

**II JORNADAS SOBRE MATERIALES MARGINALES EN OBRAS VIARIAS**  
**A.T.C. – DIR. GEN. CARRETERAS (Mº FOMENTO)**  
**JUNTA DE ANDALUCÍA – COLEGIO ING. C. C. y P.**  
**SEVILLA, MARZO 2007**

**“ESTABILIZACIÓN Y REFUERZO DE MATERIALES  
MARGINALES”**

**Carlos Oteo Mazo**  
**Prof. Dr. Ing. de C. C. y P.**  
**Catedrático Ing. del Terreno**  
**Universidade da Coruña**

## **ESTABILIZACIÓN Y REFUERZO DE MATERIALES MARGINALES**

**Carlos S. Oteo**

Catedrático de Ingeniería del Terreno. (Universidade da Coruña) Presidente Comité Geotecnia Vial de la A.T.C.

**RESUMEN:** En la presente Ponencia se analizan las propiedades de los materiales marginales. Se describen y comentan los criterios que sirven para establecer su definición y se analizan sus características geotécnicas: Plasticidad, granulometría, condiciones óptimas de ensayos de compactación, etc. Se presta atención especial al tratamiento de refuerzo con cal y a la metodología de su estudio y puesta en obra. También se comentan los materiales de este tipo utilizados en diversas obras reales viarias y se propone un sistema de clasificación, junto con solución tipo de terraplén, a emplear en las obras viarias.

### **1. INTRODUCCIÓN.**

En la Presente Jornada se pretende presentar diversas experiencias nacionales sobre la utilización de los llamados “materiales marginales” en las obras de Carretera, en base a las realizaciones que se han llevado a cabo en los últimos años y que se han podido realizar gracias a introducir el grupo de “materiales marginales” (como algo casi despreciable pero que, a veces, podría usarse, con justificación) en el Pliego de Prescripciones Técnicas de Carreteras del Ministerio de Fomento.

En el año 2004, en el IV Congreso de Geotecnia Vial se incluyó una Ponencia General del autor de estas páginas con el título: “Suelos marginales: Características y aprovechamientos”. Y en el año 2005 organizamos una primera versión de esta Jornada en Madrid. Dado el periodo de tiempo transcurrido, esa Ponencia, la de la Jornada de 2005 y la de la presente Jornada tienen gran parte de su contenido en común, ya que las aportaciones más originales serán las que presentan diversos autores en las comunicaciones de dicha Jornada. Se pretende que estas páginas sean más una introducción a esas experiencias que una conclusión, las cuales agruparemos junto a las que aquí se descubren en un futuro próximo, por eso hemos querido repetir gran parte de la Ponencia de Santander y de la Jornada de Madrid, por considerar que su información era válida para aquellos que estén interesados en estos materiales.

## **2. PROCEDIMIENTO HABITUAL DE SELECCIÓN DE MATERIALES PARA TERRAPLENES.**

Los pliegos oficiales de prescripciones técnicas para obras de carreteras 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 Suelos de Casagrande, propiciada por el Cuerpo de Ingenieros norteamericano. La simplicidad y bondad inicial de esa idea se ha 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 fácil, en general:

- Se realizan ensayos de laboratorio sobre muestras alteradas, tomadas en catas a lo largo de la traza o situadas en zonas de posibles préstamos.
- En algún caso (Clasificación francesa) se toman muestras para determinación de humedad del material de préstamo, aunque eso debe hacerse prácticamente al ir a utilizar el material.
- Con esos datos de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, datos del ensayo de apisonado Proctor, índice de C.B.R., contenido de materia orgánica y de sulfatos) se procede a clasificar cada tipo de terreno de la zona, dentro de los grupos definidos por la normativa oficial. Estos grupos llevan desde nomenclatura muy apropiada: suelo seleccionado, suelo tolerable, etc, hasta nombres en clave: A-5, A-7, ML-OL, etc.
- 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 se utilizará ese material. No se suele especificar el tipo de sección estructural de ese terraplén (al menos, hasta hace poco no se hacía) y se suele considerar que los taludes tendrán inclinación 3(H):2(V) (habitualmente).

Acaba así el diseño de los aprovechamientos térreos para terraplenes y pedraplenes, lo cuál suele ser admitido, de forma preferente, por muchas direcciones y controladores de obra. Sin embargo, esa facilidad puede entrañar serios problemas cuando los materiales presentes en la zona ya no son los que a esas Direcciones de Obra les gustaría. El mayor aumento, en España, de los volúmenes de movimientos de tierra en obras viarias a partir de los años 80 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.

### **3. CLASIFICACIÓN DE MATERIALES.**

El antiguo PG-3 del Ministerio de Obras Públicas (M.O.P.) de España -1975- distinguía cuatro tipos de materiales para terraplenes: a) Seleccionados. b) Adecuados, c) Tolerables, d) Inadecuados (de mayor a menor calidad). Es decir, predominio de materiales utilizables, despreciando los “inadecuados”, lo que suponía eliminar un gran volumen de los materiales presentes en España: Arcillas miocenas y pliocenas de la Meseta Central (“toscos”, “peñuelas”, arcillas margosas, las mal denominadas margas), arcillas miocenas del sur de España (por su expansividad), arcillas yesíferas y roca de yeso, etc. y no sólo por que fueran materiales plásticos y/o expansivos, sino porque su granulometría no les permitía estar ni en el grupo de granulometrías definidas como de “terraplenes” ni claramente en el grupo de “pedraplenes”.

La Orden Circular 326/00 del año 2000 (llamado nuevo PG-3, coloquialmente e incluso, inadecuadamente, PG-4) 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.

Esto se debe a que, en los veinticinco años que separan las dos versiones citadas del PG-3, se han tenido que realizar nuevas obras de gran envergadura (Plan Nacional de Autovías, Autopistas de peaje, autovías autonómicas, etc) con grandes movimientos de tierra y con mayores condicionamientos ambientales que en el pasado. Ello ha llevado a la necesidad de utilizar algunos materiales proscritos por el PG-3 (75), pero que, a pesar de ello y con el debido tratamiento en el arranque, transporte y puesta en obra, han dado resultados satisfactorios.

Los materiales “marginales” del nuevo PG-3 son aquellos 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 Fig, 1 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 españoles (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).

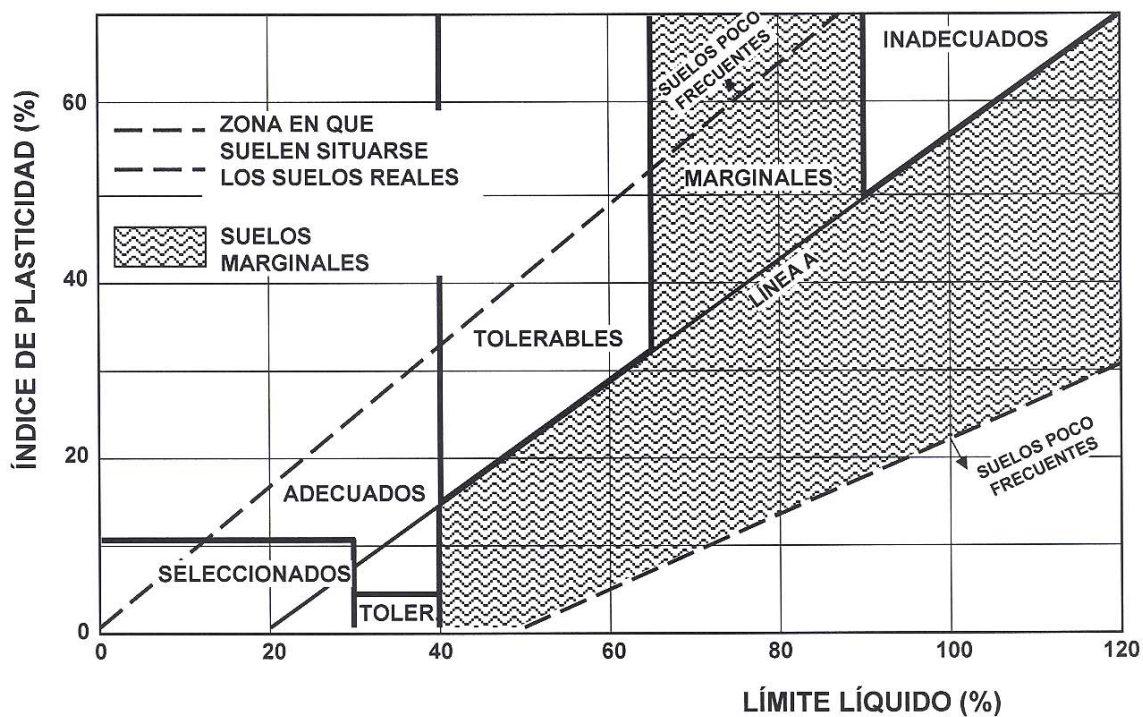


FIG. 1.- CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA TERRAPLENES SEGÚN LA O.C. 326/00 (NUEVO PG-3), TOMADO PARCIALMENTE DE SANTAMARÍA Y PARRILLA (2001).

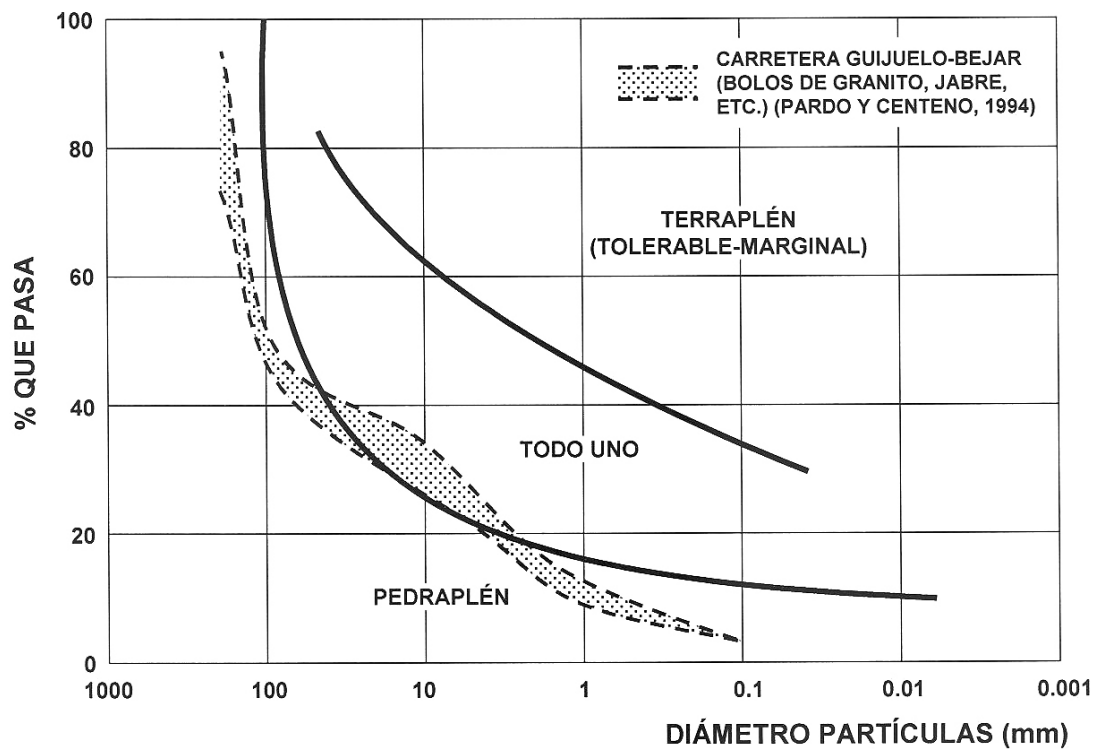


FIG. 2.- HUSOS GRANULOMÉTRICOS PARA TERRAPLENES, TODO UNO Y PEDRAPLENES, SEGÚN EL NUEVO PG-3.

Si se observa la Fig. 1 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, en el sentido de 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.

En esa figura se han dibujado dos líneas que vienen a limitar la situación de los suelos poco frecuentes (siguiendo a Jesús Santamaría, Congreso de Geotecnia Vial de Santander); pero, aún así, queda un amplio espectro de plasticidad que corresponde a suelos reales y, concretamente, muy corrientes en el panorama español: Los suelos más arcillosos de la Meseta Central se sitúan ahí, así como las arcillas volcánicas del Campo de Criptana y las de las Islas Canarias; las arcillas miocenas andaluzas se mueven entre la zona tolerable y la marginal (generalmente, por encima de la Línea A), etc.

Es decir, se ha adoptado 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 (cuyo alcance es limitado, como acabamos de indicar), y “limosos” de medio y alta plasticidad, por considerar que esa vieja denominación no se ajusta claramente a los suelos españoles.

En cualquier caso, la utilización de estos materiales marginales sólo está prevista, según el nuevo PG-3, en el núcleo de terraplenes, lo mismo que otros suelos cuyo índice de C.B.R. sea menor de 3, aunque siempre que se justifique 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 asientos 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.

Estas exigencias –que no son más que lo que se debería pedir a cualquier material, es decir: diseño y colocación adecuada para el uso deseado, coeficiente de seguridad y deformabilidad admisibles en el terraplén y evolución temporal no dañina– deben justificarse mediante los adecuados ensayos de laboratorio y campo, teniendo en cuenta que los de campo pueden representar mejor las disposiciones constructivas, el manejo del material, etc.

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 pedraplen. En la Fig. 2 se representan las granulometrías tipo de las tres clases de rellenos que ahora distingue el PG-3 y la de un material formado por bolos de granito y jabre (con el que se consiguió unos rellenos de comportamiento satisfactorio). Según el PG-3 antiguo era un material inadecuado (no por plasticidad sino por granulometría) de la zona del Sur de Salamanca y Norte de Cáceres y había que llevarlo a vertedero. Sin embargo, con un estudio adecuado, cuando el autor de estas páginas estaba en el CEDEX, conseguimos que fuera convenientemente utilizado (Pardo y Centeno, 1994). Este material ahora – con el nuevo PG-3 – podría utilizarse casi como “todo uno” y ni siquiera sería considerado como marginal, lo que le da unas posibilidades considerables, debidamente estudiado y tratado.

Respecto a los suelos colapsables cabe decir que el objetivo del Pliego es evitar el uso de estos materiales en coronación y espaldones, pero que podrían utilizarse en núcleo y cimiento con las debidas disposiciones y cuidados. Esto parece una contradicción del Pliego (si el material es marginal no puede usarse en cimiento), pero debe recordarse que algunos



materiales compactados pueden ser colapsables en función de su densidad y humedad: La “arena de miga” de la Meseta Central no es colapsable como terreno natural y se puede clasificar como adecuado (o, a veces, seleccionado), pero si se arranca de su lugar de origen y se compacta poco y del lado seco pasa a ser colapsable (con colapsos hasta del 5-6%, como demostró A. López Corral en su Tesis Doctoral, hace más de 20 años). En esas condiciones sería marginal. Lo que ocurre es que, si se cumple el apartado 330.4.2 del PG-3 (densidad seca mayor del 95% de la óptima Próctor Normal), ya no es, prácticamente, colapsable. Un material colapsable “in situ” típico es el limo yesífero, debido a que, al inundarse, se disuelven los enlaces de sulfato que ligan las partículas del suelo, con colapsos de hasta el 10 y el 12%. Sin embargo, ese material, arrancado de su lugar de origen y debidamente compactado (con “pata de cabra” y adición de agua) lleva a terraplenes aceptables (como lo hemos hecho con algunos tramos de la L.A.V. Madrid-Barcelona, sustituyendo zonas de riesgo de colapso por el mismo material pero debidamente desmenuzado y compactado).

