

Empleo de suelos marginales en el tramo I de la M-45 de Madrid



POR EDUARDO SAHUQUILLO MORAGÓN,
ISIDORO CARRETERO GARCÍA,
COMUNIDAD DE MADRID,
FERNANDO DIEZ RUBIO,
IBERINSA

1. Introducción

La M-45 es una nueva carretera de la Comunidad de Madrid que, realizada en régimen de concesión, unirá la N-II con la N-V. Se ha adjudicado en tres tramos, siendo el tramo I el que une la N-II con la prolongación del Eje de O'Donnell, de una longitud total de 14,7 km, atravesando los términos municipales de Madrid, San Fernando de Henares, Rivas-Vaciamadrid y Coslada.

Los materiales que atraviesa la traza están constituidos por un sustrato de yesos masivos sobre los que se asientan las arcillas yesíferas. El estrato superior está formado por arcillas grises con presencia de sílex y sepiolita, denominadas peñuela, recubiertas por una capa de reducido espesor de limos de alta plasticidad (glacis), todos ellos correspondientes a la Facies Central del Mioceno de Madrid, caracterizados por la normativa vigente en el momento de analizar el estudio (artículo 330 del PG-3/75) como materiales inadecuados.

El movimiento de tierras de la obra proyectada arroja el siguiente balance:

Desmante: 3 830 000 m³

Terraplén: 4 786 000 m³

Queda patente la gran descompensación de los materiales,

teniendo en cuenta la calidad ya indicada. De esta forma, se pone de manifiesto la necesidad de realizar un estudio de la reutilización de algunos materiales, principalmente los ubicados entre los PK 7+150 y 8+140 y del 9+750 al 10+720 (únicos tramos en desmante del trazado), para que el impacto ambiental ocasionado por la necesidad de préstamos y vertederos sea el mínimo compatible con la calidad técnica de las obras. Los trabajos realizados a tal fin, llevados a cabo entre enero y mayo de 1999, tenían como principal objetivo plantear un método de utilización basado tanto en la normativa extranjera como en las diferentes propuestas de revisión del ya citado artículo 330. Con esta perspectiva se podría plantear la reutilización de hasta

Tabla 1.

	Yesos masivos	Arcillas yesíferas	Limos de alta plasticidad (glacis)	Peñuela (arcilla gris)
Contenido de finos		60,7±15,3	52,4±16,8	77,5±20,9
Límite líquido		63,9±17,5	75,4±19,4	83,7±20,9
Límite plástico		25,3±6,3	43,4±8,4	44,6±11,4
Humedad natural	7,57	19,8±5,5	35,1±19,4	42,2±13,0
Densidad seca (t/m ³)	1,89	1,66±0,22		1,24±0,18
Densidad aparente (t/m ³)	2,00	1,93		1,73±0,13
D _{máx} del P.N. (t/m ³)		1,50±0,11	1,19±0,22	1,18±0,17
H _{opt} del P.N. (%)		22,6±4,9	37,9±10,5	38,4±10,4
Índice CBR (95%)		3,1±2,7	5,10±3,10	4,4±3,3
Índice CBR (100%)		4,6±3,8	7,20±4,6	5,6±3,9
Hinchamiento CBR (%)		3,94±2,44	4,10±4,19	5,42±2,91
Hinchamiento edómetro (%)				5,55±3,28
Sales solubles		0,50	0,30	0,43±0,07
Materia orgánica		0,42±0,09	1,15±0,35	0,38±0,15
Sulfatos		2,12±5,04	0,04±0,09	0,01±0,02
USCS		CH	MH	MH-CH

1 590 000 m³, reduciendo la aportación de materiales para terraplén procedentes de préstamo a unos 3 200 000 m³.

2. Propiedades geotécnicas

Se dispuso, como información preliminar, del Informe geotécnico del proyecto de licitación de julio de 1998, donde se destacan una serie de unidades, que son: yesos masivos, tableados y nodulares; arcillas y margas yesíferas;

arcillas gris verdosas (peñuelas), limos y arcillas de alta plasticidad (glacis).

Para el estudio de los desmontes se realizaron en el 1º desmonte, que alcanzaba cotas rojas de hasta 15 m (7+150 al 8+140): 4 sondeos a rotación de 18,0 m de profundidad cada uno, 1 sondeo a rotación de 21,0 m de profundidad, 15 calicatas y 570 m de perfil sísmico por refracción; y para el 2º desmonte, de 5 m de cota roja máxima (9+700 al 10+720): 5 calicatas.

