sea:

$$IP < 0,73 (LL - 20)$$

Esta ecuación intenta representar la de

la Línea A de la Carta de Plasticidad de Casagrande, aunque no lo hace exactamente.

En la figura 25 [19] se ha representado la clasificación de suelos (según la O.C. 326/00) en lo que se refiere a la plasticidad, criterio que es al que suele darse más importancia, por el miedo que suele existir en carreteras al uso de materiales con abundantes finos (más del 35%) y, sobre todo, si caen por debajo de la Línea A, ya que pasarían a ser o limos o arcillas orgánicas, según la clásica clasificación de Casagrande. Sin embargo, ya hace más de 30 años que aprendimos que la mayor parte de los suelos arcillosos (con predominio de materiales arcillosos e, incluso, esmectíticos, con comportamiento de arcilla) están por debajo de la Línea A, mayoritariamente, en el centro de la Península Ibérica y, parcialmente, por debajo en algunas arcillas del Sur de dicha Península (y, por supuesto, en algunos materiales canarios).

Si se observa la figura 25 [19] y se considera un intervalo del límite líquido (LL) entre 10 y 100, por ejemplo (intervalo que hemos conocido ampliamente en nuestra vida profesional), puede verse que los que se han llamado suelos seleccionados y adecuados ocupan poco espacio (LL < 40). Los tolerables en el nuevo PG-3, ocupan un lugar intermedio (alrededor de la línea vertical de LL = 50, es decir alrededor de la línea que separa las plasticidades baja y alta, según Casagrande) y que (salvo un grupo pequeño de bajo índice plástico) están siempre sobre la línea A. Esto corresponde a esa idea que ya hemos señalado la que, por debajo de la línea A, los suelos son

limosos y peligrosos. Ahora bien, en esa figura vemos que existe un amplio hueco entre los suelos "inadecuados" (por encima de la línea A y con LL > 90) y los restantes citados: es el que corresponde a los suelos marginales.

Es decir, se adoptó una postura aperturista con respecto a la redacción del PG 3 de 1974, admitiendo materiales de plasticidad alta, aunque "arcillosos", según la clasificación de Casagrande y "limosos" de medio y alta plasticidad, por considerar que esa vieja denominación no se ajusta claramente a los suelos españoles.

La utilización de estos materiales marginales sólo está prevista si se justifica mediante un estudio especial, aprobado por el director de las obras. Este estudio deberá contemplar los siguientes aspectos:

- Determinación de propiedades que confieren al suelo su carácter de marginal.
- Influencia de dichas propiedades en el uso que se le vaya a dar al material y de su incidencia sobre la evolución de otras zonas de la obra.
- Estudio detallado en que se justifique la resistencia del conjunto y los asentamientos totales y diferenciales esperados, así como su evolución con el tiempo.
- Disposiciones constructivas y prescripciones técnicas a adoptar para el uso a que se destina ese material.

Como ejemplo de suelos marginales se incluyen en el Artículo 330 del nuevo PG-3 a los suelos colapsables, a los expansivos, a los suelos con yesos y a los suelos con otras sales solubles y a los suelos con materia orgánica. Aunque existen suelos que se incluyen en el campo de los marginales sin que les sea aplicados calificativos tan rotundos como "colapsables" o expansivos. Incluso hay materiales que antes pasaban a ser "inadecuados" porque sus condiciones granulométricas no cumplían las condiciones de terraplén adecuado (o mejor calidad) ni la de pedraplén.

En lo que se refiere a los suelos expansivos, el Pliego define como tales a los que dan hinchamientos libres de más del 3%, en muestras remoldadas y compactadas de la forma que se hará en obra, lo cual puede reproducirse con ensayos de hinchamiento libre en edómetro. No se pueden usar en coronación y espaldones para que no su-

fran variaciones de humedad, pero sí en núcleos, con las condiciones de estudio especial ya citadas, compactando del lado húmedo. Así lo hemos hecho en obras que llevan realizadas bastantes años, como en una autovía en las proximidades de Palencia o en el Parque Tecnológico de Andalucía, en Málaga, ejemplos que se detallan más adelante. En función de su expansividad y deformabilidad, hemos recomendado utilizar, a veces, la solución “sándwich” como en la obra citada de Málaga, o como se hizo en el Tramo I de la Autopista M-45 de Madrid.

Con otras sales solubles distintas del yeso, el material podrá usarse en núcleos siempre que tenga menos de un 1% (medido con la norma NLT-114). Para contenido de más del 1%, el suelo es claramente marginal y se requiere estudio especial.

Se intenta, pues, ampliar el abanico de materiales de media y alta plasticidad y con contenido de sales, principalmente yeso, tan frecuente en España. Sin embargo, parece que todos tienen que estar por encima de la Línea A, según el PG-3.

El estudio especial debe desarrollar la siguiente metodología:

- Un diseño del terraplén entero (coronación, espaldones, núcleo, etc.), en la línea filosófica que impulsa al Artículo 330 desde sus comienzos.
- Un estudio de las propiedades del material marginal y de su comportamiento con posibles aditivos, si fueran necesarios.
- Una decisión de cómo debe colocarse en obra.
- Una selección del sistema de control.
- Una instrumentación mínima del terraplén para observar su comportamiento a corto y largo plazo.

Actualmente (que ya han pasado varios años desde que, entre otras personas, redactamos el borrador del PG-3), la tendencia es a considerar como “marginal” un material más amplio que el que, ahora, aparece en el Pliego:

- Contenido de materia orgánica inferior al 5%.
- Hinchamiento en ensayo de hinchamiento libre, en las condiciones de puesta en obra (con o sin aditivos), inferior al 5%.
- Límite líquido inferior a 120%.

Y en breve, quizás, empecemos a quitar todas las restricciones, aunque siempre con la condición de que se haga el adecuado y justificativo estudio especial.

Algunos ejemplos de obras realizadas con materiales marginales:

- Autovía en la zona de Venta de Baños (Palencia): Se utilizaron arcillas terciarias grisáceas, expansivas, con algo de carbonatos. Se utilizó una sección del tipo encapsulada, rodeando las arcillas con zahonas naturales con algo de finos (25-35%) [9].
- Parque Tecnológico de Málaga: Se utilizaron arcillas marrones miocenas, de expansividad media a alta, en solución “sándwich”, alternándolas con capas de pizarra fragmentada y compactada [9].
- Tramo II de la Autovía M-45 de Madrid: Se aprovecharon las arcillas sepiolíticas de la traza (con densidades secas de 750 a 1 100 kg/m³), tratadas con cal (1,8-2,4 %), tanto en núcleo como en las zonas que le envuelven [2].
- Tramo I de la Autovía M-45 de Madrid: Se utilizaron las “arcillas” o “peñuelas” grises, en solución “sándwich”, alternadas con material adecuado de préstamo [17].
- P.A.U. de Vallecas: Aprovechamiento de “peñuelas” grises y marrones para terraplenes viarios, en solución encapsulada.
- Variante de Cuenca: Arcillas margosas terciarias, grisáceas, de baja plasticidad. Se trataron con cal (2%) en núcleo y espaldones. Informe no publicado.
- Variante de Cuéllar: Se utilizaron arcillas blanquecinas y marrones tratadas con 5% de cal en coronación y espaldones [5].
- Autovía A-381, Jerez-Los Barrios: Se ha estudiado con detalle, la estabilización de suelos arcillosos en el tramo V, y se ha utilizado este sistema (general-

mente en coronación) en varios tramos. [8].

- Ampliación del Ferrocarril a su salida de Madrid hacia Andalucía.
- M-50 de Madrid
- M-203 de Madrid, etc.

Los materiales arcillosos de más baja densidad entre los enumerados (peñuelas sepiolíticas) presentan unas características geotécnicas de problemática calidad cuando son compactados y, además, encierran el riesgo de expansividad, ya que la infiltración del agua desde el firme (a través de las capas más nobles del mismo) pueden dar lugar a fenómenos de hinchamiento. En los espaldones, por el contrario, la acción ambiental puede dar lugar a retracciones (por fuerte desecación), alternadas con hinchamientos (por humectación cíclica). Si se compactan arcillas del lado seco, se forma una agrupación de grumos, con el agua en su interior y el aire de los huecos parcialmente expulsado (estructura floculada). Esta estructura es sensible a la presencia de agua, que mueve los grumos y produce movimientos. Esto se puede evitar, sólo en parte, compactando del lado húmedo en el núcleo, consiguiendo una estructura dispersa en que los huecos se llenan de agua, con burbujas de aire aprisionadas entre partículas y que no pueden salir al exterior. La compactación con una humedad del orden del límite plástico (+ 2-3 %) consigue estos resultados. Pero ello no evita problemas en espaldones, en contacto con la acción ambiental.