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 cuál puede reproducirse con ensayos de hinchamiento libre en edómetro. No se pueden usar en coronación y espaldones para que no sufran 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.

Cuando aparecen los yesos las cosas se complican, por el miedo a la disolución y porque, generalmente, los yesos van unidos a arcillas expansivas. Por debajo del 2 % de yeso (del apartado 330.3.3.3 se deduce que este contenido se refiere a  $\text{SO}_4 \text{ Ca}$ , medido según la norma NLT-115), no hay que tomar prácticamente precauciones para usar ese suelo en el núcleo. Entre el 2 y 5% se puede usar en el núcleo, con adopción de cuidados especiales en coronación y espaldones. Entre el 5 y el 20% de yeso el terreno podrá usarse en el núcleo si se consigue una masa compacta e impermeable y se disponen medidas de drenaje e impermeabilización para impedir el acceso del agua al núcleo, siempre con la aprobación

específica del Director de las Obras. Con más del 20% el uso se limitará a aquellos casos en que no existan otros suelos disponibles y siempre que se justifique adecuadamente. En el ferrocarril de Pinto a San Martín de la Vega hemos realizado, ya hace cuatro años, pedraplenes de yeso, encapsulados, hasta de 20 m de altura, con resultado satisfactorio. El control de construcción no fue el usual y requirió la utilización de taladros y sondeos especiales para comprobar, “a posteriori”, la densidad alcanzada y su regularidad. Rodríguez Ortiz (1994) ha citado, ya hace años, otros ejemplos de terraplenes de este tipo. En otra comunicación a esta Jornada, el Prof. Soriano describe alguna experiencia concreta reciente en la autovía radial R-4 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.

Los materiales marginales con algo de materia orgánica (M.O. < 5%), podrán usarse en el núcleo de terraplenes de hasta 5 m de altura, siempre que se tengan en cuenta las deformaciones previsibles. En este caso, al ser parte de las partículas orgánicas y deformables, los asentos de peso propio pueden ser de 3-4% del espesor del terraplén y, además producirse lentamente al ir expulsando el agua que retiene la materia orgánica. En terraplenes más altos, sólo se pueden usar materiales con más del 2% de M.O. si se hace un 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.

Si se va a Estudios especiales, la Línea A -o cualquier convencionalismo clásico- no debería ser limitativa, ya que la escasez de materiales de calidad –y los problemas de impacto ambiental– nos hace volver la mirada hacia estos materiales “marginales” e, incluso, sobre los “inadecuados” (inadecuados ¿para qué?), siempre que cumplan las funciones que se le piden a un terraplén (resistencia, deformabilidad y perennidad).

Ello requiere un Estudio especial del material en sí mismo (ensayos de laboratorio), y 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, incluyendo su humedad y densidad, la necesidad, o no, de utilizar aditivos para corrección de propiedades, el sistema de arranque y transporte y la puesta en obra.
- Una selección del sistema de control, ya que el clásico ensayo Próctor sirve pocas veces como referencia en estos materiales. tan heterogéneos y poco convencionales.
- 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 – esto necesitará cierto consenso – todas las restricciones, aunque siempre con la condición de que se haga el adecuado y justificativo Estudio Especial.

#### 4. ALGUNAS OBRAS REALIZADAS CON MATERIALES MARGINALES.

A continuación se enumeran una serie de obras en que se han utilizado -desde principios de los años 90 hasta la actualidad- materiales “marginales” para obras viales (carreteras y autovías) o para rellenos de importantes obras de urbanización:

- 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 %), para conseguir un material bastante impermeable. (OTEO, 1994). Llegamos a seleccionar tras un estudio, el material por su coloración.
- 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 con rodillo de “pata de cabra” (OTEO, 1994).
- 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/m<sup>3</sup>), tratadas con cal (1,8-2,4 %), tanto en núcleo como en las zonas que le envuelven (DOMINGO y otros, 1998).
- Tramo I de la Autovía M-45 de Madrid: Se utilizaron las “arcillas” o “peñuelas” grises y “toscos”, en solución “sándwich”, alternadas con material adecuado de préstamos (SAHUQUILLO y otros, 2002).
- Zona de Valdemingomez: Se utilizaron “peñuelas” grises y marrones, expansivas, para terraplenes de acceso al Vertedero de Valdemingomez, en solución “sándwich” y encapsulada (SOLA y otros, 2002).
- P.A.U. de Vallecas: Aprovechamiento de “peñuelas” grises y marrones para terraplenes viarios, en solución encapsulada. (DE HITA, 2003).
- Variante de Cuenca: Arcillas margosas terciarias, grisáceas, de baja plasticidad. Se trataron con cal (2 %) en núcleo y espaldones. Informe no publicado. Estudios realizados por C. Oteo y J. Castanedo, que describe el Sr. Castanedo en una comunicación a esta Jornada.
- En Nuevos tramos de autovía en Tierra de Campos (Palencia), se ha estudiado la posibilidad de utilizar la formación arcillosa (de plasticidad media) “Tierra de Campos” tratada con cal (1,5-3 %), con buenos resultados. (Estudiada por C. Oteo, Tecopysa e Inzamac). Sin embargo no se usó esta solución por reparos de los supervisores al control de la ejecución.

- Variante de Cuellar: Se utilizaron arcillas blanquecinas y marrones tratadas con 5 % de cal en coronación y espaldones (MARTINEZ y otros, 1998).
- 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 (generalmente en coronación) en varios tramos. (ORTUÑO y RODRÍGUEZ, 2000). También se describe esta experiencia en las comunicaciones (Sr. Rodríguez).
- Radial R-3 de Madrid, utilizando peñuelas expansivas tratadas con cal.
- Radial R-4 de Madrid, usando las arcillas grises expansivas con cal, siguiendo nuestra experiencia en la M-45.

Más recientemente (últimos dos años) se han llevado a cabo otras experiencias que se describen en las comunicaciones (M-50 y Autovía Mudejar).

En los Tramos I y II de la M-45 de Madrid hemos seguido la metodología comentada en el capítulo anterior (diseño del terraplén, estudio de propiedades, etc). En el Tramo I con arcillas expansivas de tipo esmectítico, con poco o nada de yeso, de densidades secas del orden de 1,20 a 1,40 t/m<sup>3</sup>, y que entraban (muchas veces) en la zona superior a la Línea A de Casagrande (Fig. 3). En ese caso, se ha utilizado el criterio de compactar del lado húmedo, no utilizar aditivos y hacer un diseño tipo sándwich “armando” el terraplén con bandas de material adecuado.

En el Tramo II de la citada Autovía los materiales son arcillas sepiolíticas, niveles más puramente sepiolíticos, arcillas con yesos, yesos, etc. Las arcillas plásticas, con y sin niveles claramente sepiolíticos, se suelen situar bajo la Línea A de Casagrande (Figura 3), como ya hemos dicho, aunque no sean limos. Las densidades secas “in situ” de estos materiales varían entre 0,70 y 1,10 t/m<sup>3</sup>, con presiones de hinchamiento “in situ” de hasta 1,20 kp/cm<sup>2</sup> (si sufren pérdidas de humedad esta puede llegar a 4-5 Kp/cm<sup>2</sup>) y calificación de Lambe de “expansividad crítica” en los niveles sepiolíticos. El contenido de sulfatos llega al 0,5%.

Estas arcillas ligeras y expansivas, que tienen humedades “in situ” entre 21 y 49%, con límites líquidos entre 53 y 112, se han utilizado en terraplenes de 10 m de altura, de forma que en el cimientó y espaldones se añadiera un 2,4% de cal (respecto al peso total del material colocado), mientras que en el núcleo se ha utilizado con 1,8% de cal. La mezcla de la arcilla y cal se ha realizado durante el proceso de compactación con rodillo de “pata de cabra”, con adición paulatina de agua. Los ensayos de huella han dado valores inferiores a 5

mm a las 24 h e inferiores a 3 mm al cabo de 30 días. Los ensayos de placa de carga dan módulos del segundo ciclo de carga estática superiores a los 100 MPa en el núcleo y en el entorno a 200 MPa en espaldones (24 h).

En la misma obra también se han reutilizado materiales procedentes de vertedero, previa eliminación de restos de plásticos, chatarra, etc., con lo que se obtiene un material clasificable como “granular” y “adecuado”.

## **5. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE ALGUNOS MATERIALES MARGINALES**

En la Fig. 3 se ha representado la zona en que se agrupan las plasticidades de la mayor parte de los materiales de los ejemplos que se han enumerado en el apartado anterior.

Como se puede ver en dicha figura la plasticidad (posición del binomio límite líquido-índice de plasticidad) varía considerablemente en los ejemplos distinguidos: a) Hay varios que corresponden a materiales similares (“peñuelas” de Madrid y arcillas sepiolíticas), como son las “peñuelas” utilizadas en la M-45 I, las de Vallecas y las del tramo II de la M-45, ya que corresponden a materiales arcillosos del sur y sudeste de Madrid, en que el límite líquido varía entre 45-50 y 105-110, (con índice plástico entre 12-15 y 40-50, siempre por debajo de la Línea A de Casagrande) en los que los minerales esmectíticos que contienen cumplen su capacidad de retención de agua y les confieren baja densidad y carácter de “expansivos”. En algunos casos se llega a la zona de suelo inadecuado. b) Las arcillas de Valdemingomez, aunque próximas geográficamente a las anteriores, contienen algo más de carbonatos y sulfatos, lo que cambia su capacidad de retención de agua, llevando su límite líquido a variar tan sólo entre 60 y 80, situándose, casi siempre, por encima de la línea A. c) Las arcillas marrones, algo expansivas, del Parque Tecnológico de Málaga (Pardo y otros, 1994), son menos plásticas, con límite líquido entre 32 y 70, prácticamente por encima de la Línea A y variando entre suelo adecuado y marginal (por plasticidad; por las otras condiciones varía entre tolerable y marginal). d) Las arcillas típicas palentinas de la zona de Venta de Baños, un límite líquido entre 45 y 82, situadas algo por encima de la Línea A y, principalmente, por debajo de ella, e) Las arcillas azul-grisáceas miocenas del Valle del Guadalquivir (llamadas, poco afortunadamente “margas azules”) no están representadas en la figura pero quedan entre suelos tolerables y marginales.

En la Fig. 4 se han limitado unas zonas que relacionan el límite líquido y la granulometría habitual en los suelos distinguidos en el nuevo PG-3. En algún caso el PG-3 define el límite líquido de estas zonas (menor de 30 para los seleccionados, menor de 40 para los adecuados, etc). Sin embargo los límites granulométricos no están tan claros. Hemos definido unas fronteras a partir de nuestra propia experiencia y a partir de los datos de los ejemplos reales con los que se han realizado obras con comportamiento satisfactorio. Como puede verse en la Fig. 4 la zona de los suelos marginales se monta sobre la de los suelos tolerables (y no sólo en el límite líquido), mientras que la de los suelos inadecuados lo hace sobre la de los marginales. Viendo esta figura parece que la definición de estos grupos de materiales debe de hacerse de una forma algo diferente que la actual, ya que parece que las zonas deben de desarrollarse según un eje como el de la diagonal que se deduce del rectángulo ocupado por los suelos seleccionados (y que pase por el origen de coordenadas). Sin embargo, ahora puede haber suelos adecuados sin finos y con bastante plasticidad, lo que no suele ser muy lógico, quedando una zona con un porcentaje de finos medio (40-60 %) y con baja plasticidad que podría ser útil y, sin embargo, no está definida claramente como tolerable, cuando, a nuestro juicio, podría serlo.

Un parámetro muy interesante es el de densidad seca de los suelos marginales. Normalmente estos materiales son miocénicos o pliocénicos y suelen estar duros en sus formaciones naturales, aunque su densidad seca puede ser muy baja, dada la estructura y fábrica de su constitución (cadenas arcillosas con mucho hueco).

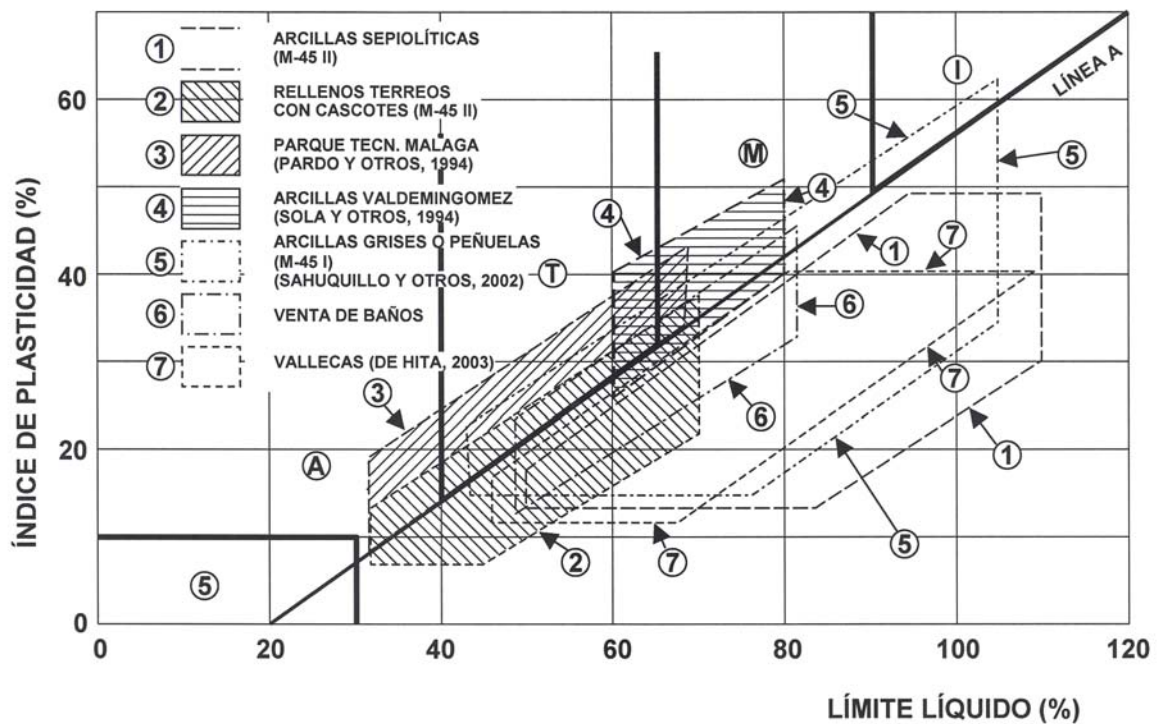


FIG. 3.- PLASTICIDAD DE ALGUNOS MATERIALES MARGINALES UTILIZADOS EN RELLENOS ESTRUCTURALES.