Las principales propiedades,

deducidas a partir de los diferentes ensayos realizados, se resumen en la tabla 1.

Comparando la humedad natural, la plasticidad y la humedad óptima del ensayo Proctor Normal podemos indicar, en cuanto a valores medios se refiere (con la normal variabilidad de estos materiales), las siguientes características:

- En las arcillas yesíferas, la humedad natural se mantiene por debajo del LP y de la humedad óptima.
- En los limos de alta plasticidad es muy variable, aunque en general es inferior al LP y algo inferior a la humedad óptima.
- En las arcillas grises (peñuela) la humedad natural se mantiene por debajo del LP y por encima de la humedad óptima del ensayo PN.

3. Clasificación de los materiales

Con la totalidad de los ensayos realizados y con las muestras identificadas para cada una de las unidades destacadas, se han analizado y clasificado los diferentes suelos y rocas desde distintos criterios

Tabla 2.

	PG3/75	PG3/94 y 96
Arcillas yesíferas	Tolerable: 33 % Inadecuado: 67 %	Tolerable: 33 % Marginal: 67 % Inadecuado: 0 %
Limos de alta plasticidad (Glacis)	Tolerable: 9 % Inadecuado: 91 %	Tolerable: 9 % Marginal: 91 % Inadecuado: 0 %
Arcilla gris verdosa (Peñuela)	Tolerable: 12 % Inadecuado: 88 %	Tolerable: 12 % Marginal: 74 % Inadecuado: 14 %

Se apreció la necesidad de rentabilizar algunos métodos para que el impacto ambiental sea el mínimo compatible con la calidad técnica de la obra

de clasificación, pero fundamentalmente basados en la normativa española (artículo 330 del PG3 vigente, así como las propuestas de modificación publicadas en los años 1994 y 1996), y desde la normativa francesa publicada en el año 1992.

Bajo el punto de vista del artículo 330, la clasificación de los materiales sería la indicada en la tabla 2.

Lo indicado se puede sintetizar en las figuras 1 y 2.

Aplicando la normativa francesa, en su mayoría se clasifican entre A3 y A4, esto es, suelos con un contenido de finos superior al 35% y con índices de plasticidad por debajo de 40 (A3) o por encima de 40 (A4).

También se ha realizado una clasificación de los materiales desde el punto de vista de su expansividad, mediante los criterios de Vijayvergiya y Ghazzaly, Cuéllar, Oteo y varios autores recopilados por R. Ortiz. Atendiendo fundamentalmente a los dos últimos criterios, se destaca una amplia dispersión de las muestras, como se observa en las figuras 3 y 4.

4. Propuesta de utilización

Por lo que respecta a la posible utilización de los suelos, y teniendo en cuenta las propuestas de modificación de la normativa española y la normativa francesa, se propone utilizar los materiales de la forma siguiente:

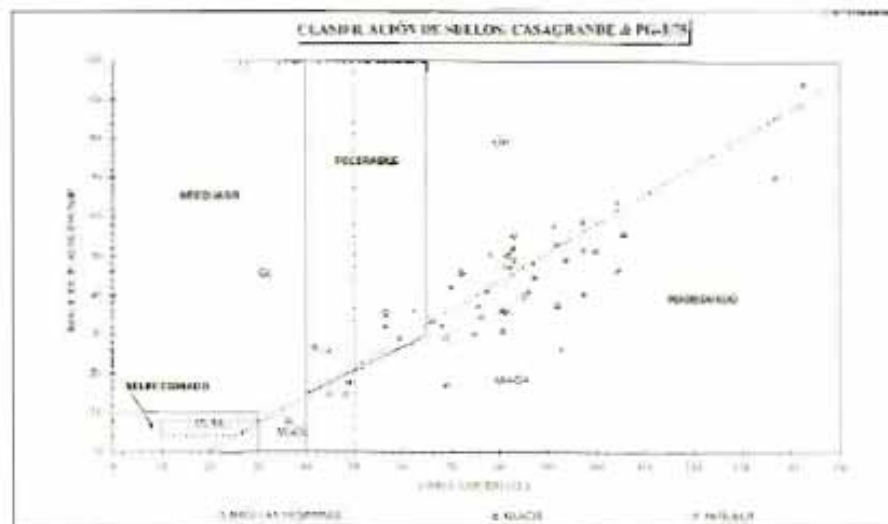


Figura 1

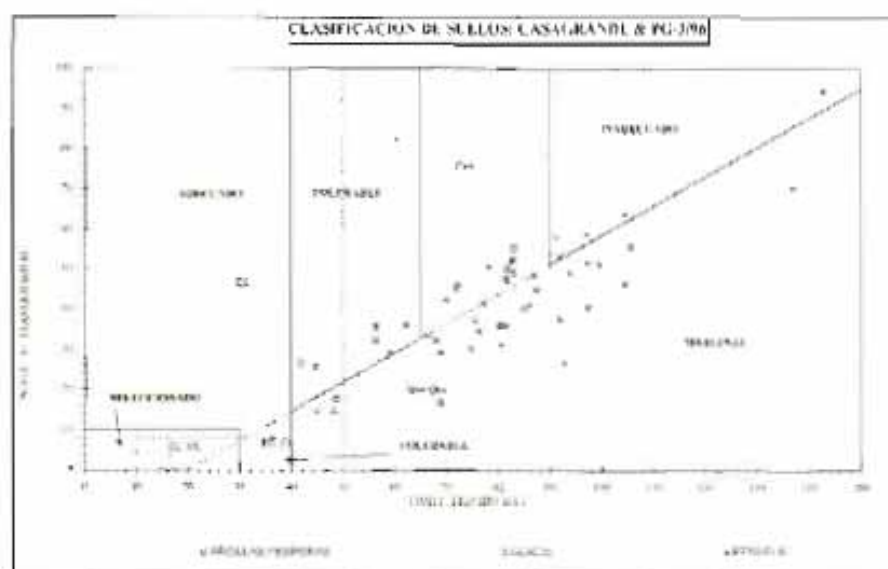
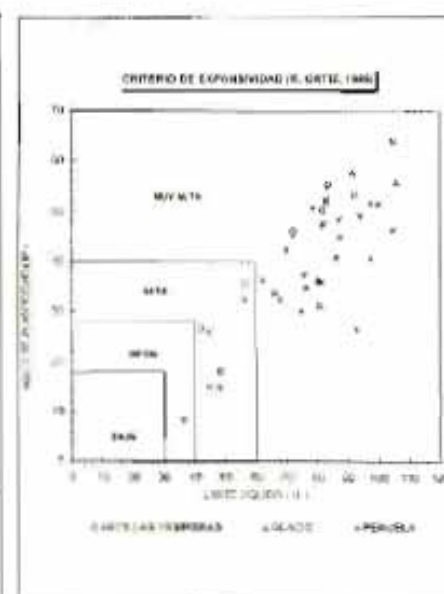
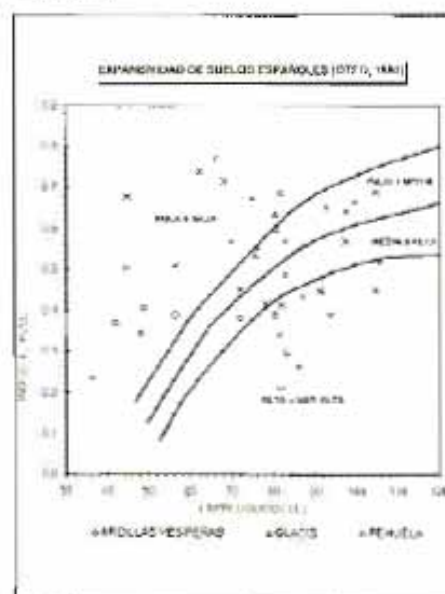


Figura 2.



Figuras 3 y 4.

- Compactar del lado húmedo de la curva del ensayo Proctor (un mínimo del 2% por encima del óptimo), lo que puede exigir aumentar la humedad en los limos de alta plasticidad (glacis), en las arcillas yesíferas y nada en la peñuela. Por lo que respecta a la densidad, se recomienda compactar entre el 95 y el 98% de la máxima obtenida en el ensayo P.N., compatible con la condición anterior, ya que las curvas obtenidas son en general planas; un aumento de la humedad no se debe corresponder con una pérdida de densidad como se aprecia en la figura 5.
- Se deberá compactar con pata de cabra y en tongadas de 30 cm de espesor máximo. Deben eliminarse los bloques de sílex o carbonatos que puedan exceder, en su tamaño, los 2/3 de dicho valor.
- Se dispondrán en el núcleo, convenientemente encapsulados, por medio de espaldones, cimientos y coronación de un material inerte (entendiéndose como tal el no expansivo) e impermeable (con un contenido de finos del 15 al 35%). Además, el espesor será de 1,50 m en los espaldones, y de 1,00 m en coronación y cimientos.
- No se dispondrán en espesores superiores a 3,0 m. Donde la altura del terraplén implique disponer más altura, se dispondrá de una capa intermedia de un material de características similares a los espaldones, de un metro de espesor.
- Se evitará su colocación en las proximidades de las estructuras y de las obras de drenaje.