Además, no siempre se consiguen, por simple compactación, estructuras de-

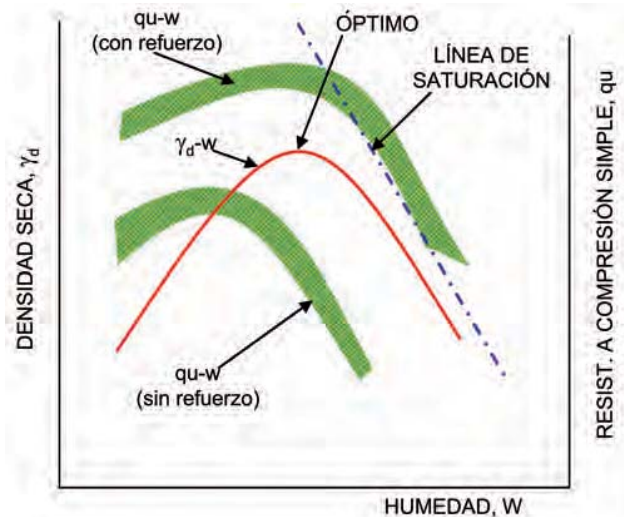


Figura 26. Variación de la resistencia a compresión simple con y sin cal (Oteo, 2007)

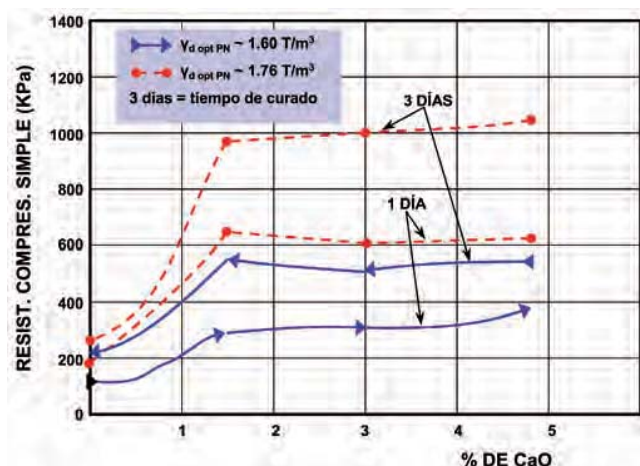


Figura 27. Resistencia a la compresión simple de muestras de la facies "Tierra de campos" (Palencia), con diferentes proporciones de cal. (Oteo, 2007)

bidamente resistentes y perennes, lo cual lleva a pensar el tratarlos con un aditivo que consiga:

- Aumentar la "cohesión", a corto o largo plazo, gracias a un efecto cementante con las partículas arcillosas y el agua existente (o añadido).
- Obtener una estructura menos plástica y menos expansiva, en que el efecto cementante disminuya la facilidad de entrada del agua y la separación de las láminas de silicatos que componen su red arcillosa.
- Aumentar la resistencia frente a la acción (cambios de humedad, erosión hídrica o eólica en espaldones, etc.)

El efecto cementante de la cal puede verse en laboratorio. En la figura 26 de la página anterior [11] se muestra un esquema de cómo, en general, en suelos arcillosos compactados, la resistencia máxima a

referido a la expansividad y el contenido de cal. En laboratorio (muestras machacadas) se necesita más cal que en el campo para conseguir resultados análogos.

Las soluciones que se han utilizado son diferentes y que el parámetro que se ha utilizado, generalmente, para distinguirlas es la densidad seca (natural o óptima del P. N.).

De acuerdo con ello, hemos establecido una clasificación de estos materiales marginales, teniendo en cuenta su densidad seca y su límite líquido, y que es la que aparece en la figura 29. En ella se distinguen cinco tipos de materiales marginales y, para cada uno de ellos, se establece una propuesta de solución, las cuales aparecen en la figura 30 [11].

Esta clasificación y soluciones deben tomarse como indicativas y no como verdades absolutas, aunque creemos que su

compresión simple se obtiene por debajo de la humedad óptima PN. Sin embargo, si se añade cal a la arcilla, la resistencia aumenta y la máxima resistencia se desplaza hacia mayores humedades (figura 27) [11].

En la figura 28 se resumen diversos ensayos (de campo y laboratorio

adopción está ya avalada por una cierta práctica real.

7. Sobre rellenos encima y contra estructuras

7.1. Rellenos sobre estructuras

Un caso particular de terraplenado es el que se produce sobre falsos túneles, sean "in situ" o prefabricados. En estos casos existen diversos problemas:

- Dificultades de compactar el terreno en las proximidades del falso túnel. Si éste está hecho "in situ", normalmente tiene un importante espesor (50-60 cm) y puede ser armado, con lo que puede aguantar relativamente bien las presiones que pueden transmitirlos los rodillos de compactación. Pero en el caso de bóvedas triarticuladas prefabricadas, su menor espesor y condiciones de contorno obliga a compactar poco en las proximidades de la obra de fábrica.
- Presencia de cargas asimétricas por ser el relleno de espesor variable, como en el esquema de la figura 31, que corresponde a un caso real en la Autopista Pamplona-San Sebastián. Hubo que cerrar al tráfico el falso túnel apenas inaugurado, ya que los empujes asimétricos no habían sido contemplados en el cálculo. Se produjo una deformación como la que aparece en la figura 31, con unas fisuras (primero en el túnel en el que la altura del relleno era mayor y, a continuación, al transmitir el empuje

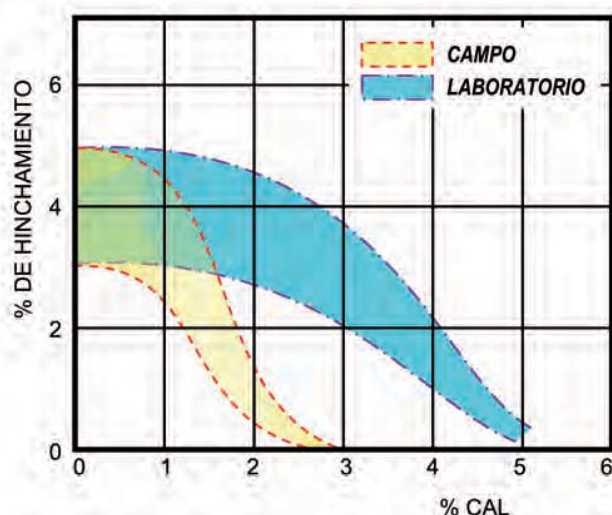


Figura 28. Variación aproximada de la expansividad de arcillas sepiolíticas con el contenido de cal (Oteo, 2007)



Figura 29. Posible criterio de clasificación de materiales arcillosos para su utilización en terraplenes (Oteo, 2007)

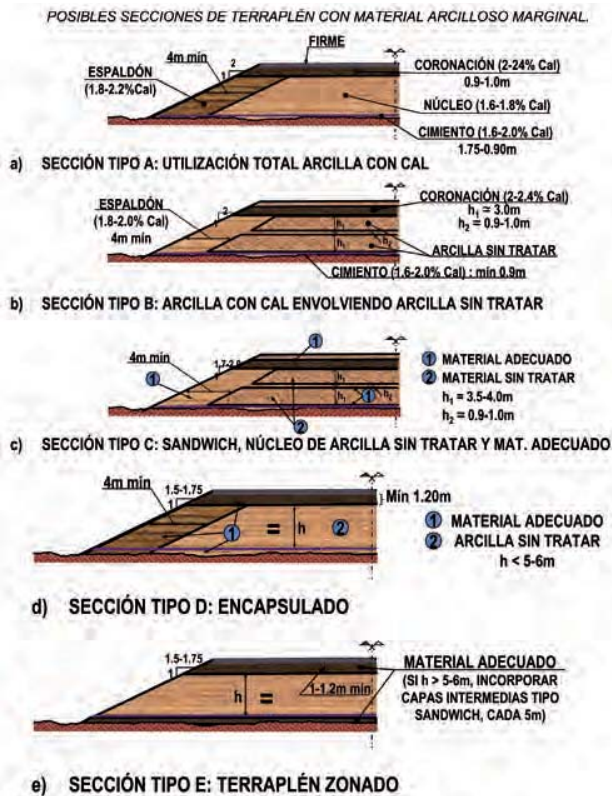


Figura 30. Posibles secciones de terraplén con material arcilloso marginal (Oteo, 2007)

un túnel sobre el otro, en el segundo). La fisura (realmente, grieta) tenía una longitud igual a la del túnel. Para luchar contra este problema, primero se apuntalaron los túneles y, después, se instalaron anclajes en cada túnel, para crear esfuerzos contrarios a los que producían los rellenos.