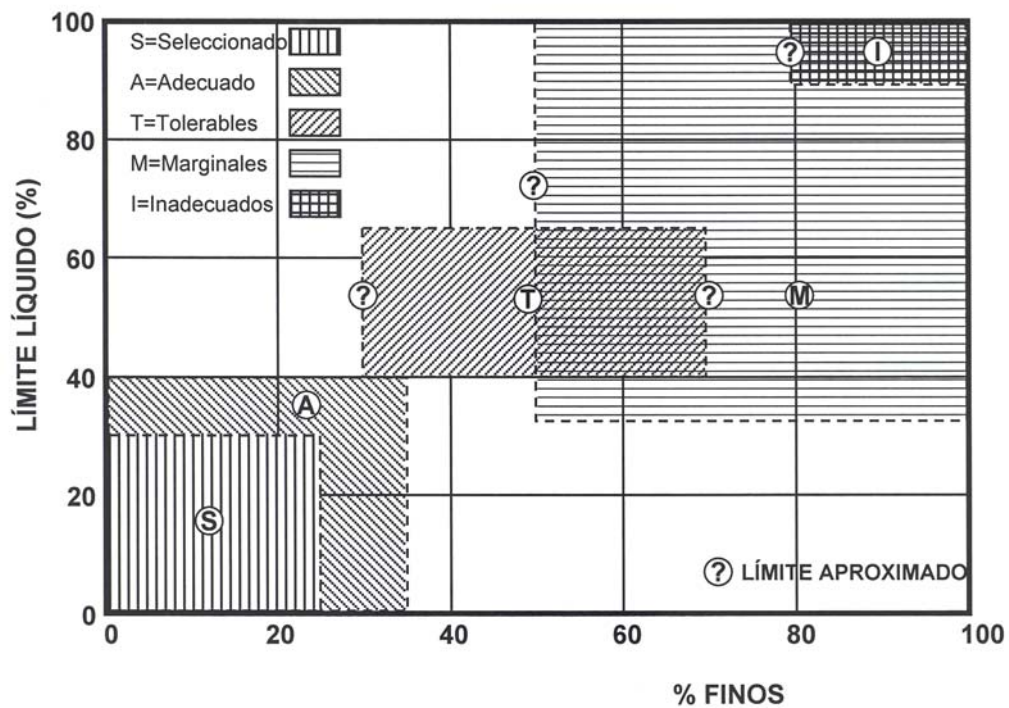


FIG. 4.- RELACIÓN ENTRE EL LÍMITE LÍQUIDO Y LA GRANULOMETRÍA HABITUAL EN LOS SUELOS DISTINGUIDOS EN EL NUEVO PG-3.



En la Fig. 5 se ha relacionado la densidad seca (utilizando el valor de la óptima del Proctor Normal, que suele ser muy similar a la natural) con el límite líquido en los materiales marginales de algunos rellenos estructurales realizados.

Puede verse en dicha Fig. 5 como hay un campo de variación muy amplio para dichos suelos: Densidades secas desde  $850 \text{ Kg/m}^3$  (arcillas sepiolíticas del sur de Madrid) hasta del orden de  $1.800 \text{ Kg/m}^3$  (Parque Tecnológico de Málaga), pasando por valores intermedios de  $1.200\text{-}1.400 \text{ Kg/m}^3$  en las arcillas de Valdemingomez (carretera de Valencia a 30-40 Km de Madrid) y de  $1.400\text{-}1.700 \text{ Kg/m}^3$  en las arcillas de expansividad media-alta palentinas y andaluzas.

En la Fig. 6 se ha pretendido establecer una relación de variación densidad seca (óptima P.N.) -límite líquido para todos los tipos de suelos distinguidos en el “nuevo” PG-3. Esta relación viene a indicar una disminución genérica del límite líquido con el aumento de la densidad seca, fenómeno ya conocido, pero que puede quedar cuantificado con las zonas distinguidas en esa figura. Nuevamente se superponen parcialmente las zonas correspondientes a los suelos tolerables y marginales, lo que indica (igual que en la Fig. 4) que hay que ser cuidadoso al calificar un suelo como de “marginal” y que no parece conveniente que se haga muestra a muestra, sino con un conjunto suficientemente representativo de ellas.

En la fig. 7 se ha dibujado un huso que representaría la variación  $W_o$ -  $\gamma_{do}$  (humedad-densidad seca óptimas P.N.) de los ejemplos citados, con su valor medio y dos extremos. En ella se marca claramente la disminución de la humedad óptima al aumentar la densidad seca óptima Proctor Normal, fenómeno ya conocido, pero lo que se muestra claramente en la Fig. 7 es la amplia variación de la humedad óptima para un cierto grado de densidad óptima. Por ejemplo, para suelos sepiolíticos (densidades secas del orden de  $1.000\text{-}1.100 \text{ Kg/m}^3$ ) la humedad óptima puede variar cuarenta puntos (entre 30-70 %); para suelos de consistencia mayor ( $\gamma_{do}$  entre  $1.400$  y  $1.600 \text{ Kg/m}^3$ , menos plásticos y que pueden estar ya en zona común con los tolerables) esa variación de humedad óptima puede cifrarse en 20 puntos (17 a 37 %).

Ello da idea de lo difícil -a nuestro juicio- y de lo inadecuado que resulta controlar estos suelos con el criterio clásico de que la densidad seca (después de compactar) sea una proporción de la óptima Proctor y que la humedad adecuada sea  $\pm (1\text{-}2)\%$  de la óptima del ensayo de compactación Proctor. Los materiales marginales son más heterogéneos (en una

misma situación geográfica) que los tolerables y adecuados, por la presencia de minerales esmectíticos, por su fisuración y disposición en bandas y estratos, etc, por lo que fijar unos valores  $W_o$ -  $\gamma_{do}$  de referencia es difícil y poco representativo.

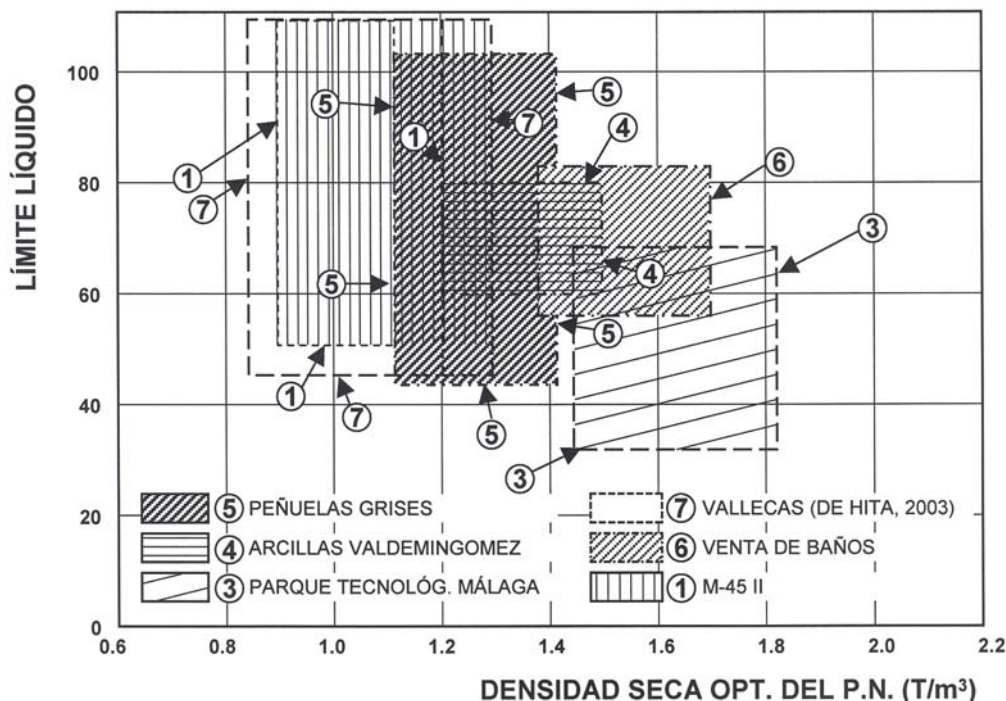


FIG. 5.- RELACIÓN ENTRE DENSIDAD SECA Y EL LÍMITE LÍQUIDO DE SUELOS MARGINALES UTILIZADOS EN ALGUNOS RELLENOS ESTRUCTURALES.

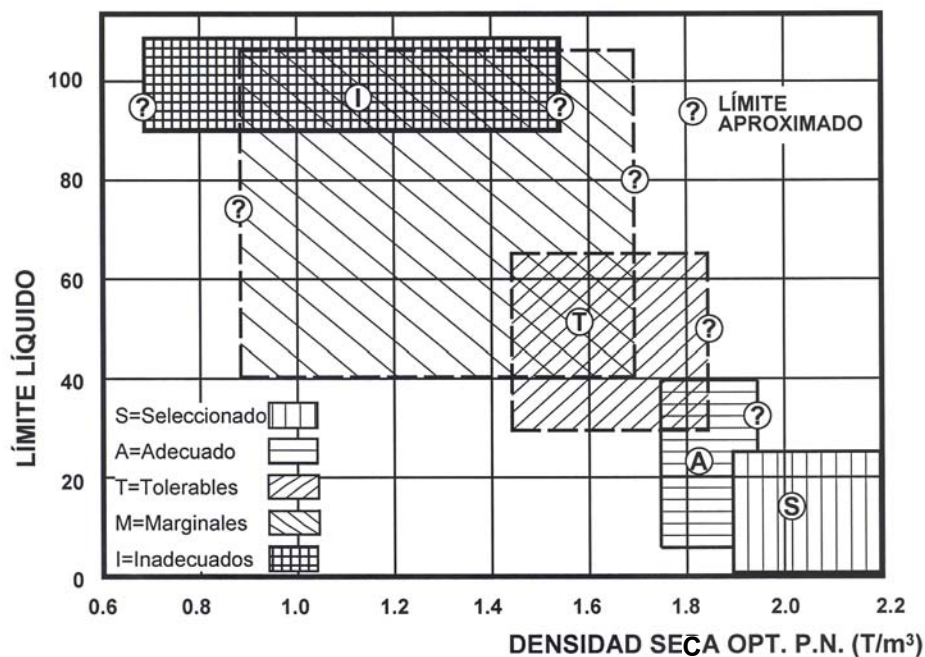
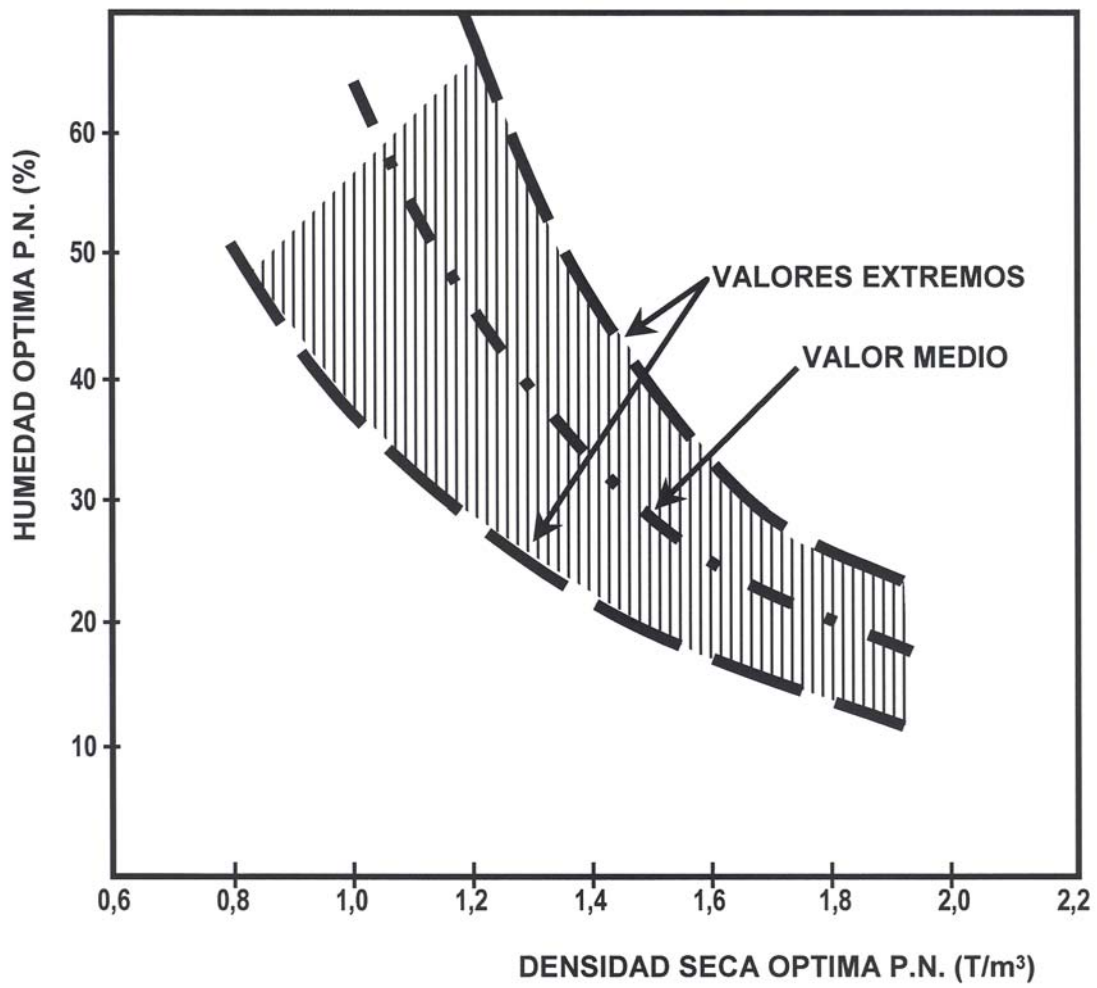


FIG. 6.- POSIBLE RELACIÓN ENTRE EL LÍMITE LÍQUIDO Y LA DENSIDAD SECA ÓPTIMA PROCTOR NORMAL EN LOS SUELOS DISTINGUIDOS EN EL NUEVO PG-3.



**FIG. 7.- RELACIÓN MEDIA ENTRE HUMEDAD Y DENSIDAD OPTIMAS, P.N., EN SUELOS MARGINALES.**

Para ello pueden ser más adecuados otros métodos. En la Fig. 8 se han indicado los métodos de control disponibles en la práctica (algunos de uso corriente y otros más excepcionales), así como el tipo de suelos (grava, arena, etc) en el que son más indicados. En nuestro caso de suelos marginales (en que estamos en tamaños predominantes tipo "limos y arcillas") resultan, teóricamente, válidos casi todos, en cuanto a la posibilidad de realización, no en cuanto a la representabilidad de resultados. A nuestro juicio, en el caso de suelos marginales resulta más conveniente el método del ensayo de la huella (norma suiza, contemplada en el PG-3 y con versión española NLT) y el de la placa de carga (que puede ser, normalmente, de Ø 30 cm), con dos ciclos de carga, exigiendo un valor mínimo al módulo en el segundo ciclo de carga,  $E_{v2}$ , y una relación de módulos,  $K$ , máxima entre el de segundo y primer ciclo ( $K = (E_{v2}/E_1)$ ). Más adelante comentaremos algo más sobre este parámetro  $K$  ( que en los trabajos más tradicionales y convencionales se cifra en 2,2).