El análisis de las características geotécnicas de los materiales, así como las características de puesta en obra exigidas, desaconseja el uso de diferentes unidades por las siguientes razones:

- En los yesos masivos, no es recomendable su empleo como pedraplén, que puede acarrear asentamientos diferidos y de colap-

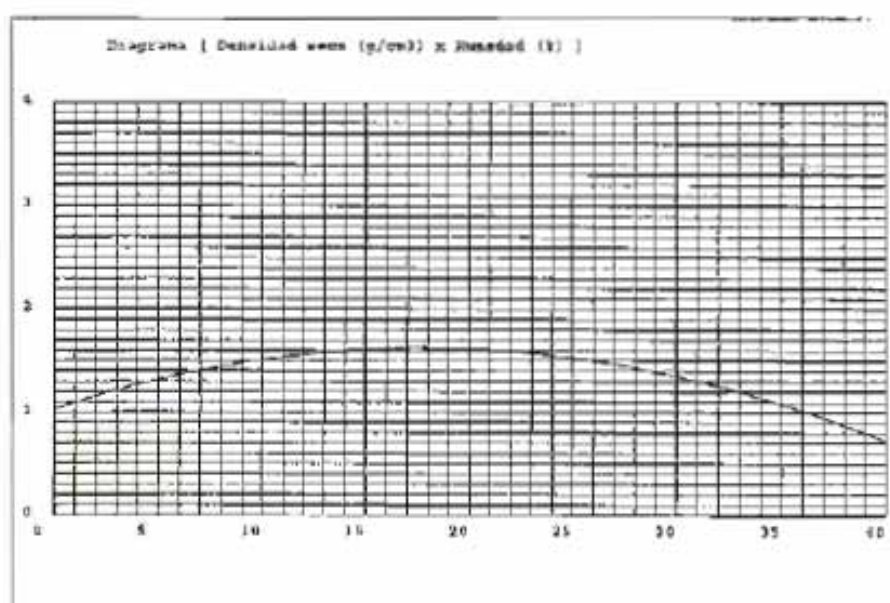


Figura 5.

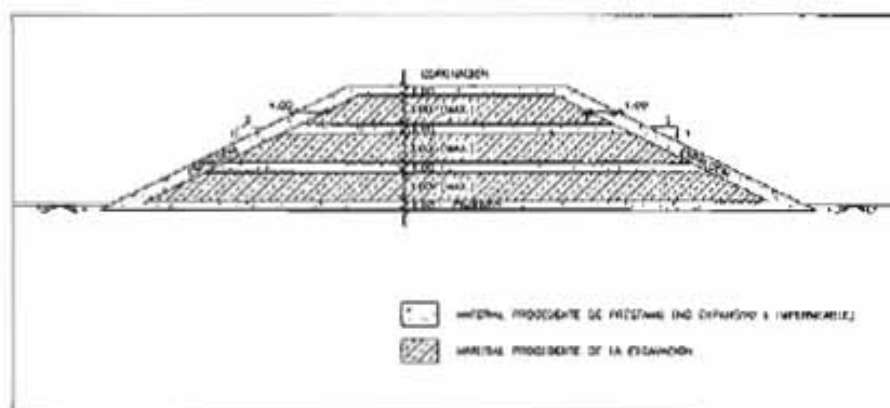


Figura 6.

so de considerables magnitudes. Pero si podrían utilizarse como un todo uno yesífero, bien gradado, con un coeficiente de uniformidad superior a 10 y, en los casos en los que se detecte *in situ* una proporción de arcilla o marga suficiente para asegurar que los bolos de yeso queden totalmente envueltos. Como tal proporción de finos no se de-

fecta, su utilización queda descartada.

- Las arcillas yesíferas que recubren a las anteriores no deben usarse por su contenido en sulfatos.
- De los limos de alta plasticidad (glacis) no se aconseja el uso por las bajas densidades presentadas y por la variabilidad de las propiedades detectadas.

Por lo tanto, la única unidad de posible utilización son las arcillas gris verdosas, peñuelas, eliminando la sepiolita en su totalidad.