- Es habitual que los túneles prefabricados se calculen con densidades de los rellenos muy bajas, debido a la competencia comercial que existen entre las diferentes casas fabricantes. Así, hemos visto más de una vez considerar que el peso específico aparente del relleno era de 1,6 t/m³. Este valor es

compresión. Pero ello puede ser falso, tanto en el caso ya citado de relleno con espesor variable, como durante el proceso constructivo. Por ejemplo en la M-50 de Madrid se construyeron dos túneles, juntos y paralelos, prefabricados. La altura del relleno iba a ser pequeña (unos 3-4 m), por lo que los esfuerzos finales (una vez hecho todo el relleno) no serían grandes, así como la armadura. Pero, a pesar de las advertencias que se hicieron en las reuniones de obra, se colocaron las tongadas de relleno con una clara diferencia (de más de 2 m) entre un túnel y otro. Se produjo un empuje asimétrico y se hun-

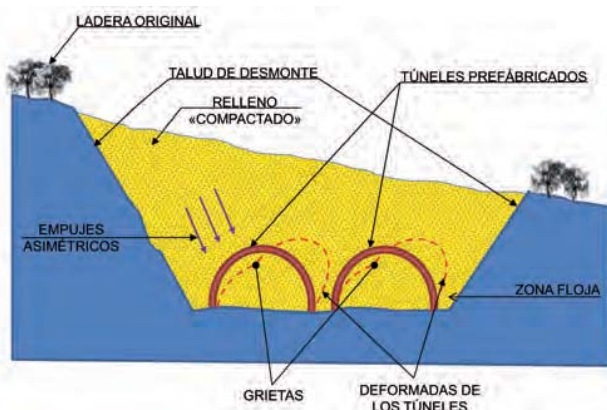


Figura 31. Túneles paralelos deformados por empuje asimétrico

muchísimo y viene a corresponder a un peso específico aparente seco, en que no se tiene en cuenta el agua (que ya suele tener el terreno, más la que aporten las lluvias). Por eso, deben de tenerse en cuenta pesos específicos aparentes del orden de 2,0 t/m³.

- Los túneles prefabricados suelen calcularse con cargas centradas y se diseñan con una armadura que, muchas veces, es mínima, pensando que el arco trabaja principalmente a

dieron 150 m de solución prefabricada. Los cimientos (“in situ”, sobre “peñuelas” verdosas) no se movieron, sólo se rompió el arco prefabricado y se produjo un colapso total (figura 32).

- En estos casos, a pesar de la hipótesis de triarticulación (pensando en que sólo hay compresiones) hemos hecho hormigonar y amorterar, junto a los arcos, hasta la mitad de su altura. Ello se realizaba por dos motivos: a) Porque, muchas veces, no se puede compactar junto a los hastiales del arco (se puede verter el relleno pero es muy difícil aplicarles energía para compactar); b) Porque se consigue una resistencia a flexión adicional. Pero si el relleno es realmente asimétrico esta medida puede ser insuficiente.
- Sin embargo, si se cuida la solución de prefabricado, puede obtenerse un resultado final perfectamente aceptable. Así lo hemos conseguido con tres túneles (no largos) en la Variante ferroviaria de Camarillas (entre Albacete y Murcia), inaugurado hace menos de dos años.

7.2. Rellenos contra estructuras

En este caso suele utilizarse el artículo del PG-3 de “Rellenos localizados”.

Generalmente lo que se pretende es:

- Dadas las dificultades de compactación (los rodillos apisonadores podrían producir sobre-empujes sobre muros y estribos de estructuras) se seleccionan buenos materiales –generalmente granulares– para que su autocompactación (aunque sea ayudada por riego)

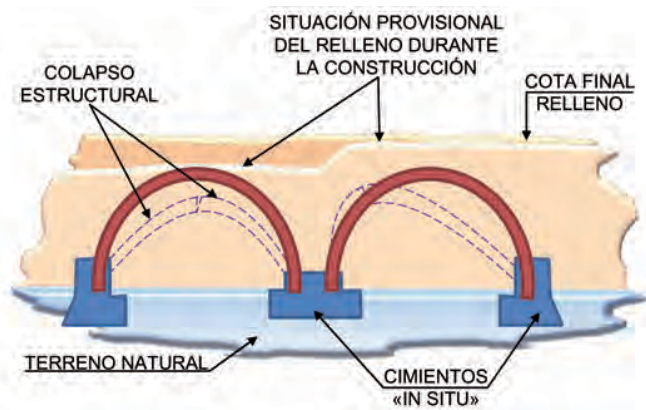


Figura 32. Colapso de túneles con diferencia de cota en el relleno

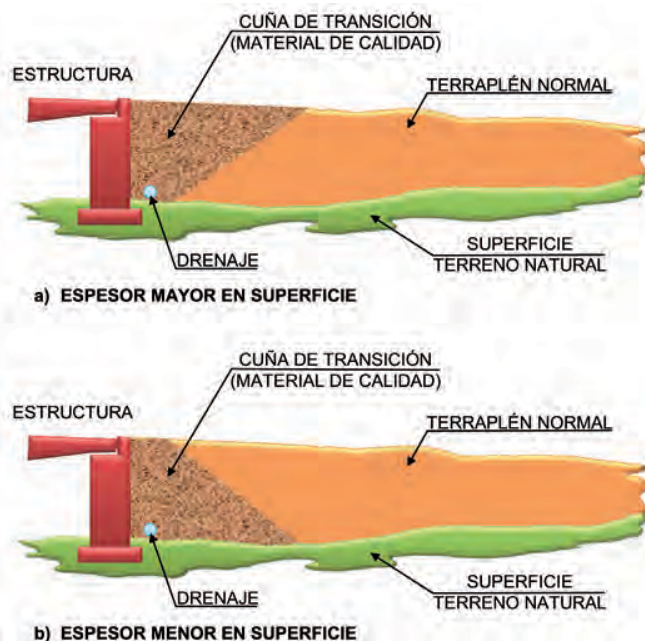


Figura 33. Posibles cuñas de transición

sea fácil y, además, produzcan menores empujes, al tener un rozamiento interno apreciable.

- Además se pretende establecer una transición entre la estructura y el terraplén, dado que los asientos pueden ser muy diferentes en estos elementos, sobre todo si el terreno natural es blando. En ese caso, en obras de carretera, hemos acudido a la solución de cimentar los estribos sobre el terraplén y utilizar losas de transición (largas, de $L = 6,0$ m), lo cual disminuye el problema, al ser los asientos bastante similares. Pero en obras ferroviarias de alta velocidad esta solución puede generar asientos incompatibles con la funcionalidad viaria. En ese caso suelen utilizarse “cuñas de transición”, entre el estribo y el terraplén normal (incluso aunque el

8. Sobre terraplenes apoyados en suelos blandos

En el caso de terraplenes sobre suelos flojos y blandos los principales problemas que se presentan son los debidos a asientos (corto y a largo plazo) y al riesgo de rotura por deslizamiento (figura 34). En estos casos puede ser necesario diseñar un tratamiento de mejora del terreno, tanto para disminuir o acelerar los asentamientos del terraplén como para asegurar su estabilidad frente al deslizamiento a corto y largo plazo. En diversas ocasiones, dichos tratamientos se diseñan siguiendo criterios dispares y separando completamente los dos problemas citados, sin tener en cuenta la diferente misión y efecto de drenes-banda, de columnas de grava, de la compactación

terreno natural no sea muy blando). Se pretende, con ello, que haya una zona de relleno con menos deformabilidad, pero con espesor variable que pase del asiento casi nulo del estribo al asiento real del terraplén. Ello puede conseguirse con dos tipos de cuña, como muestra la figura 33.

dinámica, etc.