## **6. REFUERZO CON CAL.**

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. De todas formas, en materiales con muy baja densidad seca óptima (900-1.200 Kg/m<sup>3</sup>) la estructura es tan abierta que la facilidad de tomar agua es grande, lo cual deja planteado, constantemente el problema de expansividad. Así se hizo en el Parque Tecnológico de Málaga y la Autovía de Tierra de Campos, pero es necesario señalar que se

trata de arcillas de expansividad media o medio-alta y cuya densidad seca óptima no es tan baja.

Además, no siempre se consiguen, por simple compactación, estructuras debidamente 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 (y/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 ambiental (cambios de humedad, erosión hídrica o eólica en espaldones, etc).

Esto puede conseguirse reforzando el terreno con un aglomerante o cementante como la cal (apagada, para evitar problemas de manejo que supone la cal viva, a pesar de que sus efectos sean más potentes). Existen experiencias muy antiguas de adición de cal a materiales arcillosos para aglomerarles o cementarles, que se remontan a bastantes siglos, aunque de forma más sistemática se lleva utilizando esta idea en carreteras varias décadas. En España es relativamente antigua la aplicación de la cal para “estabilizar” suelos arcillo-arenosos en caminos rurales, tratando un espesor pequeño de material (unos centímetros, entre 5 y 25 cm) ayudado de maquinaria con grada helicoidal, tipo “rotavator”.

Pero aquí no nos estamos refiriendo a conseguir una o dos tongadas de material mejorado o estabilizado, sino a reforzar el material en masa y utilizarlo en cimiento, espaldones, núcleo y coronación, de forma que se vaya más lejos de lo que el nuevo PG-3 comenta de sólo utilizar materiales marginales en el núcleo. Evidentemente, esa condición del PG-3 se refiere a un suelo marginal sin reforzar. El refuerzo supone la aparición de un nuevo material que se sale de lo especificado en el PG-3 y que, siendo estudiado debidamente, puede dar magníficos resultados.

El efecto cementante de la cal puede verse en laboratorio. En la fig. 9 se muestra un esquema de cómo, en general, en suelos arcillosos compactados, la resistencia máxima a 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 para mayores humedades. Por ejemplo, en la Fig. 10 se reproducen los resultados concretos

obtenidos por nosotros (en estudios realizados con Tecopysa e Inzamac para el proyecto de un tramo de autovía en Palencia, bajo la dirección de D. Pedro Escudero), utilizando como material básico las arcillas de la facies

TERRENO ENSAYO	ESCOLLERA	GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA
DENSIDAD ARENA					
DENSIDAD BALON					
DENSIDAD CON PLÁSTICO					
MÉTODO NUCLEAR					
PLACA Ø30 cm					
PLACA Ø72 cm					
ENSAYO HUELLA					
MÉTODOS GEOFÍSICOS					
PENETRÓMETROS					
PRESIÓMETROS					
CONTROL HUELLA Y PASADAS					

FIG. 8.- POSIBLES SISTEMAS DE CONTROL.

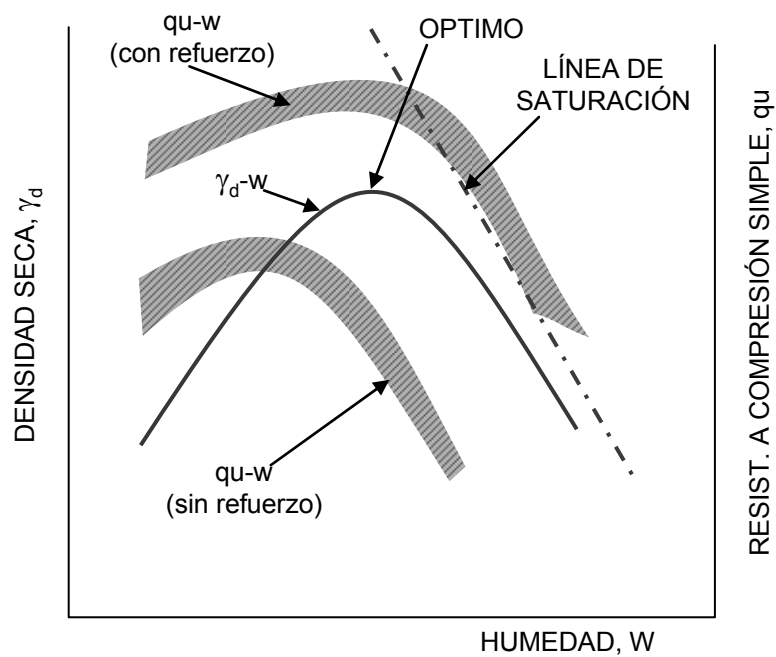


FIG. 9.- VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE CON Y SIN CAL.

“Tierra de Campos”. Concretamente, se fabricaron probetas de arcilla-cal (con diferentes proporciones de cal), amasándolas las probetas previamente y compactándolas en molde Harvard miniatura ( $\varnothing$  1,5 "). Posteriormente se rompían a compresión simple inmediatamente, cuando no tenían cal, o se curaban (en cámara húmeda, envueltas en plástico) durante varios días. Después se rompían a compresión simple.

En esa Fig. 10 se puede ver como la resistencia a compresión simple es del orden de 120 a 230 KPa sin refuerzo, (en función de la densidad seca óptima del Proctor Normal conseguida, entre 1.600 y 1.760 Kg/m<sup>3</sup>). Al añadir porcentajes diferentes de cal, se aumenta claramente la resistencia hasta una magnitud que puede ser del orden del doble a 1 día de curado, pero que puede ser casi de cuatro veces superior a 3 días de curado. La cantidad de cal en estos ensayos llegó hasta casi el 5 %, pero los resultados mejores se situaron entre el 1,5 y 3 %. El añadir más cal supone mayor costo pero no una mejora efectiva. Estas cifras suelen ser mayores en laboratorio que en el campo, ya que en laboratorio el mayor grado de desmenuzamiento que se alcanza supone un claro aumento de la superficie de adsorción de la arcilla. Por el contrario, en campo, al tener menos superficie de adsorción no es necesario llegar a valores del 3-5 % de cal.

También como resultado de laboratorio, se resumen en la Fig. 11 las resistencias a compresión simple obtenidas con muestras de las arcillas sepiolíticas de la M-45 II, y de otras peñuelas de Madrid sin cal (resistencia entre 120 y 350 KPa) y con cal (270 a 2.060 KPa).

En la Fig. 12 se presentan otros ensayos de laboratorio complementarios (ORTUÑO y RODRÍGUEZ, 2000) realizados con arcillas miocenas de la Autovía Jerez-Los Barrios ( $\gamma_{do}$  = 1.593 Kg/m<sup>3</sup>,  $W_o$  = 21,3 %, índice C.B.R. = 2,16 para 95 % del P. N.; límite líquido del 35 al 68 %, índice plástico del 10 al 30 %). Puede verse como el hinchamiento libre en edómetro disminuye fuertemente con el tiempo de curado, al ir haciendo efecto el efecto cementante.

Por último, en la fig. 13 se resumen diversos ensayos (de campo y laboratorio referido a la expansividad y el contenido de cal. En laboratorio (muestras machadas) se necesita más cal que en el campo para conseguir resultados análogos.



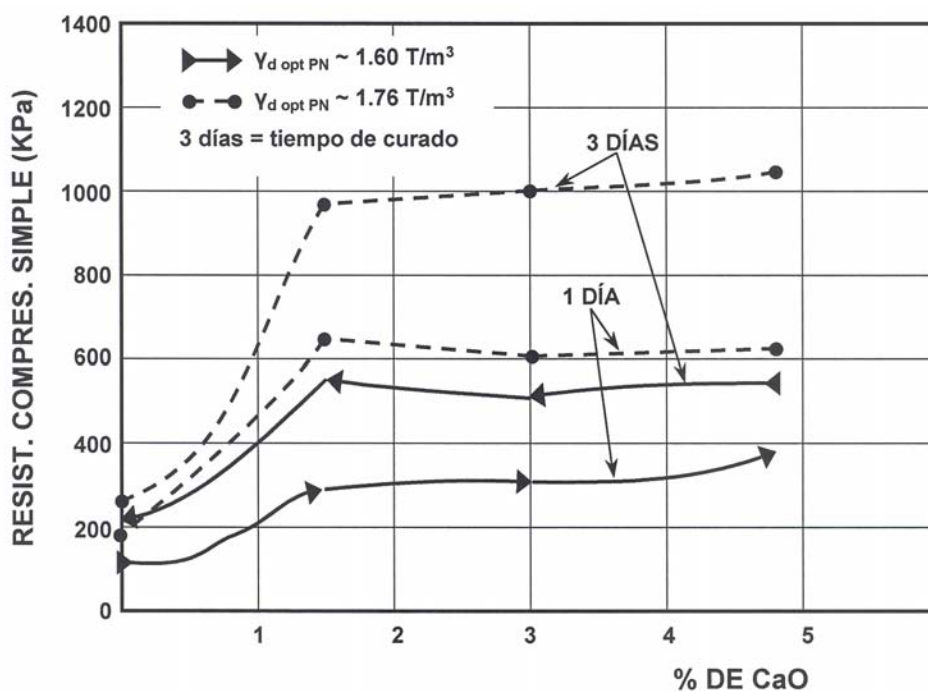


FIG. 10.- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE MUESTRAS DE LA FACIES “TIERRA DE CAMPOS” (PALENCIA), CON DIFERENTES PROPORCIONES DE CAL.

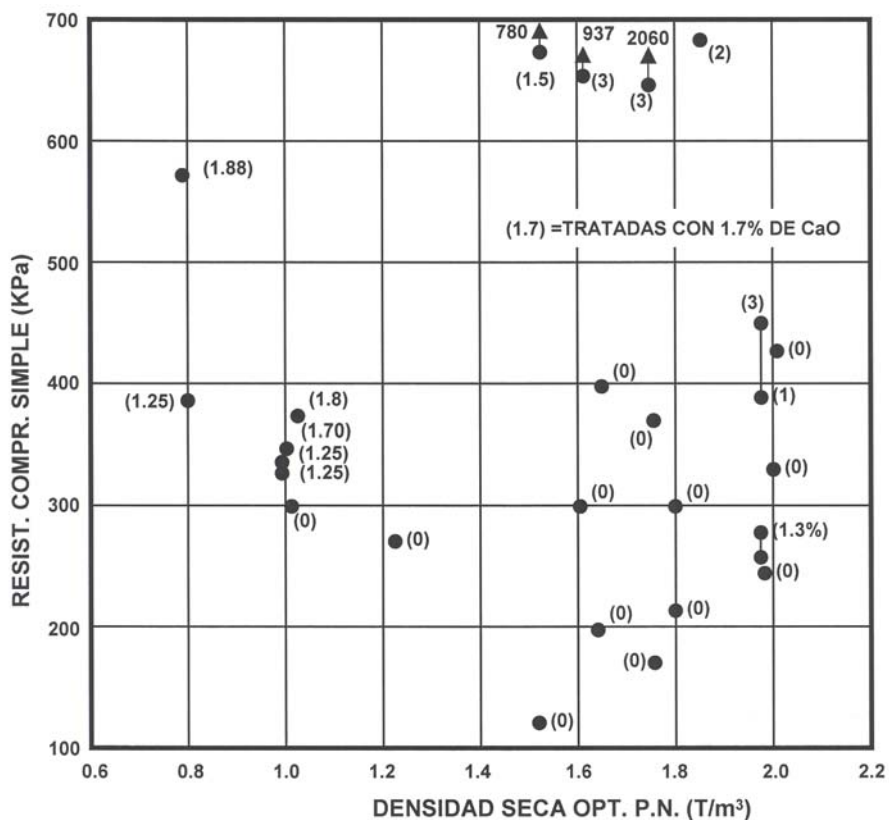


FIG 11.- RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD ÓPTIMA (P.N.), SIN TRATAR Y LA RELACIÓN A COMPRESIÓN SIMPLE (CON O SIN SAL).

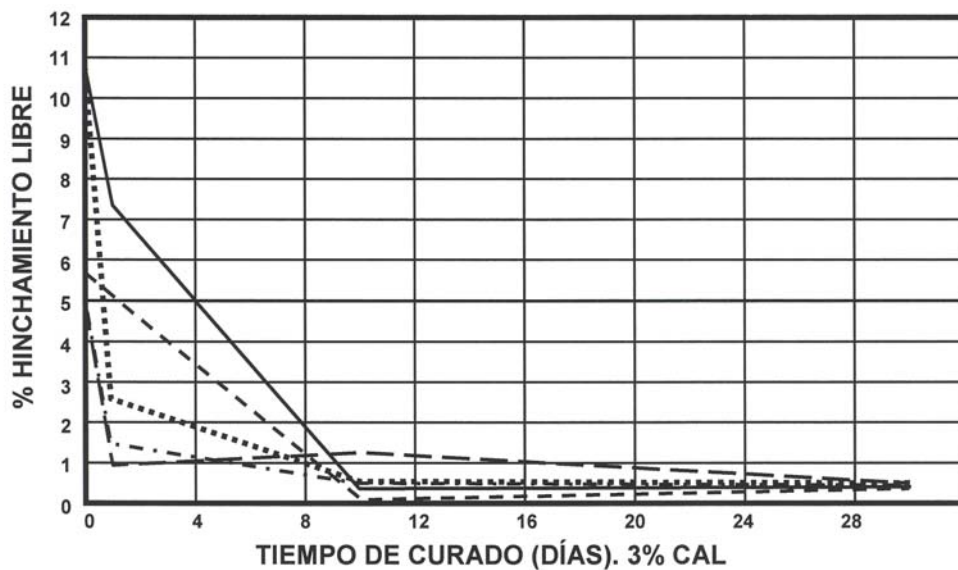


FIG. 12.- EVOLUCIÓN DEL HINCHAMIENTO LIBRE CON EL TIEMPO DE CURADO (3% DE CAL) (ORTUÑO Y RODRÍGUEZ, 2000).