El término “tratamiento” suele aplicarse una cierta acción sobre el terreno que acaba modificando sus propiedades y, sobre todo, su respuesta frente acciones exteriores e interiores. En este sentido cabe considerar como “tratamientos” las actividades que:

- Incrementan la cohesión aparente de conjunto del terreno, (aditivos remoción del terreno, inclusiones como las inyecciones, como las columnas de cal, etc.).
- Aumentan la resistencia al corte de conjunto, a veces ligeramente la cohesión y, sin embargo, ejerciendo una influencia mayor el rozamiento de conjunto, (inclusiones no cementantes, como las columnas de grava).
- Elevan la resistencia al corte de conjunto por comprimir con fuerzas interiores-exteriores la zona en peligro de rotura (con anclajes).
- Movilizan la resistencia efectiva (mayor que la de a corto plazo), gracias a drenar una zona o conseguir un menor tiempo y menor camino de drenaje, (disipación de presiones intersticiales más rápida y drenes de plástico y columnas de grava).
- Aumentan la resistencia al corte -sobre todo rozamiento- por aumento de la densidad aparente del terreno, (compactación dinámica, vibroflotación, explosivos, etc.).
- Actúan en el interior del terreno, formando barreras activas o pasivas, de forma que los movimientos de la estructura que interesa se reduzcan, (barreras de jet-grouting y de pilotes).

No trataremos aquí los sistemas de tratamiento o mejora de los materiales del propio terraplén, destinados a utilizar, por ejemplo, materiales marginales e inadecuados.

El caso de terraplenes, constituido con materiales no problemáticos y sin deformabilidad propia alta, pero apoyados sobre suelos blandos (generalmente arcillosos y saturados) y flojos (arenas muy poco densas o vertederos) es el típico que suele necesitar tratamientos del terreno, a veces muy pesados.

Podemos distinguir varias posibles soluciones:

- Para terraplenes no muy altos y es-

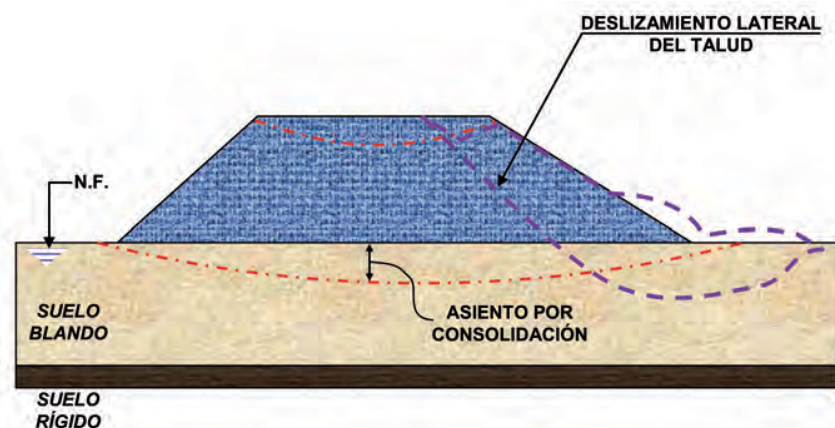


Figura 34. Problemas de terraplenes sobre suelos blandos saturados

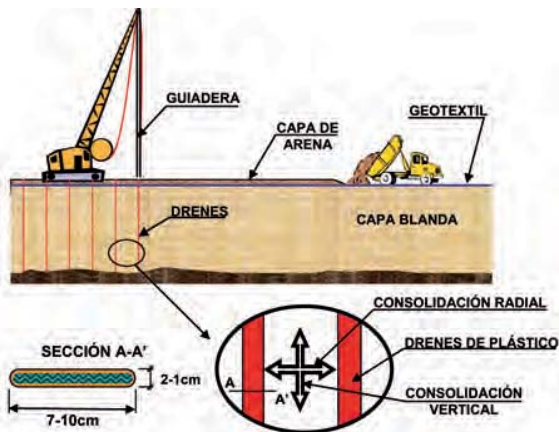


Figura 35. Construcciones de drenes de plástico

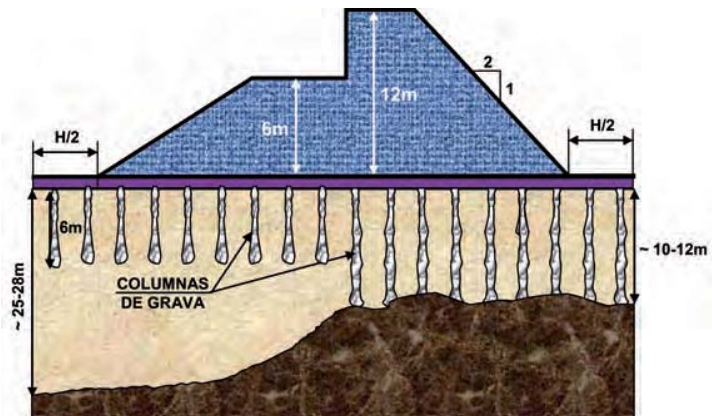


Figura 36. Tratamiento del terreno con columnas de grava, en función de la altura del terraplén (Caso de la variante de Medinaceli)

pesores de suelos blandos pequeños o para casos de vertederos urbanos flojos pero sin agua, puede acudirse a la sustitución, bien total o bien parcial. En este último caso se trataría de crear una "losa de terreno compacto" en superficie, dejando por debajo un cierto espesor de suelo deformable, al que llegarían pocas tensiones, y, por ello, se generarían pocas deformaciones. En el caso de que exista agua, la sustitución puede ser difícil o necesitar ir excavando y aportando piedra gruesa o bolos.

- Para el caso de vertederos nos ha dado muy buen resultado el empleo de la compactación dinámica, con energías de 150-200 mt, 5-7 golpes en los extremos de un cuadrado de unos 3-4 m de lado, en primera fase, y después 4-5 golpes en los centros de lado y cuadrados. Normalmente se controla la huella que deja el golpe y se dan suficientes golpes hasta que el "gradiente de huella" empieza a disminuir (de un quinto a un sexto del primer golpe). Hemos utilizado este sistema en muchas obras: Tres Cantos, M-45 y R-3 de Madrid, Enlace Juan Carlos I de Sevilla, etc. En el caso de la R-3, en la zona de una antigua explotación de sepiolitas, rellena de productos de la excavación y restos de demolición, la huella final llegó a ser del orden de 3 m, en un espesor de relleno del orden de 10-13 m.
- Cuando existen bolos o muchas irregularidades en el vertedero o tiene bastante espesor, pueden usarse las llamadas "columnas de módulo controlado", que son pilotes de mortero, hechos con perforadora rotatoria, inyectable por su eje central. Las columnas se distri-

buyen en mallas triangulares, con una columna cada 4-6 m². Las columnas suelen tener un diámetro de 30-40 cm. El mortero puede ser de una resistencia característica de 7-8 MPa y con un cono de Abrams muy elevado (18-20 cm). Esta solución la hemos aplicado en la R-3 de Madrid, en zona de la antigua mina de sepiolitas de Jolsa con 15-18 m de espesor de rellenos, en el enlace de las L.A.V. Sevilla-Madrid-Valencia.

- Si el suelo está saturado se puede acelerar la generación de asentos instalando drenes-banda o de plástico (uno cada 1,5-2,5 m²) lo que acorta el camino drenante y permite inducir más rápidamente los asentos, sin reducirlos (figura 35).

Si hay problema de falta de capacidad portante puede ser necesario llegar a instalar columnas de grava, en que, por sustitución, el terreno flojo queda "armado" por columnas de grava -compactada por vibración- de diámetro variable (de Ø 0,6 a 1,2 m), según el terreno, la energía aportada, etc., (figura 36).

No sólo se consigue mejorar el conjunto del terreno, con lo que se disminuyen los asentos (figura 37) sino que se acelera la consolidación. En obras lineales hemos usado tratamientos con una

columna cada 5-10 m². (Variantes de Medinaceli, Puerto de Santa María y Ronda Este de Huelva, Eje Crevillente- Torrevieja, Avenida de la Ilustración y M-50 de Madrid, SE-40 de Sevilla, etc.).

Para cálculos de estabilidad el terreno mejorado homogéneo se considera con unos parámetros intermedios entre los de las columnas ($C_c = 0$, $\varphi_c = 37^\circ$) y los del suelo blando (C_u , φ_u). Generalmente se obtiene, en función de la separación de columnas, un terreno equivalente con una cohesión del orden de 2-3 t/m² y un rozamiento del orden de 12 - 8°.