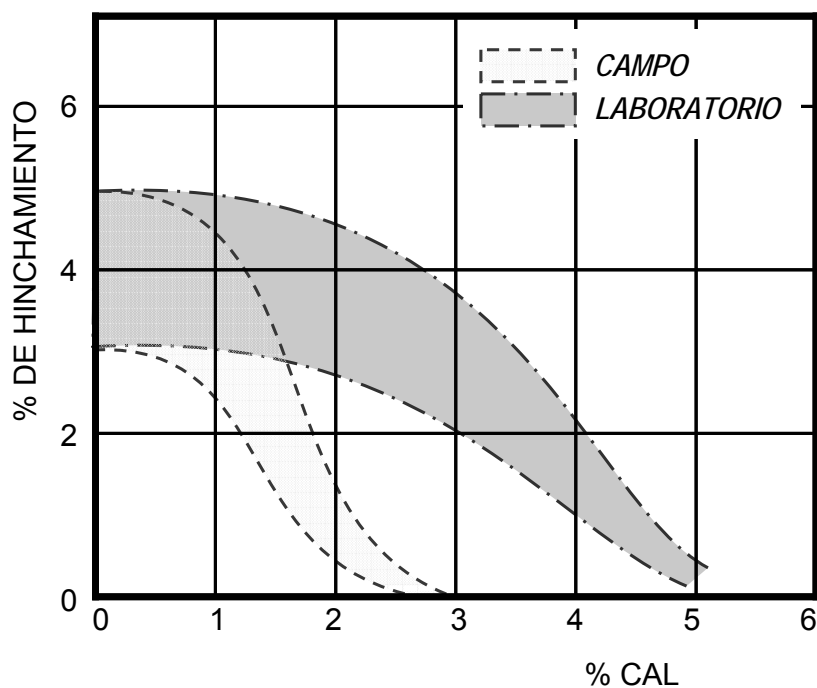


FIG. 13.- VARIACIÓN APROXIMADA DE LA EXPANSIVIDAD DE ARCILLAS SEPIOLÍTICAS CON EL CONTENIDO DE CAL.

## 7. PROCEDIMIENTO DE CAMPO PARA REFUERZO CON CAL.

En general, en campo, el control de un terraplén puede hacerse mediante uno de estos dos tipos de sistemas:

- De material colocado (el tradicional), en el que se ha definido una densidad y una humedad óptimas de referencia y en el que se controla que se alcancen valores mínimos (densidad) o intervalos previamente definidos (humedad), comprobando con métodos “in situ”, como “el nuclear”.
- De procedimiento, estableciendo previamente un sistema de ejecución (espesor de tongadas, tipo de maquinaria, tipo de material, adición de agua, número de pasadas, etc) que permite garantizar el resultado requerido (comprobado en terraplenes de ensayo previos), utilizando controles más adecuados para comprobar el resultado (placa de carga, huella, etc). La repetición de estos ensayos durante la ejecución del terraplén solo es ocasional, ya que el control se refiere, realmente, al procedimiento previamente tomado.

En el caso de suelos marginales plásticos, y más los tratados con cal, suele recurrirse al segundo procedimiento, dadas las variaciones ya señaladas de los parámetros de referencia Proctor.

Lo que debe fijarse es un material tratado con cal es lo siguiente:

- Establecer el grado de disgregación del material colocado (para definir tamaño máximo de bloques y espesor de tongada). Los tamaños máximos de bloques no deben ser superiores a unos 5-6 cm.
- Aportación de cal en polvo, en una proporción que suele variar entre 1.5 y 2.5% del peso seco del terreno, por encima de la tongada a reforzar.
- El agua a añadir, para que se permita la acción cementante de la cal junto con material arcilloso. En la M-45 II de Madrid, se añadían del orden de 8 l/m<sup>2</sup>. Se consigue así una estructura cementada y más insensible al agua.
- Esa cantidad de agua puede variar en función de la humedad inicial del terreno y de la situación climática. En la M-45 II la humedad inicial era muy baja y se aportaba agua durante todo el proceso de compactación, pero en verano se aumentaba la aportación en un 20-30 %.

- La maquinaria necesaria, tanto en el frente de extracción (palas con cadenas, para proceder a la fragmentación inicial), como en el de compactación (el rodillo de “pata de cabra” de más de 30 T parece lo más adecuado).
- El número de pasadas a realizar en el proceso de compactación, que suele variar entre 5 y 7 pasadas dobles.
- Necesidad de volteo para regularizar la capa de tongada de cara inferior a cara superior de tongada, a fin de conseguir una mezcla adecuada de la cal con la arcilla. A veces es importante repartir la cal en pasadas diferentes, sobre todo si hay fracciones arenosas (o de bloques) de presencia importante, que tienden a dificultar la mezcla.
- Espesor de tongadas, que debe ser tal que, teniendo en cuenta el grado de desmenuzación alcanzado y la cantidad de cal, se produzca una buena mezcla que permita desarrollar el efecto cementante. Usualmente no debe ser superior a 30 cm. En la M-45 II se realizaron con un espesor de 26 cm (ya compactado).
- Además debe fijarse el procedimiento de extracción y explotación del préstamo y la humedad de origen, que debe estar en el límite plástico más 2-3 %.

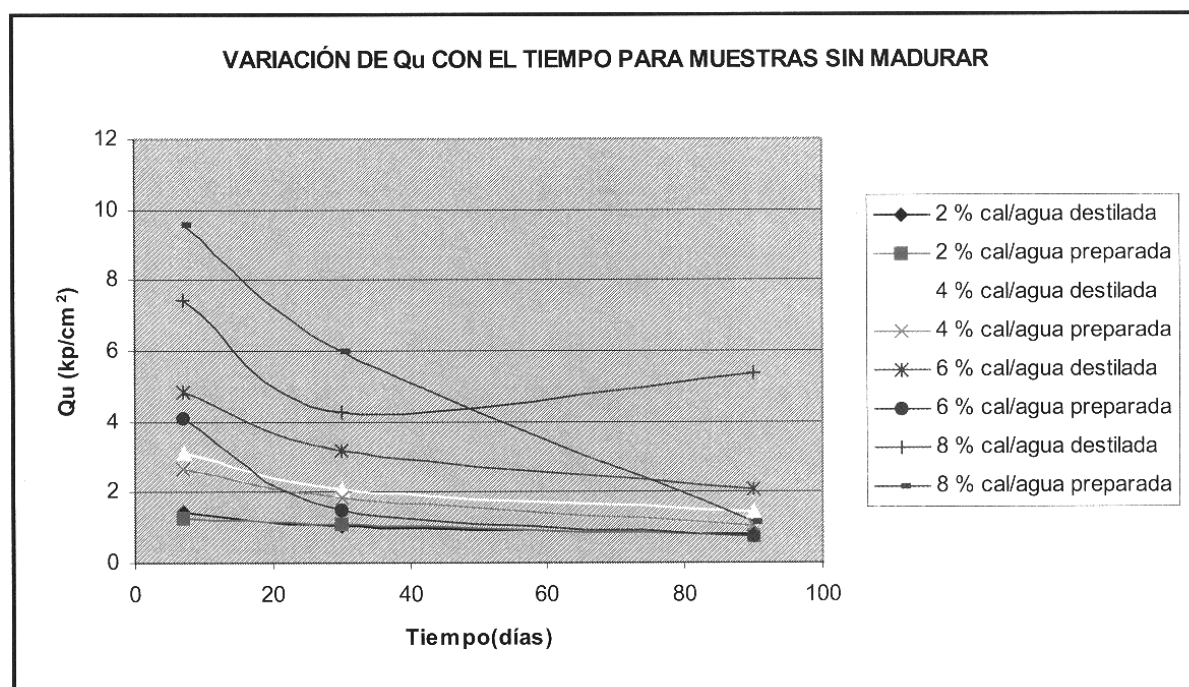
Con estas bases hemos obtenido magníficos resultados en materiales arcillosos de plasticidad media y de alta plasticidad de Madrid, Cuenca, Palencia, etc, y en las arcillas sepiolíticas de baja densidad del sudeste de Madrid.

No debe permitirse que el material a tratar tenga un alto contenido de sulfatos, a fin de que su mezcla con la cal no conduzca a la formación de etringita, que es expansiva. Suele limitarse la presencia de sulfatos a un 4-5 %, lo que no quiere decir que no podrían usarse estas arcillas con sulfatos en un terraplén con disposición tipo sándwich, separando las zonas con cal de las zonas con sulfatos.

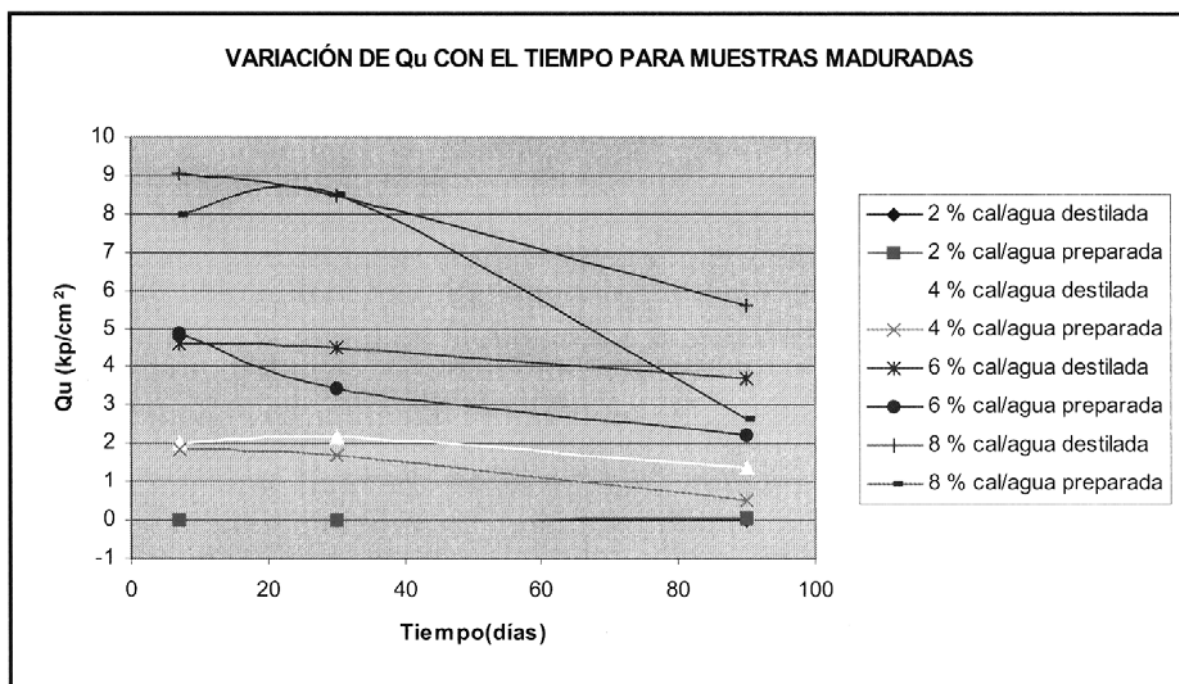
En la Tesis Doctoral de D. Rafael Pérez Arenas, dirigida por el autor de estas páginas, se estudia entre otros aspectos, el efecto de la presencia de agua con sulfatos en suelos arcillosos miocenos andaluces tratados con cal. En la fig 14 puede verse la variación de la resistencia a compresión simple, con el tiempo, en probetas con diferentes contenidos de cal y agua destilada y preparada (con 1.9% de  $\text{SO}_3$ ). Al sumergir el suelo en agua saturada en sulfatos la caída de resistencia es apreciable en la rotura a 90 días; ésta disminución puede deberse, por un lado al curado bajo agua mantenida a una temperatura entre 8 y 10° y, además, al efecto de los sulfatos, con formación de etringita; parece, según estos

resultados, que con porcentajes de cal inferiores al 4% puede garantizarse unas condiciones de estabilidad de la muestra respecto al ataque de los sulfatos. En el caso de muestras maduradas en el que la adición de cal y de agua se hace en dos fases, dejando madurar en cámara húmeda 7 días entre ambas) la variación de resistencia a compresión simple es la de la fig. 15 de la que se deduce que el efecto de la maduración es variable, dependiendo del contenido de cal (es desfavorable para menos del 3% y favorable para mas del 5%); no parece que el efecto de la maduración tenga ventajas frente a la acción de aguas sulfatadas.

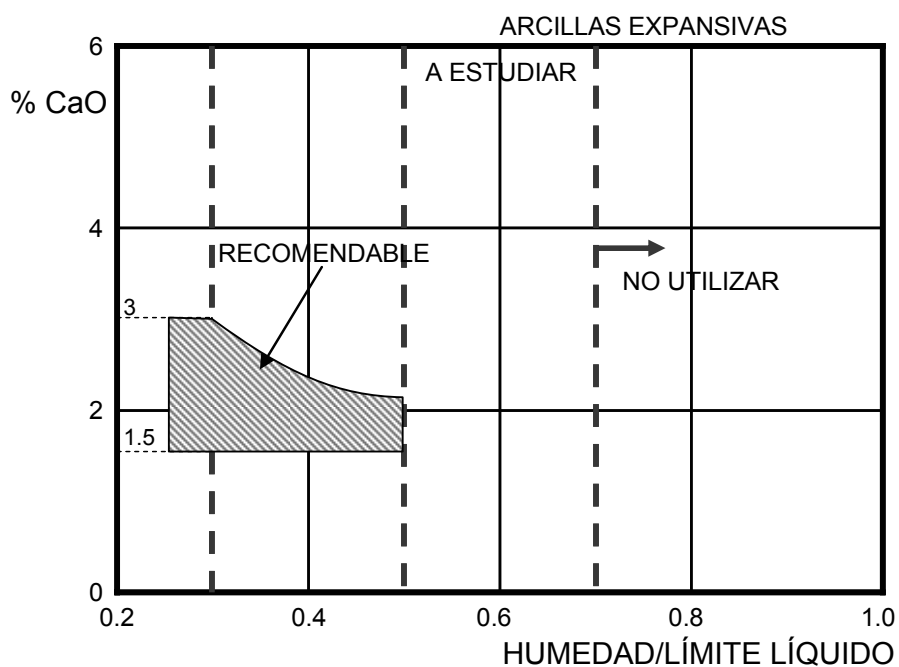
Las cantidades de cal que hemos utilizado en obras con suelos claramente arcillosos varia entre 1,6 y 2,4 % (peso seco), disponiendo, generalmente, la mayor proporción en cimienton, espaldones y coronación y la menor en núcleo, para conseguir, así, el encapsulamiento del material del núcleo, reducir su expansividad (fig. 16) y una protección adicional contra la erosión en espaldones. En función del tipo de coronación obtenida se puede disminuir el espesor de rellenos seleccionados en el firme. En suelos arenosos con mucha humedad, puede usarse el refuerzo de cal para compensar ese exceso de agua, con mayores proporciones (fig. 17 y 18, como hemos podido comprobar en la L.A.V. Segovia-Valladolid)