- Generalmente con los métodos anteriores (y sin ellos también) se emplea la precarga, en el sentido de construir el terraplén por fases (si hay problemas de estabilidad) o de una vez, sin colocar la plataforma viaria, dejando un tiempo actuar la carga (o incluso aumentándola con una sobrecarga que luego se

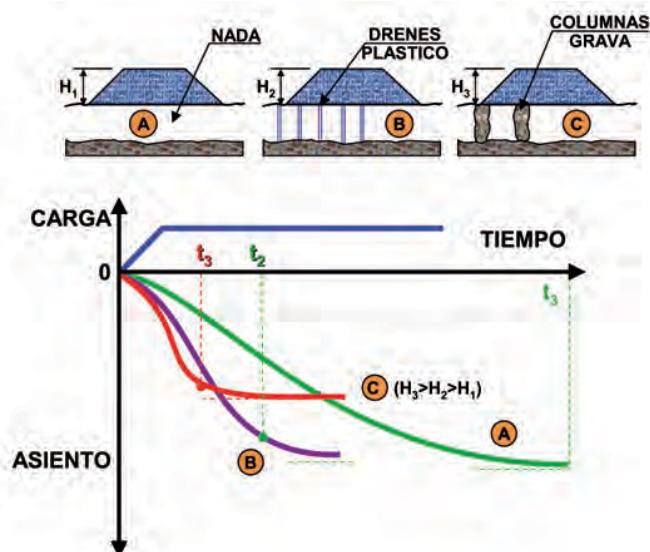


Figura 37. Comparación de relaciones asiento-tiempo en terraplenes con diferentes tratamientos

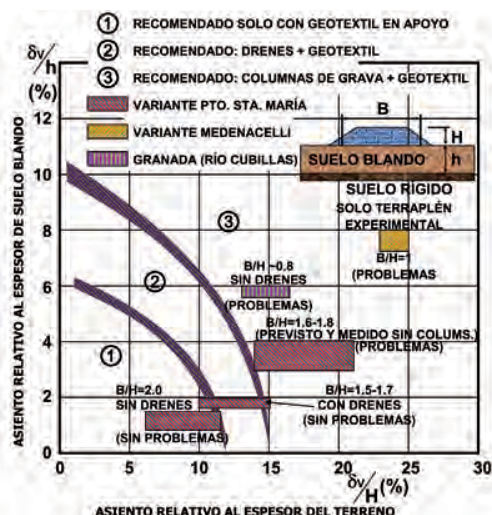


Figura 38. Asientos en diversas carreteras sobre suelos blandos. Criterio recomendado para diseño del tratamiento de suelo blando bajo un terraplén, (Oteo, 2003)

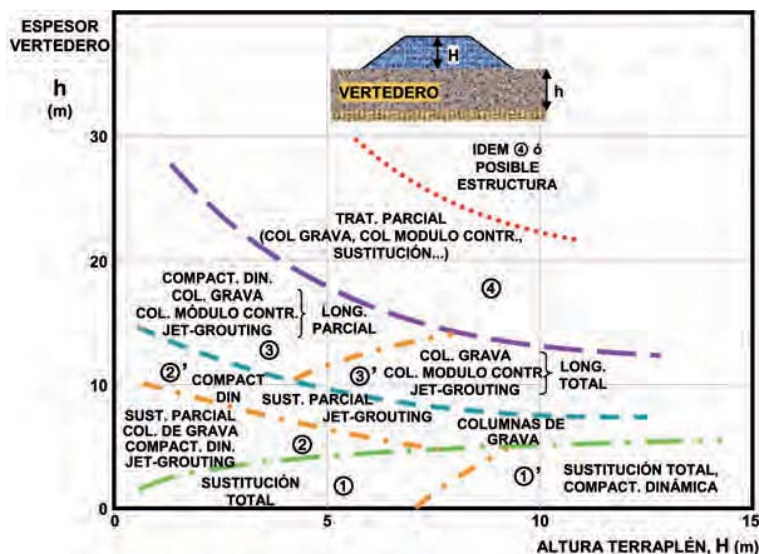


Figura 39. Posible criterio para tratamientos del apoyo de terraplenes sobre vertederos o rellenos terrenos flojos.

retira), para que, al instalar esa vía, los asentamientos que experimenten sean los remanentes (10-15 cm como máximo en carreteras). Ello obliga a esperar a veces unos meses; pero téngase en cuenta que, a pesar de usar columnas de grava, hemos tenido asentamientos de 70-90 cm en terraplenes de 7-10 m de altura, por lo que se necesita un cierto tiempo (3-5 meses) para llegar a una situación aceptable para la vía.

- También puede, en estos casos (o sin esos tratamientos) reforzarse la base del terraplén con un geotextil que resista a tracción (30-35 kN/m). En terraplenes de 2,5-3,5 m puede ser suficiente.
- En la figura 38 [10] puede verse un criterio que recomendamos para seleccionar el empleo de sólo geotextiles, drenes-banda o columnas de grava.

En casos de carreteras sobre vertederos flojos, sin apenas nuevo terraplén, se han producido asentamientos importantes, tanto por la alta deformabilidad estática del material, como por el colapso que pueden originar flujos de agua (deformaciones del 1 a 5% del espesor humectado). En estos

casos hemos utilizado desde la sustitución parcial hasta las columnas de grava, pasando por la consolidación del vertedero mediante inyecciones de jet-grouting, como hemos hecho en la Avenida de la Ilustración de Madrid (en zonas sin circulación de agua) y en la A-92, cerca de Loja, aunque caben otros sistemas (figura 39).

- Por último cabe hablar de los sistemas de tratamientos basados solamente en aporte de vibraciones, como son la vibroflotación en profundidad (realizada con los torpedos de las columnas de grava, pero sin aportación de material), la bandeja vibrante, el terra-probe (penetración de un tubo metálico con vibrador en cabeza, cuya eficacia disminuye con la profundidad), las voladuras, etc. Estos tratamientos son apropiados para terrenos granulares, por lo que, casi siempre, en España se han aplicado en suelos arenosos o granulares flojos cerca del mar, (en realidad, casi siempre eran rellenos realizados por vertido desde tierra o procedentes de dragado), para ganar terreno al mismo, como la vibroflotación realizada en

Cartagena (Carenero de galeras) y Las Palmas (nuevo astillero para syncro-lift, en el que también se usó el método terra-probe, con menos efectividad), o las voladuras realizadas en el Puerto de Valencia (proyecto del Prof. Romana), etc. No suelen, por esa condición, ser utilizados en infraestructuras lineales, salvo los supercompactadores dinámicos, que pueden usarse para mejorar terrenos flojos de apoyo de terraplenes. Finalmente, puede indicarse:

- En cada caso hay que elegir el procedimiento que resume las condiciones adecuadas de plazo, costo y efectividad y no sólo el más económico.
- El uso inadecuado de tratamiento puede inducir más problemas que los que se pretende solucionar.

9. Sobre la patología

A la vista de todo lo anteriormente expuesto, cabe señalar que pueden producirse numerosos problemas patológicos en el entorno de la construcción de estructuras de tierra para infraestructuras viarias (por lo

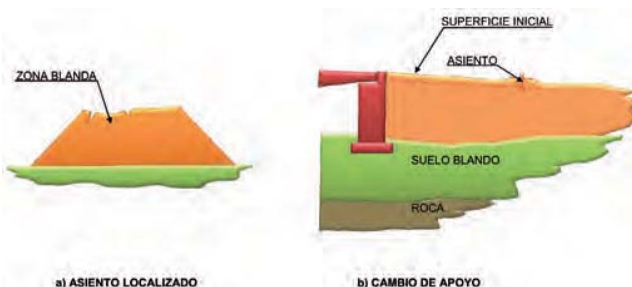


Figura 40. Asientos por "blandones" del terraplén o suelo de apoyo blando

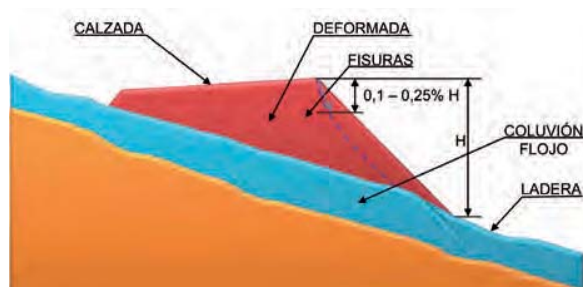


Figura 41. Asiento de terraplén de gran altura a media ladera

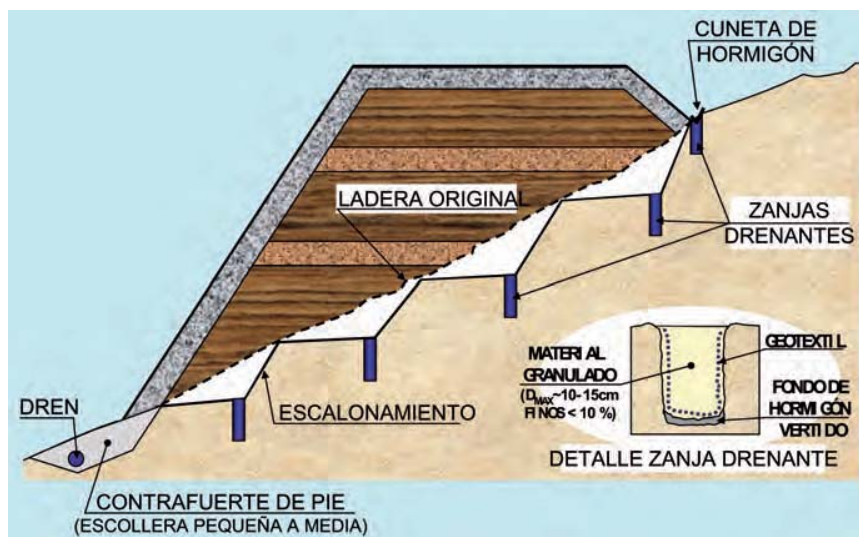


Figura 42. Apoyo de terraplenes de importante altura a media ladera

tanto, no entraremos en el caso de presas de materiales sueltos). Así, pueden considerarse las siguientes patologías:

- Por insuficiente capacidad portante de la explanada y coronación, que pueden originar daños concentrados en el firme (figura 40).
- Por asentamiento generalizado del terraplén sobre un suelo blando o deformable, lo que se nota por sus asientos diferenciales junto a estructuras de

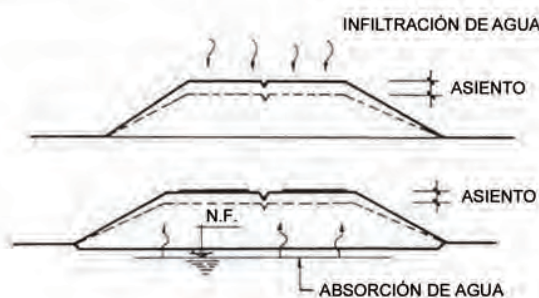
fábrica o en la transición terraplén-desmonte (figura 40).

- Por asentamientos y deformaciones horizontales diferenciales en terraplenes a media ladera, con parte apoyada en desmonte o terraplén de poca altura y con parte de zona de altura considerable. En este caso en los movimientos del firme no solo influyen los asientos del terraplén por peso propio, que pueden ser del orden del 0,12-0,25% de

altura (figura 41), según el material y su grado de compactación, sino la compresibilidad del terreno superficial de la ladera (coluvión o roca alterada). Contra ello cabe luchar con la eliminación de este terreno superior de apoyo, abancalamiento de la ladera y el drenaje adecuado (figura 42).

- Por colapso del material del terraplén, compactado del lado seco y que las lluvias se encargan de saturar, con deformaciones como las que se ven en la figura 43 [20].
- Por asentamiento brusco de un terraplén sobre suelo carstificado (bien en yesos, bien en margo-calizas). Este fenómeno es más típico de fondo de desmontes y terraplenes de poca altura, y contra él se lucha removiendo el terreno y construyendo un terraplén que de una resistencia apreciable frente al posible punzonamiento, limpiando y hormigonando las cuevas cársticas, construyendo una losa de hormigón algo armada, colocando capas de geotextil resistentes (figura 44).
- Por cambios de volumen en los espaldones hechos con material algo

A.- ESQUEMA DE ASIENTOS DE COLAPSO



B.- DEPENDENCIA DE LA CARGA DE TIERRAS

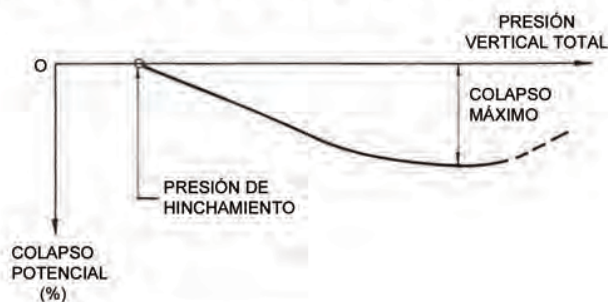
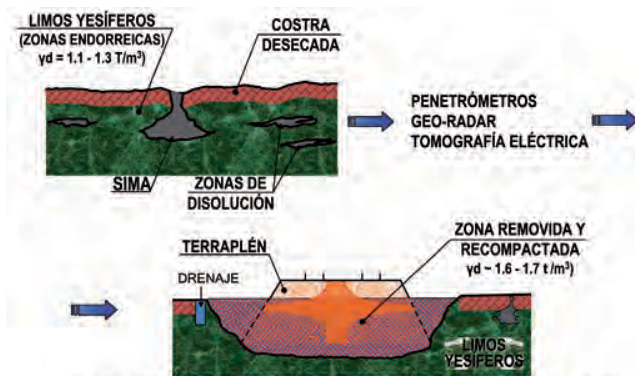
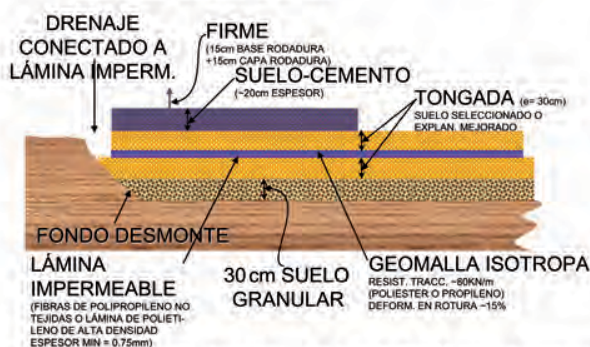


Figura 43. Asientos de colapso (Soriano, 1994)



a. Solución adoptada en una zona de simas de disolución en limos yesíferos, cerca de Zaragoza (zona endorreica)



b. Solución utilizada en la plataforma de la Radial R-3 (Madrid) sobre zona con cavidades cársticas en yesos (Pérez Arenas y otros, 2003)

Figura 44. Soluciones en casos de base de apoyo colapsable

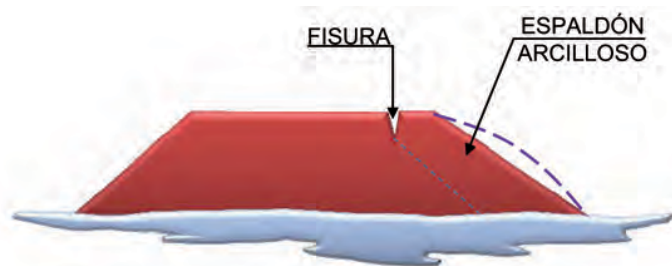


Figura 45. Fisuración por cambio de volumen en espaldón

expansivo, en los que tan peligrosa es la expansión como la retracción. Ello incide, principalmente, en los arcenes, formándose, generalmente, una grieta entre arcén y calzada (figura 45).

- Por deslizamiento (sólo iniciado o totalmente desarrollado) en el caso de terraplenes apoyados a media ladera sobre formaciones arcillosas fisuradas (figura 46), en que el peso del terraplén disminuye la capacidad de flujo del agua a través de las fisuras y se crea un aumento de presión intersticial que intenta producir el deslizamiento (figura 46). En el caso de que éste se produzca, el agua puede penetrar –entonces, debido a la deformación del terreno y aper-

tura de fisuras– más profundamente y aumentar – con el tiempo – la profundidad de la superficie de deslizamiento, según un fenómeno de “degenerabilidad”, que hemos descrito con anterioridad (Oteo, 2003). Esta profundización puede llegar hasta unos 9-10 m; a partir de esa profundidad la presión total impide que continúe el fenómeno (figura 47). Hemos comprobado en la zona de Jaén varios deslizamientos sobre arcillas miocenas fisuradas. Por cierto, la rotura de la Presa de Aznarcóllar, sobre materiales similares (a parte de otras influencias muy importantes) se produjo a esta profundidad, después que hubieran producido en la zona diversas e importantes de-

formaciones, que probablemente, llevaron a un fenómeno de “degenerabilidad” de la resistencia al corte de las arcillas margosas, según el

cual disminuye fuertemente la cohesión y algo el rozamiento interno.