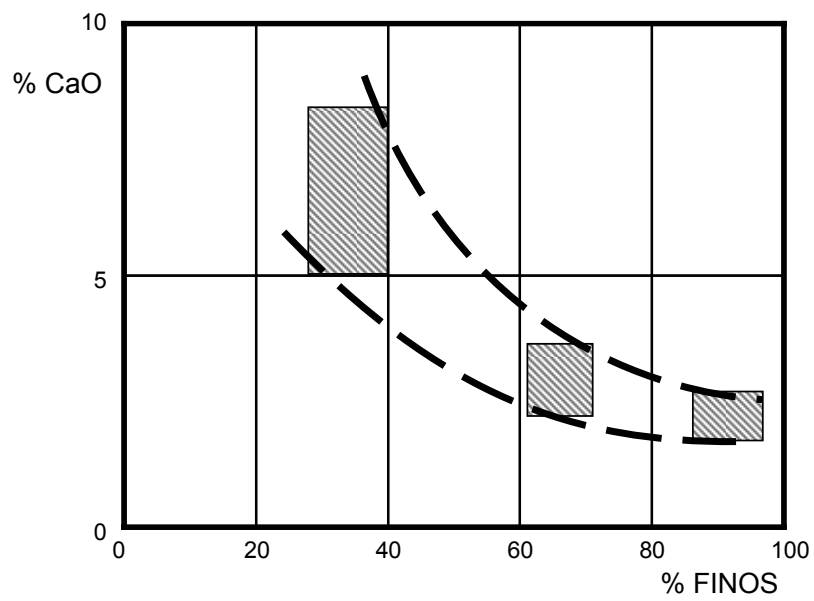
**FIG. 14.- VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON EL TIEMPO PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE CAL Y CON MEZCLAS SIN MADURACIÓN (PÉREZ ARENAS, 2007)**



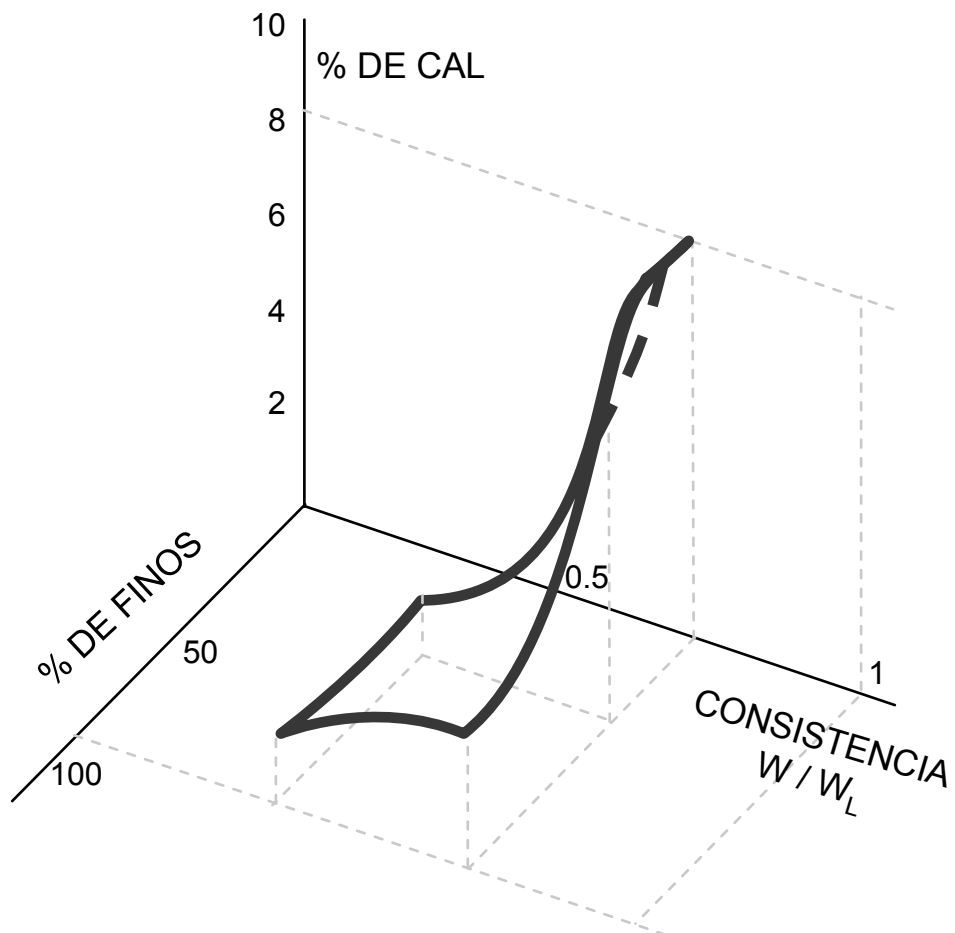
**FIG. 15.- VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON EL TIEMPO PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE CAL Y CON MEZCLAS CON MADURACIÓN (PÉREZ ARENAS, 2007)**



**FIG. 16.- POSIBILIDADES DE TRATAMIENTO CON CAL EN ARCILLAS.**



**FIG. 17.- POSIBLE PROPORCIÓN DE CAL A UTILIZAR EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE FINOS.**



**FIG. 18.- SUPERFICIE DE ESTADO FINOS-CONSISTENCIA-REFUERZO CON CAL.**

En zonas de desmante en estos materiales marginales plásticos también debe de adoptarse la precaución de reforzar el fondo del desmante (con 2 ó 3 tongadas de suelo con cal) para conseguir la impermeabilización de la explanada, medida que debe aumentarse con zanjas laterales (y en mediana, con unos 3-4 m de profundidad) para alejar el agua del terreno natural.

En la Tabla 1 adjunta pueden verse los resultados obtenidos, en la M-45 II, con ensayos de placa de carga y huella, para dos proporciones de cal probadas en obra real, realizados 1 y 7 días después de ejecutar los terraplenes con cal. Como se aprecia en esa Tabla los módulos del segundo ciclo de carga son superiores a 170 MPa, después de 24 h de compactar, pero con relación K ( $E_{v2}/E_{v1}$ ) muy altas (4,5-6,9) para lo que suele exigirse tradicionalmente (2,2). Seis días después, los módulos  $E_{v2}$  son algo superiores o similares, pero los valores de  $E_{v1}$  han subido claramente, por lo que los de K varían algo (4-6) . Los ensayos de huella fueron ya satisfactorios a las 24 horas (2,3-3,4 mm) y variaron entre 1,9 y 3,0 mm a los 7 días. En algún ensayo realizado al mes de compactar, la huella obtenida varió entre 1,5 y 2,0 mm, magnífico resultado.

TABLA 1.- ENSAYOS "IN SITU" DE ARCILLAS SEPIOLITICAS TRATADAS CON CAL (M 45-II)

% CAL	A 24 HORAS			HUELLA (mm.)	A 7 DÍAS			
	$E_{v1}$ (Mpa)	$E_{v2}$ (Mpa)	K(*)		$E_{v1}$ (Mpa)	$E_{v2}$ (Mpa)	K	HUELLA (mm.)
2,4	30,8	214,3	6,9	3,2	37,27	222,2	5,96	2,9
	27,1	176,5	6,5	3,4	58,25	260,9	4,48	3,1
	31,1	200,0	6,4		...	...	...	...
4,0	42,9	193,5	4,5	2,2	45,1	180,0	4,0	2,0
	41,4	187,5	4,5	2,3	40,9	180,0	4,4	1,9
	28,8	171,4	4,5		...	...	...	...

\*  $K = E_{v2} / E_{v1}$



En la Fig. 19 se ha representado la distribución del módulo de deformación  $E_{v2}$  obtenido en estas arcillas sepiolíticas con cal (1,6 % mínimo; 2,4 % máximo), a unos 7 días después de la compactación. Como se deduce de esa figura un 70 % de los ensayos dieron más de 200 MPa, llegándose a valores de hasta más de 300 MPa (15 % de ensayos). Los valores más bajos corresponden al intervalo 100-150 MPa y son sólo un 10 % de los resultados totales. Es decir, se obtienen módulos muy superiores a los que se obtienen en terraplenes de suelos normales (tolerables y adecuados). Estos límites que suelen exigirse para núcleo y coronación son 35 y 60 MPa, habitualmente (Fig. 20), lo que da idea de lo muy por encima de lo normal que pueden quedar los terraplenes de arcillas expansivas con cal.

En esa misma Fig. 19 se han representado las áreas que ocupan los puntos  $E_{v2}$ -K. Como se aprecia en esa figura en las obras citadas -y realizadas satisfactoriamente- las zonas representativas de las obras reales no están dentro del margen definidos por los requisitos tradicionales ( $K < 2,2$ ). En el caso del Parque Tecnológico de Málaga se viene a cumplir dichos requisitos (dado que es un núcleo de relleno y que el módulo  $E_{v2}$  está entre 26 y 40 MPa y que K varía entre 1,9 y 2,5), aunque un poco justo. En la M-45 I se cumple la condición de  $E_{v2}$  pero no siempre la del valor K traccional (2,2); lo mismo ocurre con las “peñuelas” de Vallecas y el granito alterado y residual de Salamanca. Pero las arcillas sepiolíticas, tratadas con cal, tanto para el núcleo como para coronación y espaldones, de la M-45 II no cumplen, en absoluto, estos criterios tradicionales. Sin embargo el resultado obtenido ha sido bueno. Esto se debe, seguramente, a que la exigencia tradicional quedó definida por: a) La experiencia obtenida con materiales “nobles”. b) Estos límites (sobre todo el del valor máximo de K) fueron establecidos hace muchos años (más de 20) y en función de materiales suizos, principalmente. No se habían utilizado, entonces, materiales marginales ni se referían a los reforzados con aglomerantes. A nuestro juicio -y así lo llevamos haciendo varios años- debería reconsiderarse el criterio tradicional y transformarlo en otro que tenga en cuenta valores límites diferentes de K (mayores) al aumentar  $E_{v2}$ , tal y como se propone en la Fig. 21.

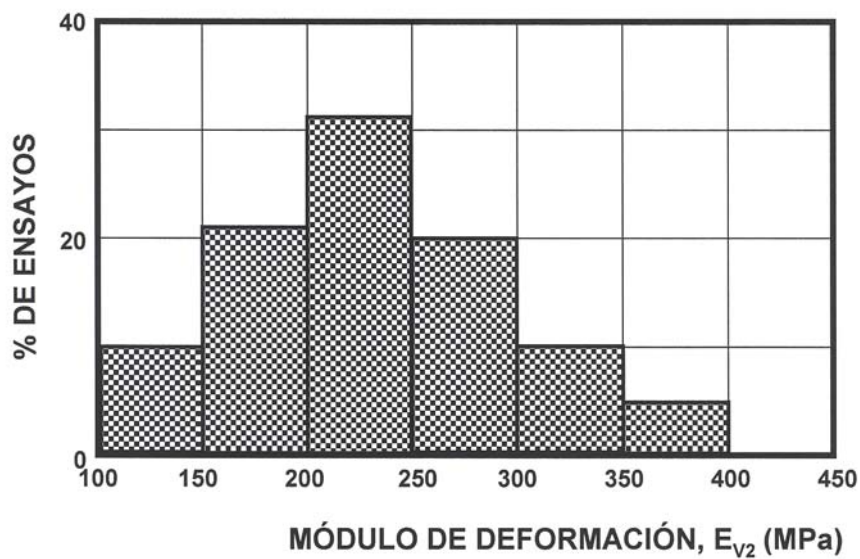


FIG. 19.- DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DEL MÓDULO  $E_{v2}$  EN LOS ENSAYOS DE ARCILLAS SEPIOLÍTICAS TRATADAS CON CAL DE M-45 II (DOMINGO Y OTROS, 2000).

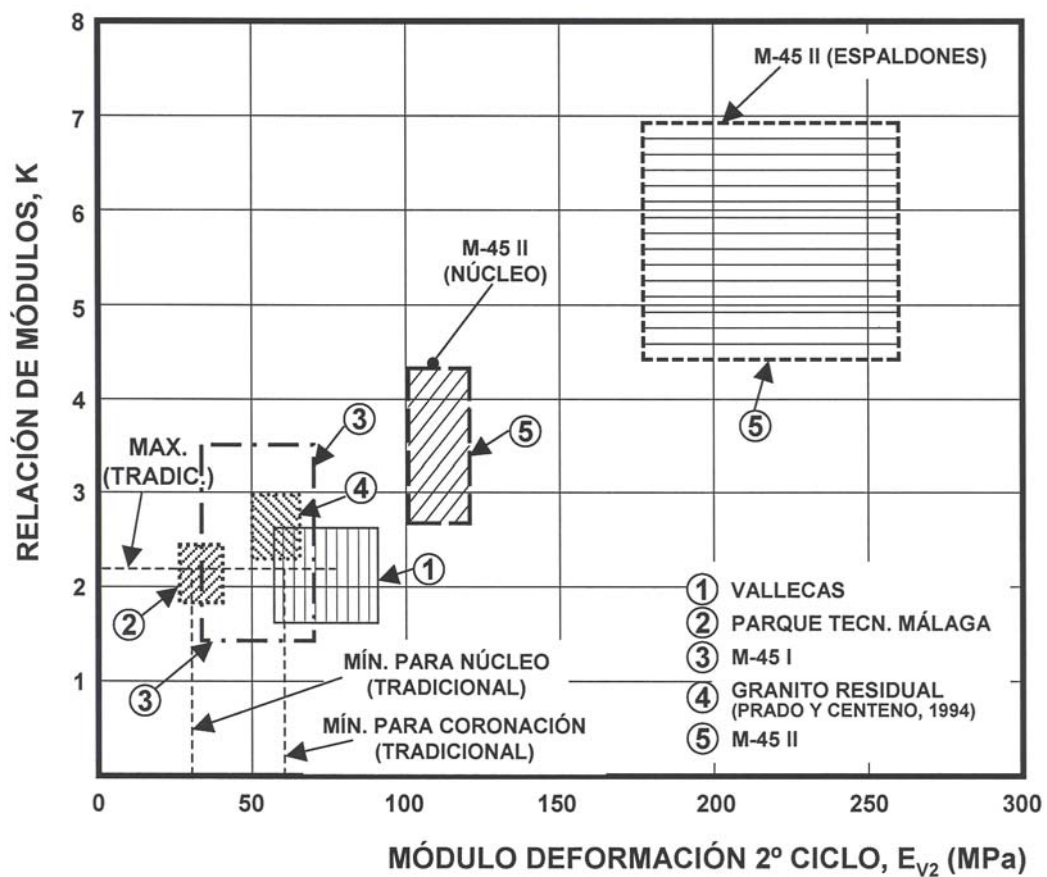
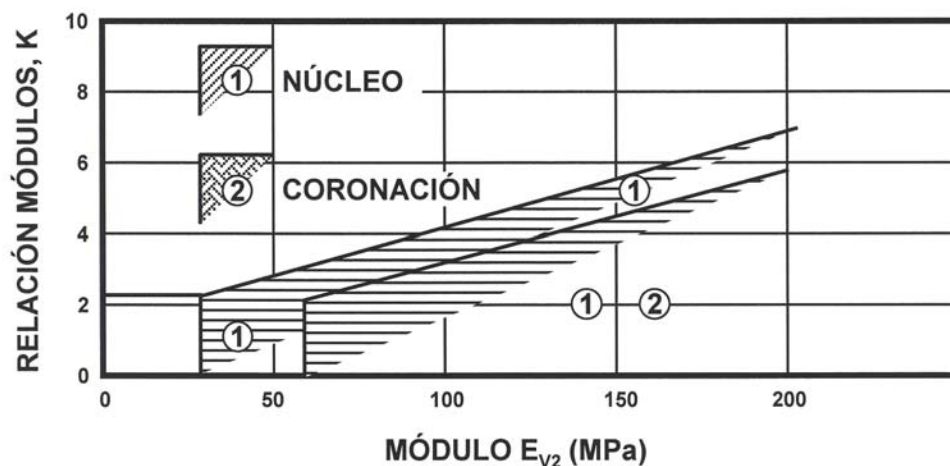


FIG. 20.- COMPARACIÓN DE CRITERIOS TRADICIONALES PARA ACEPTACIÓN CON PLACA DE CARGA Y RESULTADOS EN OBRAS CON MATERIALES MARGINALES.

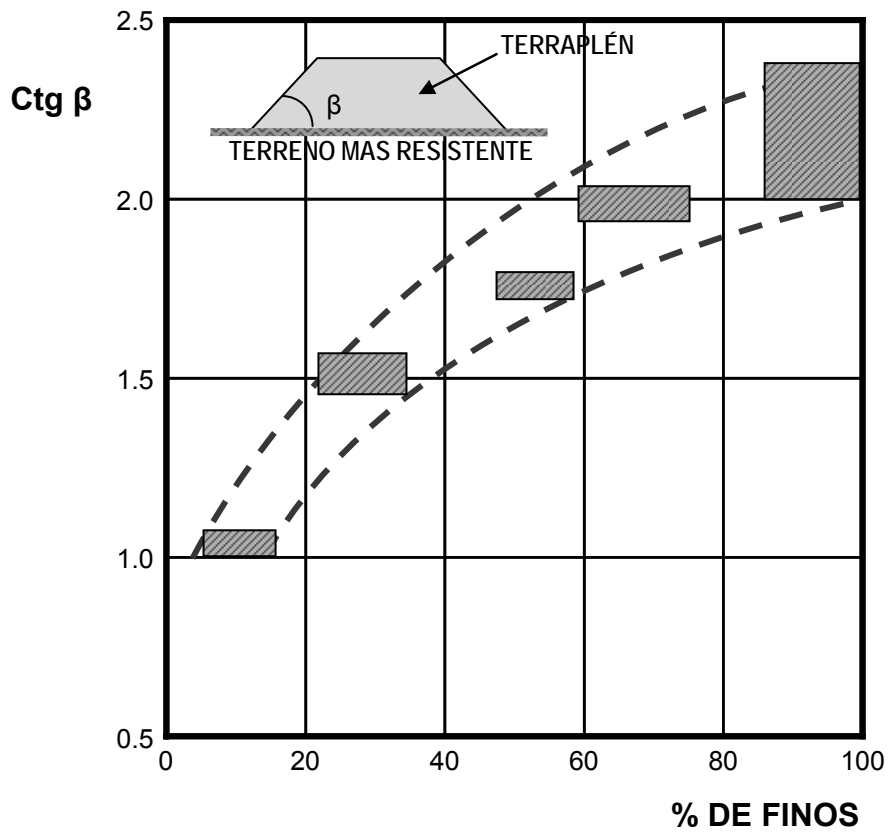


**FIG. 21.- NUEVA PROPUESTA DE ACEPTACIÓN DE MATERIALES COMPACTADOS.**

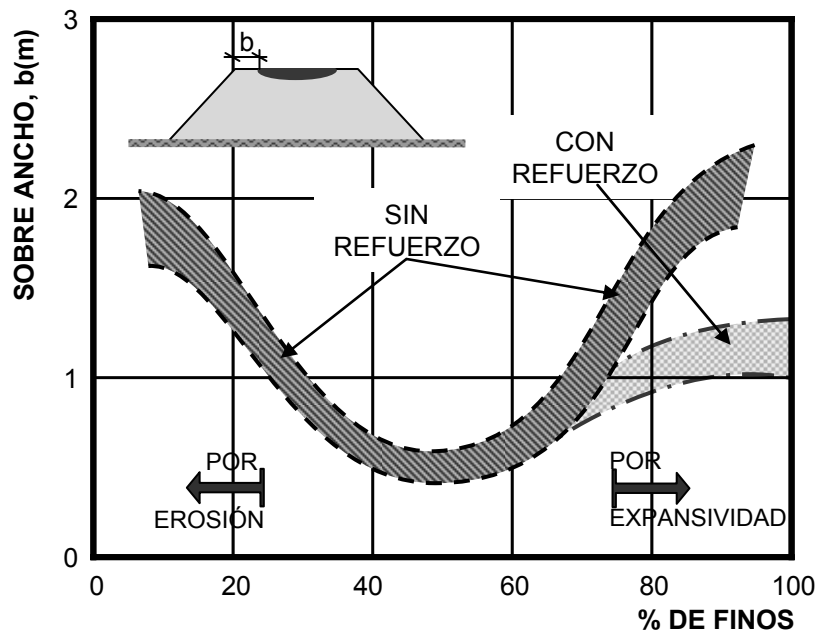
Estos procedimientos de colocación del material y control del producto deben completarse con diversas recomendaciones, como:

- Inclinação del talud del terraplén, tanto por el material como por la conveniencia de compactar bien los espaldones (ver fig. 22).
- Sobreancho del terraplén, a fin de limitar la erosión o los efectos de la retracción en los espaldones (fig. 23).
- La cantidad de agua añadida depende del material, tipo de tratamiento y temperatura ambiental (fig. 24).

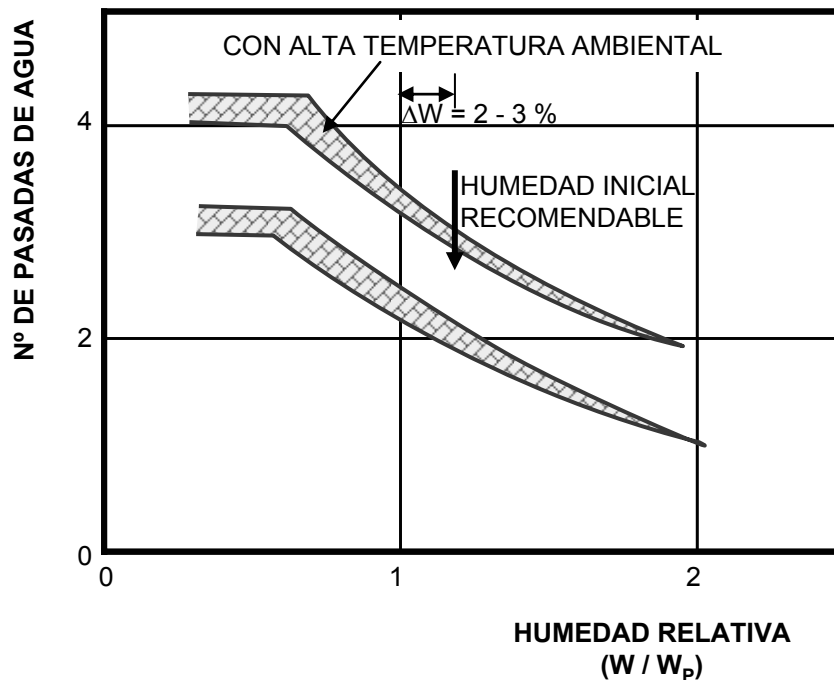
Más detalles sobre terraplenes arcillosos reforzados con cal pueden verse en DOMINGO y otros (2000), MARTÍNEZ y otros (1998), ORTUÑO y RODRÍGUEZ (2000), OTEO y otros (2001), etc. En cuanto a la estabilización con cal de suelos (para cimientos de terraplenes o para coronaciones y subbases) puede consultarse a MONCHON y otros (2003), SAMPEDRO (2003), o el Pliego de Prescripciones técnicas de GIASA (SALAS y otros, 2003). Esta técnica de estabilización, generalmente realizada con rotavator, no es exactamente la misma que aquí se ha descrito, pero también puede ser útil. En ella se emplea, a veces, el método del pH, a fin de comprobar que el producto estabilizado tiene un elevado pH que permita el desarrollo de reacciones puzolánicas; de ello se deduce que el porcentaje óptimo de cal sería el que mantiene un PH del orden de 12,4 (SAMPEDRO, 2003). Ello suele conducir a porcentajes de cal mayores que los que aquí hemos comentado, pero es lógico al ser la idea y el propósito algo diferente que la del refuerzo con cal. En la Autovía Jerez-Los Barrios, tramos IV y V (SIERRA y otros, 2003) se han



**FIG. 22.- TALUD DEL TERRAPLÉN.**



**FIG. 23.- SOBREENCHO DEL TERRENO.**



**FIG. 24.- APORTACIÓN DE AGUA RECOMENDABLE.**

estabilizado “in situ” con cal, cinco millones de metros cúbicos, utilizando extendedora y estabilizadora con rotor para mezclar, romper y escarificar el material, procedimiento diferente al aquí comentado en el que se mezcla la cal con la arcilla con el “pata de cabra”, al mismo tiempo que se compacta.

## **8. ALGUNAS SECCIONES UTILIZADAS EN OBRAS REALES**

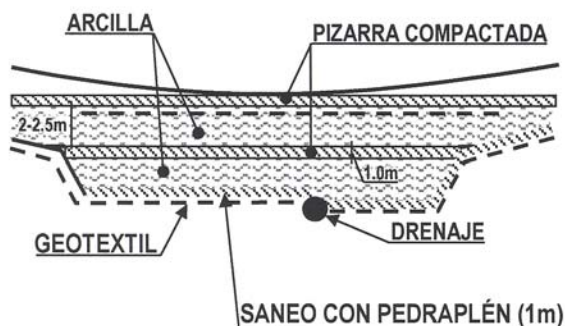
Como ya se ha indicado con anterioridad, se han venido utilizando soluciones diferentes, en función de la naturaleza del material, de las condiciones de obra y climáticas, la finalidad del relleno, etc.

Por ejemplo, en la Fig. 25 se muestra la estructura en sándwich de los rellenos estructurales realizados para el Parque Tecnológico de Andalucía (Málaga), en que una arcilla, de plasticidad y expansividad media-alta, se alterna con pizarras compactadas y con un cimiento saneado con pedraplen. Sin embargo la solución de la Fig. 26, anterior en algunos años (hacia 1988), utilizó arcillas expansivas palentinas en la Variante de Venta de Baños, con solución encapsulada, recubriendo la arcilla (compactada, del lado húmedo, con rodillo de “pata de cabra”, después de desmenuzar la arcilla con gradas y/o con un D-11 de

cadenas), con una zahorra compactada (con finos del 30-40 %, para que fuera bastante impermeable). En esta ocasión no nos atrevimos a utilizar todas las arcillas expansiva disponibles y se llevaron a vertederos las de coloración correspondiente a mayor plasticidad e hinchamiento C.B.R.

Las Figs. 27 a 29 muestran otras variantes sobre la utilización de materiales marginales:

- La Fig. 27 corresponde a la M-45 I en que se utiliza la solución sándwich con “peñuelas” grises en el núcleo (con alta plasticidad y densidad seca óptima P.N. del orden de  $1,2-1,45 \text{ T/m}^3$ ) alternadas con un material de préstamo no expansivo e impermeable (tipo toско-toско arenoso de Madrid).
- La Fig. 28 muestra la solución del tramo II de la M-45 de Madrid: Núcleo de arcilla sepiolítica (de baja densidad seca óptima  $0,85-1,05 \text{ T/m}^3$ ) y alto límite líquido, hasta 110) tratado con 1,8 % de cal, más cemento con 2,4 % de cal. Se llega así, a una solución encapsulada con el propio material marginal-inadecuado, variando las proporciones del aglomerante añadido.
- La Fig. 29 muestra otra opción intermedia, propuesta para autovías en “Tierra de campos”: Sándwich de arcilla reforzada con cal en coronación y espaldones y en el núcleo, con espesores pequeños (1 m), alternada con la misma arcillas sin tratar. El cemento se haría con escollera de caliza ya que el apoyo suele estar húmedo y blando. La explanada podría ser el material tratado con algo más de cal o un material adecuado. En este caso la densidad seca media era del orden de  $1,50-1,65 \text{ T/m}^3$ .



**FIG. 25.- RELLENOS CON SISTEMA MULTICAPA. PARQUE TECNOLÓGICO DE ANDALUCÍA (PARDO Y OTROS, 1994).**

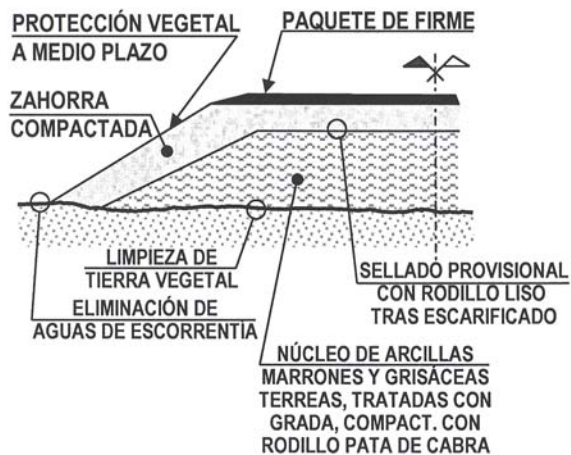


FIG. 26.- CONDICIONES PARA EL DISEÑO DE TERRAPLENES CON ARCILLA EN LA VARIANTE DE VENTA DE BAÑOS. (OTEO, 1994).

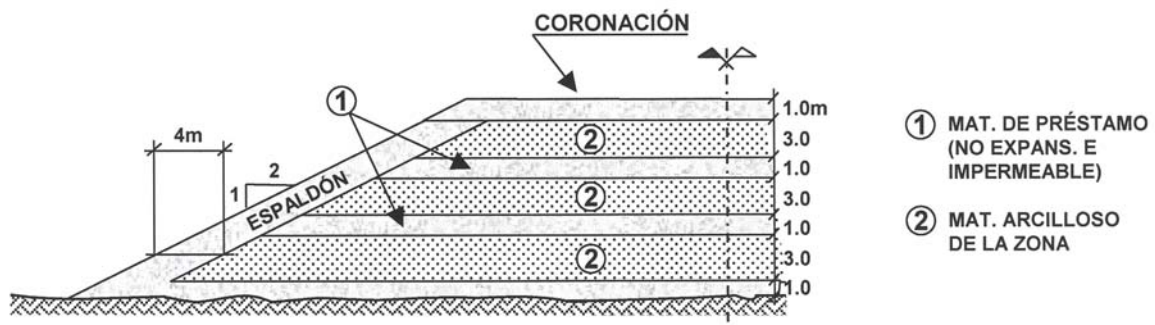


FIG. 27.- SOLUCIÓN UTILIZADA EN LA M-45 I ( $\gamma_d$ , med  $\sim 1.22 \text{ T/m}^3$ ).