- En estos casos de terraplenes a media ladera sobre materiales impermeables, hay que cuidar el drenaje, pero no sólo bajo el terraplén, sino en la zona de la ladera situada por encima del terraplén (posibles vaguadas, figura 48). En Jaén y Granada hemos visto varios casos de acumulación de agua en la zona superior e inferior (respecto al terraplén) de la ladera. Ello ha contribuido, decisivamente, al deslizamiento de terraplenes, por saturación de su base.
- En algunos casos a media ladera, con parte del terraplén adosado contra la misma, la presencia de capas areniscas en la arcilla margosa (lo que no es raro) puede aportar agua a la masa y base del terraplén y provocar su deslizamiento. Por ejemplo, en Mengibar se produjo un fenómeno de este tipo (figura 49), que fue portada de la prensa andaluza.
- En el fondo de desmontes, en suelos arcillosos, hay que tener mucho cuida-

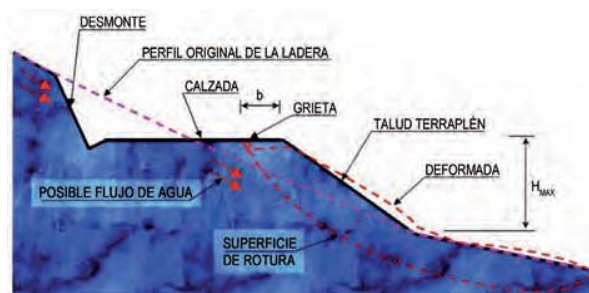


Figura 46. Esquema típico de inestabilidad de terraplén a media ladera.

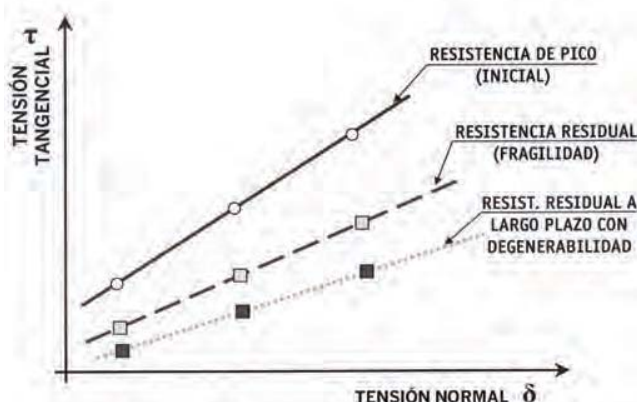
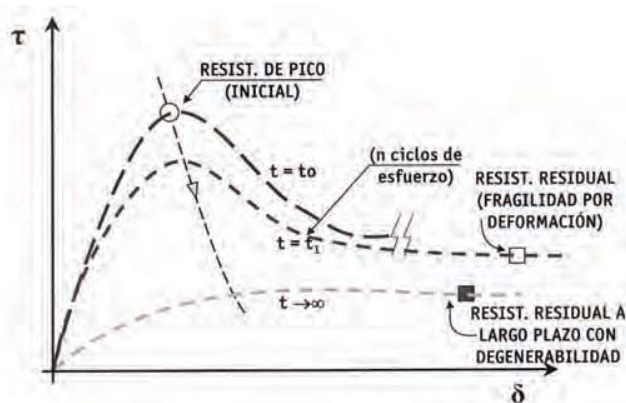


Figura 47. Evolución de la resistencia al corte de una arcilla margosa fisurada por degenerabilidad



Figura 48. Efecto del agua en terraplén a media ladera, sobre vaguada

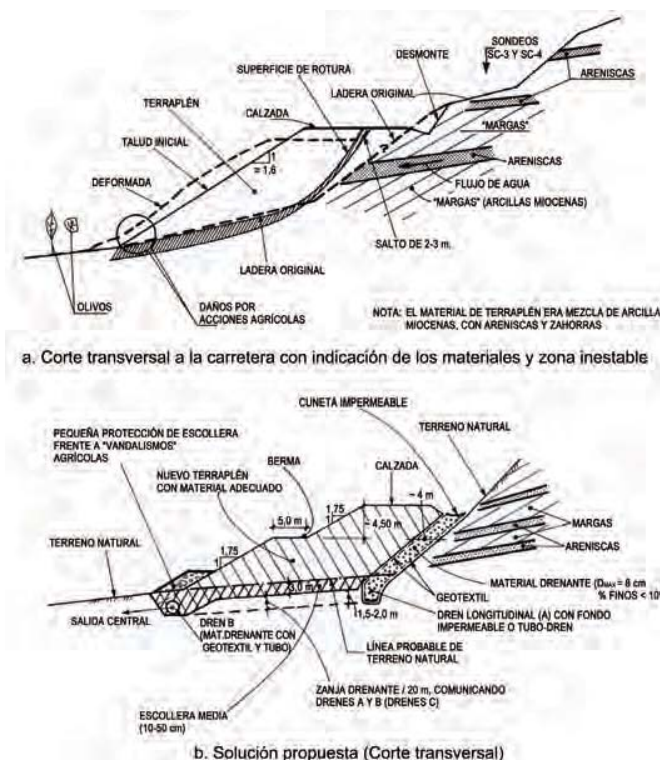


Figura 49. Reparación de terraplén inestable en Mengíbar (Jaén)

do con el drenaje (figura 50) y si la arcilla es expansiva conviene impermeabilizar con dos tongadas de arcilla con cal.

10. Algunas reflexiones finales

Como cierre de todo lo anteriormente queremos hacer las siguientes reflexiones.

- Hoy día se tiende a aprovechar todo tipo de materiales en las estructuras de tierra viarias. Así, en la M-45 II aprovechamos un vertedero: tras tamizar los plásticos y grandes gruesos quedó un material que se podía clasificar como seleccionado, a pesar de su origen y contenido vario, que ha dado muy buen resultado. Ello puede exigir la adición de aglomerantes, como la cal, o compactación con supercompactadores, técnicas que han dado buen resultado para terraplenes en la Alta Velocidad.
- Deben utilizarse criterios adecuados para controlar la compactación de un terraplén. El sistema de sólo controlar la densidad seca aparente es, claramente insuficiente y ése no es, precisamente, el espíritu del PG-3 actual. Además ha de tenerse en cuenta que los datos del ensayo de referencia deben de ser representativos. En cuanto el material es algo arcilloso, es necesario exigir lotes

muy pequeños y repetir los ensayos de referencia, en cuyo caso es mejor utilizar los ensayos de placa de carga (que ya empiezan a ser dinámicos) y de huella.

- El diseño de terraplenes zonados ("sándwich", "encapsulados", etc.) es ya habitual, con lo que es más fácil la utilización de materiales "nobles" junto a "menos nobles".
- El drenaje de la base del terraplén y de sus alrededores es importantísimo, sobre todo en el caso de apoyos a media ladera.
- En el caso de terraplenes sobre suelos blandos es posible utilizar la "precarga" con el propio terraplén, acelerada con drenes o columnas de grava. Se ha dado un criterio para cuándo es aplicable cada uno de estos métodos.
- En el caso de terraplenes sobre vertederos pueden producirse asentos a muy largo plazo, por descomposición del material del vertedero. Se han dado criterios para seleccionar el criterio de tratamiento de los mismos.
- Los materiales marginales con cal (si

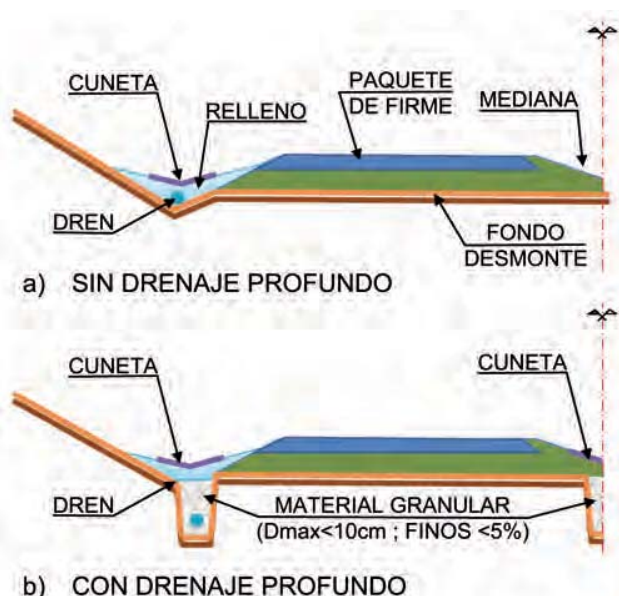


Figura 50. Solución de fondo de desmonte en material arcilloso

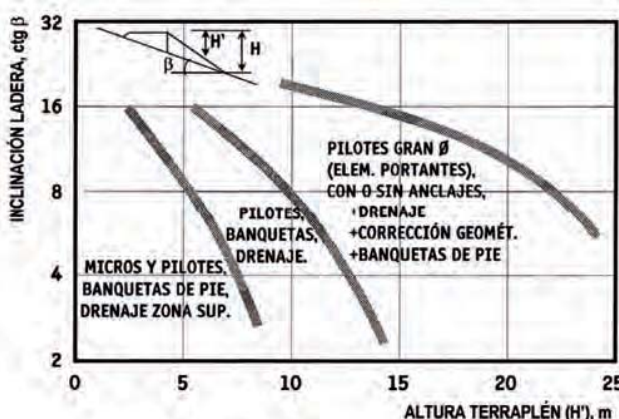


Figura 51. Medidas de corrección en terraplenes sobre ladera (Oteo, 2003)

no contienen más del 1-2% de yeso) pueden producir terraplenes con mejor comportamiento que con suelos adecuados y tolerables.

- Se han descrito una serie de patologías típicas, derivadas de la deformabilidad propia del terraplén o de la de su apoyo (incluido el colapso por humectación o disolución). En el caso de inestabilidad a media ladera, pueden usarse los sistemas de estabilización de la figura 51 [10].
- La instrumentación de terraplenes puede hacerse con placas de asiento, inclinómetros, líneas continua de asientos, piezómetro (casi siempre, de dudoso resultado), células de asiento, etc. (figura 52 de la página siguiente). La relación desplazamiento horizontal máximo, al pie del terraplén y el máximo asiento en su centro, da una idea del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento lateral del terraplén. Relaciones inferiores

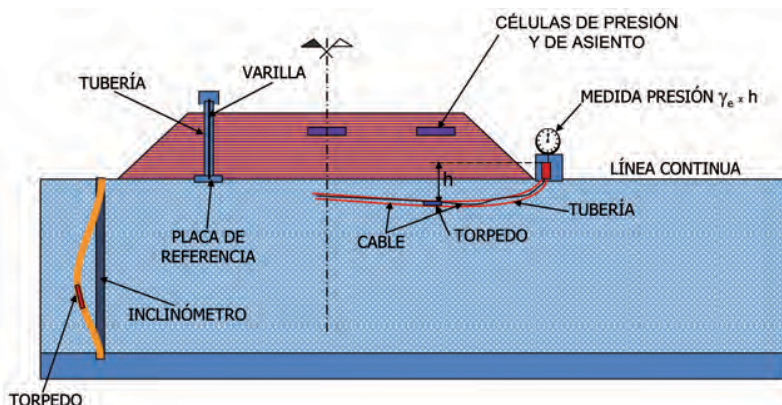


Figura 52. Observación y control de comportamiento

a 0,25 son indicativas de un coeficiente de seguridad superior al 1,25.

- También puede estimarse el coeficiente de seguridad del talud de un terraplén en función del asiento postconstructivo (figura 53).

Terminamos citando una frase del Maestro de Maestros D. Enrique Balaguer [1]: “La I+D+i jugarán, en los próximos años un papel destacable en las obras públicas. En carreteras ... asistiremos a un impulso en el tratamiento de los materiales (tierras inadecuadas tratadas para su uso en terraplenes y explanadas, firmes innovadores ..., etc. ... sistemas avanzados en el tratamiento de desmontes y terraplenes, así como en la búsqueda de la máxima eficacia energética durante la construcción y el mantenimiento de las vías”. Así lo esperamos y pensamos que los trabajos que hoy se presentan aquí sean la base y puesta al día de todo ello.

11. Referencias bibliográficas

[1] Balaguer, E. e Izard, J. M. (2007) “La red de carreteras actual y su gestión: Los retos del futuro”. Un siglo de Caminos en España. A.T.C. Madrid, pp. 115.

[2] Domingo, A.; Olías, I.; Torroja, J.; Castanedo, F. J. y Oteo, C. (2000). “Metodología y estudio de la reutilización, con tratamiento de cal, de materiales arcillosos clasificables como marginales e inadecuados en la M-45 de Madrid”. Simp. Sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte, Barcelona. Septiembre, pp. 483-96.

[3] Escario, J. L.; Escario, V. y Balaguer, E. (1967) “Caminos”. II Tomo, 5ª Edición. Ed. Dossat, Madrid.

[4] Espinace, R. y Oteo, C. (1983). “In-

fluencia del grado de compactación de rellenos arenosos en su deformabilidad bajo acciones estáticas y cíclicas”. Cuadernos de Investigación. CEDEX, nº 10.

[5] Martínez, E.; Gutiérrez Manjón, J. M. y Santamaría, J. J. (1998). “Variante de Cuéllar: Formación de terraplenes mediante estabilización parcial de suelo con cal”. I Congreso Andaluz de Carreteras, Granada. Tomo II. pp. 1.727-31.

[6] Nardiz, C. (2007) “Desde la reconstrucción de la red hasta la crisis del petróleo”. Un siglo de Caminos en España. A.T.C. Madrid. pp. 67-92.

[7] Oña, J.; López, A.; Oteo, C. y Sopeña, L. (1998). “Estabilización de la ladera de Aguadulce” I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada. Vol. II. pp. 1949-58.

[8] Ortuño, L. y Rodríguez, J. L. (2000). “La estabilización del suelo con cal como mejora de suelos. Estudio realizado en el tramo V de la A-381: Jerez-Los Barrios”. II Andaluz de Carreteras, Cádiz, Vol. II. Pp. 1.309-24.

[9] Oteo, C. (1994). “Reglas generales de proyecto”. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo. Ponencia General. pp. 183-205.

[10] Oteo, C. (2003). “Reflexiones sobre el arte de la estabilización de taludes”. III Congreso Andaluz de Carreteras. Sevilla. Vol. I. pp. 911-23.

[11] Oteo, C. (2007) “Estabilización y refuerzo de materiales marginales” II Jornada sobre Materiales Marginales en Obras Viarias: Sevilla A.T.C., pp.33-68.

[12] Oteo, C. (2009) “De socavones y otras inestabilidades”. Doce Lecciones sobre Geotecnia de infraestructuras lineales del transporte”. A.T.C. Madrid.

[13] Oteo, C.; Sopeña, L. y Burbano, G.

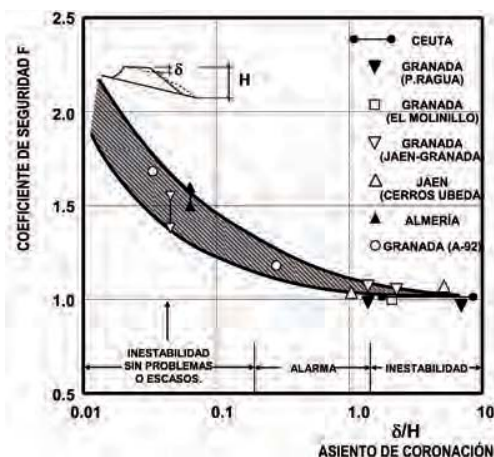


Figura 53. Posible variación entre el coeficiente de seguridad del talud de un terraplén y el asiento postconstructivo

(1998). “Rellenos aligerados con poliestireno expandido (EPS) en la Variante del Puerto de Santa María”. I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada. Vol. II., pp. 1773-1778.

[14] Pardo, F.; Oteo, C.; Sopeña, L. y Miró, C. (1994). “Soluciones geotécnicas para los terraplenes del Parque Tecnológico de Andalucía”. III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo, pp. 291-8.

[15] Pérez Arenas, R.; Ortín, J. A.; Oteo, C.; Castanedo, F. J. y Montejano, J. C. (2003). “Tratamiento de la Plataforma de la Radial 3 a su paso por una zona con riesgo de existencia de cavidades cársticas por la existencia de sustrato yesífero”. III Congreso Andaluz de Carreteras. Sevilla. Vol. I, pp. 1001-12.

[16] Pérez, F.; Caballero, A. y Ayuso, J. (1998). “Estabilización de suelos con cal: Posibilidades en Andalucía”. I Congreso Andaluz de Carreteras. Tomo II, pp. 1.701-86.

[17] Sahuquillo, E.; Carretero, I. y Díez, F. (2002). “Empleo de suelos marginales en el Tramo I de la M-45 de Madrid”. Revista RUTAS. (A.T.C.), nº 88, Enero-Febrero. pp. 5-10.

[18] Sánchez Lázaro, T. (2007). “De las calzadas romanas a la aparición del vehículo automóvil” Un siglo de Caminos en España. A.T.C. Madrid, pp. 27-34.

[19] Santamaría, J. y Parrilla, A. (2001). “Principales innovaciones en el PG-3 sobre Geotecnia Vial y Drenaje”. Revista RUTAS. (A.T.C.). nº 84. Mayo-Junio, pp. 15-28.

[20] Soriano, A. (1994) “Características del comportamiento de terraplenes y pedraplenes” III Simposio Nacional de Geotecnia Vial. Vigo. pp. 207-225. ❖