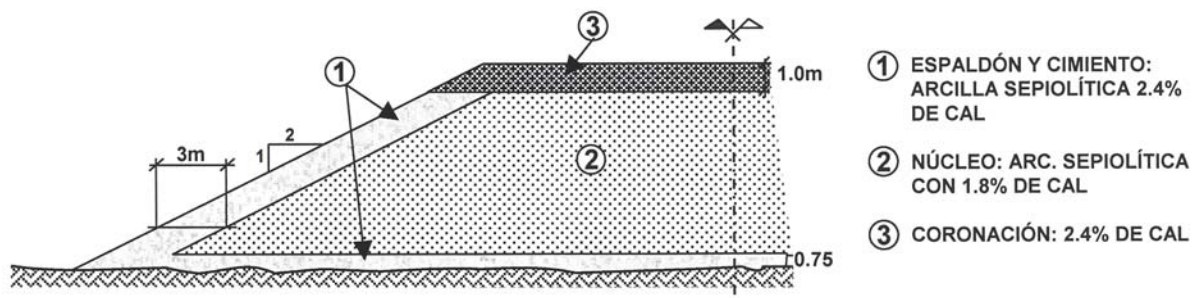


FIG. 28.- SOLUCIÓN UTILIZADA EN LA M-45 II ( $\gamma_d$ , med  $\sim 0.90 \text{ T/m}^3$ ).

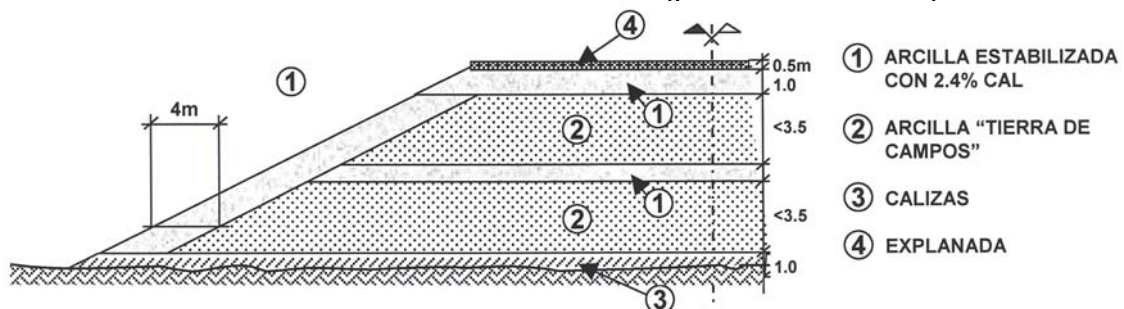


FIG. 29.- SECCIÓN PROPUESTA PARA AUTOV. EN TIERRA DE CAMPOS ( $\gamma_d$ , med  $\sim 0.90 \text{ T/m}^3$ ).

## **9. CLASIFICACIÓN Y RECOMENDACIONES.**

Vemos que las soluciones que se han utilizado son diferentes y que el parámetro que se ha utilizado, generalmente, para distinguirlas es la densidad seca (natural y/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 Fig. 30. 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 Fig. 31 adjunta.

Esta clasificación y soluciones deben tomarse como indicativas y no como verdades absolutas, aunque creemos que su adopción está ya avalada por una cierta práctica real.



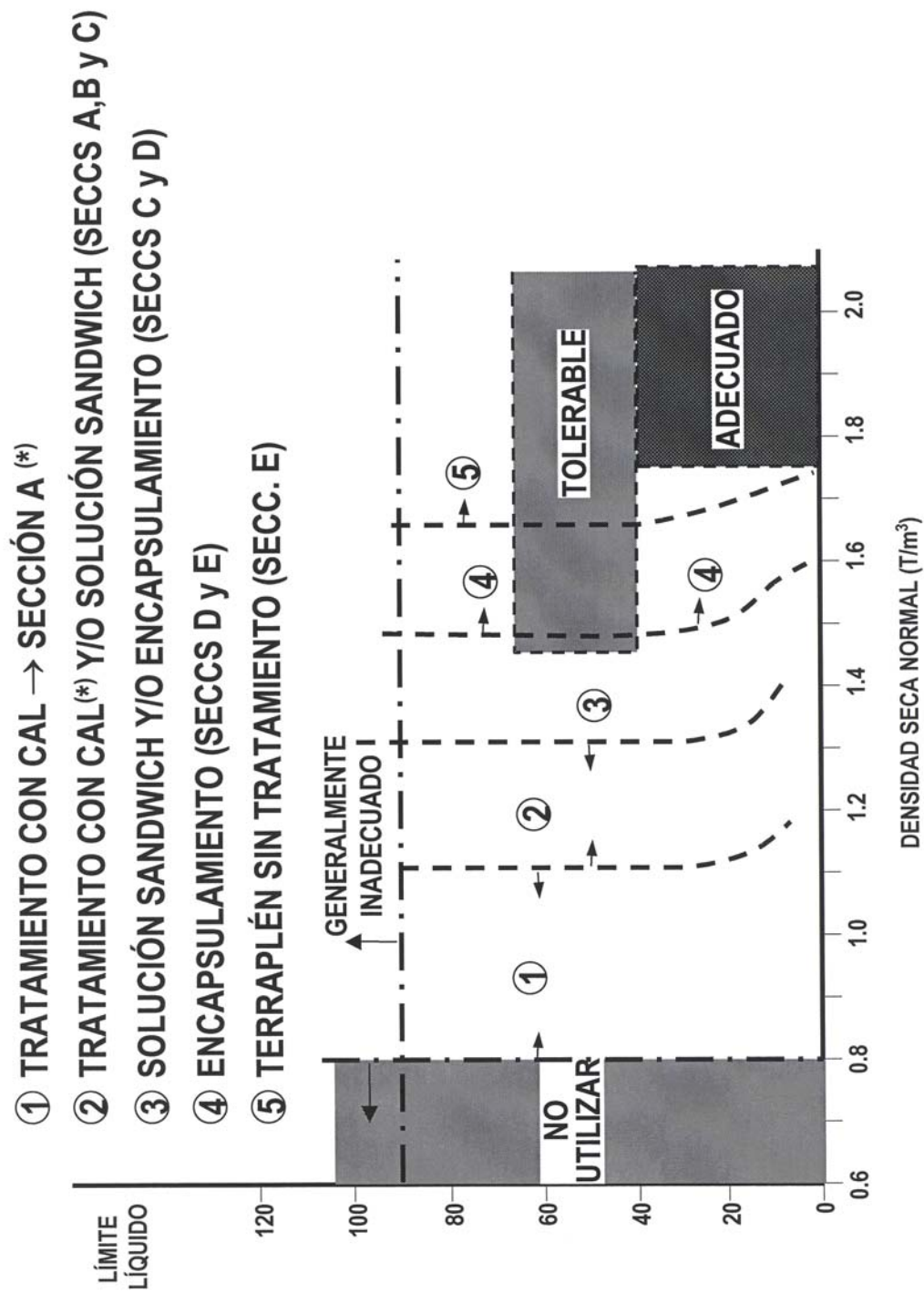


FIG. 30.- POSIBLE CRITERIO DE CLASIFICACIÓN DE MATERIALES ARCILLOSOS PARA SU UTILIZACIÓN EN TERRAPLENES.  
(\*) CONTENIDO DE YESO < 5 %.

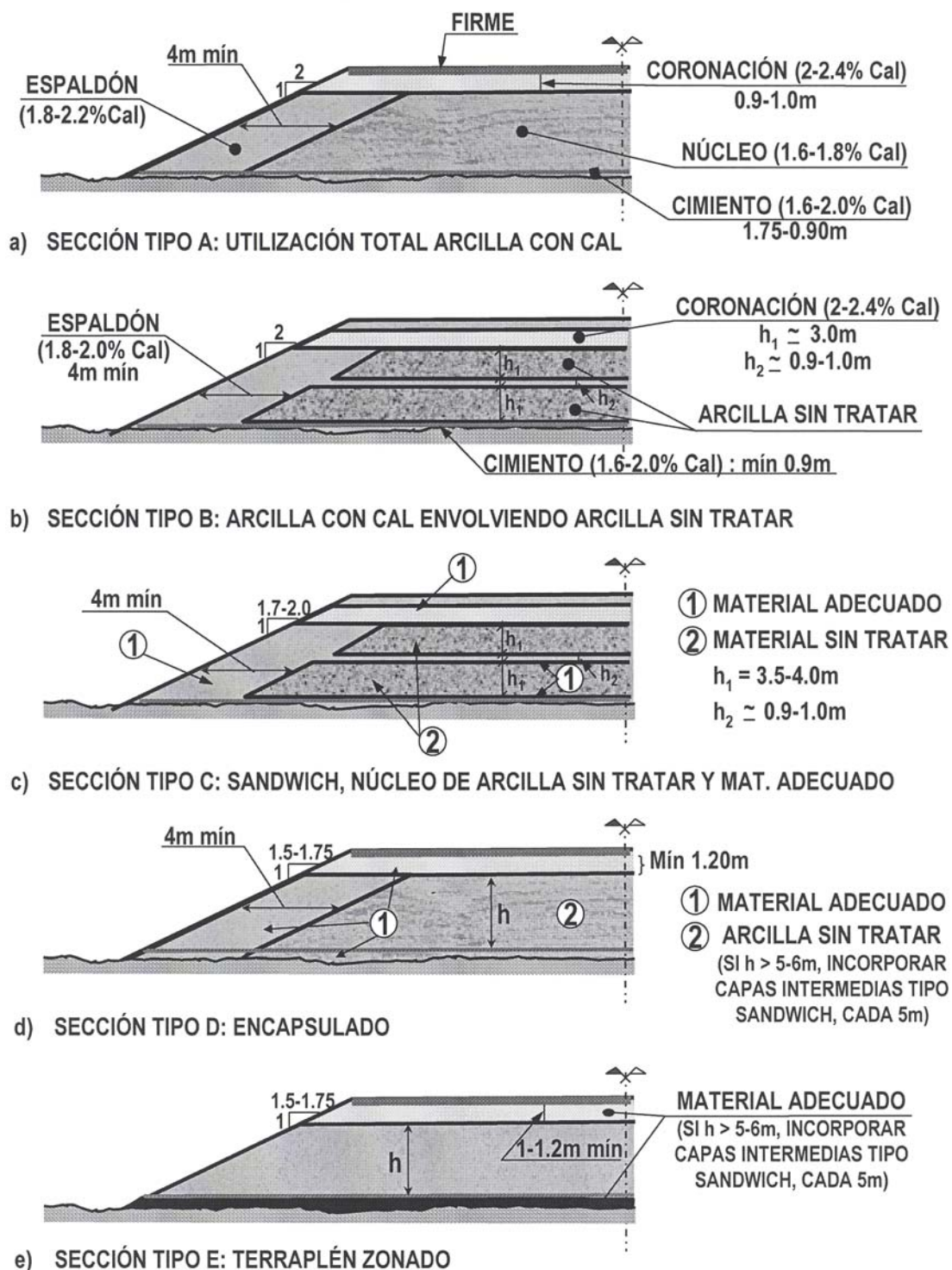


FIG. 31.- POSIBLES SECCIONES DE TERRAPLÉN CON MATERIAL ARCILLOSO MARGINAL.

## 10. CONCLUSIONES

De todo lo anteriormente expuesto queremos destacar que:

- Consideramos un acierto práctico que el “nuevo PG-3” incluya los materiales definidos como “marginales”. En dicho Pliego se dice que podrán ser utilizados, con estudio especial, en núcleos de terraplenes. Ello se refiere al material sin refuerzo o adición de material cementante.
- Se puede, así, tener una amplia posibilidad de utilizar materiales que antes iban a vertedero, con el considerable impacto ambiental.
- No debe pensarse, al tratar con materiales marginales, sólo en su plasticidad (que puede ser muy elevada y que indica posibilidades de expansión) sino que debe de analizarse su granulometría y establecer la variación de su densidad seca óptima P. N., parámetro muy importante para distinguir su posible aprovechamiento y comportamiento.
- Se han analizado las propiedades geotécnicas de estos materiales, sin incluir claramente los yesíferos, ni los restos de demolición, ni otros materiales poco convencionales (cenizas volantes, porespan, etc).
- También se han analizado las propiedades geotécnicas de los materiales marginales más plásticos y menos densos cuando se refuerzan con cal apagadas y los métodos de control en estos casos proponiendo un nuevo criterio de aceptación para el ensayo de placa de carga.
- Por último se ha establecido una clasificación de estos materiales (según su densidad seca y su límite líquido), a fin de establecer secciones tipo como solución al problema de deformabilidad que suelen presentar y para garantizar que su aprovechamiento da resultado satisfactorio.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

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.

MARTÍNEZ, E.; GUTIERREZ MANJÓN, J. M. y SANTAMARÍA, J. J. (1998). "Variante de Cuellar: Formación de terraplenes mediante estabilización parcial de suelo con cal". I Congreso Andaluz de Carreteras, Granada. Tomo II. pp. 1.727-31.

MONCHÓN, I; BONILLO, A.; RAMÍREZ, E. y ATIENZA, M. (2003). "Estabilización con cal de terrenos naturales subyacentes inadecuados y expansivos para el acondicionamiento de la Carretera A-321, Jaén". III Congreso Andaluz de Carreteras. Sevilla. Tomo II. pp. 1.057-68.

OTEO, C.(1994). "Reglas generales de proyecto". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo. Ponencia General. pp. 183-205.

OTEO, C. (2003). "Algunas consideraciones geológico-geotécnicas para el estudio de la infraestructura de obras lineales". Capítulo del libro "Ingeoter 3". Ed. C. López Jimeno. Ed. Entorno Gráfico.

OTEO, C.; DOMINGO, A.; VELASCO, J. y CASTANEDO, J. (2001). "Special design and treatments of Swelling clays and other marginal materials in a Spanish motorway". XIV Int. Conf. on S.M. and G.E. Estambul, Vol III, pp. 2.171-75.

ORTUÑO, L. y RODRIGUEZ, 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.

PARDO, F. y CENTENO, C. (1994). "Utilización de terraplenes de un material granítico calificado como suelo inadecuado". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo, pp. 159-164.

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.

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.

PÉREZ ARENAS, R. (2007) "Tratamiento de suelos marginales o inadecuados con aditivos cementantes para terraplenes viarios" Memoria para optar al Grado de Doctor, presentada en la Universidad Politécnica de Madrid.

RODRÍGUEZ ORTIZ, J. M<sup>a</sup> (1994). "Empleo y comportamiento de materiales yesíferos gruesos en rellenos". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo, pp. 173-9.

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.

SALAS, M. y otros (2003). "Pliego de especificaciones técnicas generales para el tratamiento de suelos con cal de GIASA". III Congreso Andaluz de Carreteras. Sevilla. Tomo II, pp. 1.133-43.

SAMPEDRO, A. (2003). "Tratamientos de suelos con cal". III Congreso Andaluz de Carreteras. Sevilla. Tomo II, pp. 1.117-32.

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.

SIERRA, M<sup>a</sup> J. y otros (2003). "Investigaciones sobre la evolución de diferentes parámetros durante la construcción de los terraplenes estabilizados con cal en A-381". III Congreso Andaluz de Carreteras, Sevilla, Tomo I, pp. 973-87.