La única unidad de posible utilización son las arcillas gris verdosas, peñuelas, eliminando la sepiolita en su totalidad

5. Procedimiento de ejecución y control

Previamente al comienzo de los trabajos de terraplén con los materiales procedentes de los

desmontes, se comprobará que la totalidad de la superficie sobre la que se ha de extender la primera capa del terrapién tiene al menos un cimientito de un metro de espesor de un material adecuado con las siguientes características:

- Densidad seca: $\gamma_d \geq 1,65 \text{ t/m}^3$
- Límite líquido: LL < 40%
- Finos: # 200 del 15 al 35 %
- CBR al 95% del P.N. > 5

El terrapién se realizará según la figura 6.

Como se indica, todo el terrapién irá protegido por unos espaldones de características iguales que las del cimientito, en una anchura mínima de 4,0 m. Así mismo, se dispondrá, cada tres metros de altura, una capa de 1,0 m de espesor del mismo material.

Las condiciones de compactación (espesor de tongada, número de pasadas de la maquinaria, humectación, deformabilidad, etc.) fueron las fijadas por las bandas de ensayo realizadas. En principio se realizaron pruebas con 25, 30 y 35 cm de espesor y con 4, 6 y 8 pasadas, añadiendo agua en pasadas intermedias, todas ellas con rodillo o tractor de "pata de cabra", obteniéndose los mejores resultados con las siguientes características: número óptimo de pasadas 7 dobles (determinado fundamentalmente por el ensayo de la huella), con espesores de 30 cm y añadiendo agua (entre un 2 al 3% aproximadamente) en dos o tres pasadas intercaladas, en lugar de hacerlo en una única pasada previa a la compactación.

Por lo tanto, la compactación de estos materiales se deberá realizar de acuerdo con los siguientes criterios:

- Espesor de la tongada: $30 \pm 2 \text{ cm}$.
- Compactación por el lado húmedo del PN, teniendo en cuenta que la humedad resultante no exceda el valor: $w \leq (LP - 5) \pm 2 \%$.
- Número de pasadas: siete dobles con rodillo o tractor pata de cabra.



Detalle del rodillo "pata de cabra".

- Densidad aparente (obtenida in situ por el método de arena o por nuclear) mayor que $1,70 \text{ t/m}^3$

Al terminar la jornada de trabajo o en coronación se deberá realizar una pasada con rodillo liso de sellado, para que el material compactado no pierda la humedad. Si se requiere disponer tongadas superiores, se ejecutará una pasada con el rodillo de pata de cabra, para darle trabazón con la capa ya dispuesta.

Además, para que se considere apta cada capa, en cuanto a deformabilidad, debe cumplirse:

- Ensayo con placa de carga (realizado cada 20 000 m³): módulo en carga mayor de 30 MPa y relación de módulos (rama de descarga/rama de carga) menor de 3,5.
- Ensayo del método de la huella (realizado cada 10 000 m²): flecha menor o igual de 6 mm.

5. Control del terrapién

El control sobre las propiedades del material utilizado, arcillas gris verdosas (Peñuelas), sus características de puesta en obra (hu-



Extendido de capa de núcleo de sandwich.



Compactación simultánea de núcleo (Peñuelas) y espaldón.

	LL	LP	Wn	Dmax	Wopt	Wn-Wopt
MEDIA	86	44	39,1	1,22	41,1	-1,1
MÁXIMO	130	68	59,8	1,46	79,2	15,7
MÍNIMO	58	26	18,5	0,83	24,6	-19,4
DESV. TÍP.	6,3	9,1	6,6	0,12	8,6	7,3

Tabla 3.

	Dap	Dsec	% Comp.	W	W-Wopt	W-(LP-5)
MEDIA	1,75	1,26	105	38,9	-5,3	-0,9
MÁXIMO	1,96	1,49	124	54,1	1,4	6,4
MÍNIMO	1,65	1,13	94	25,3	-20,3	-17,3
DESV. TÍP.	0,05	0,08	6,1	6,3	3,8	4,4

Tabla 4.

	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	K	ASIENTO (mm)
MEDIA	61	150	2,6	3
MAXIMO	129	321	3,5	9
MÍNIMO	29	88	1,4	1
DESV. TÍP.	23	45	0,5	1,5

Tabla 5.

medad y densidad), así como sus propiedades deformacionales, han sido los que se proceden a comentar en líneas siguientes.

De las 150 muestras analizadas, los ensayos realizados sobre los materiales de procedencia han dado los valores de la *tabla 3*.

este caso.

Los ensayos de compactación realizados, han dado los siguientes valores, que se reflejan en la *tabla 4*.

La densidad aparente resultante de la compactación resultó en algunos casos inferior a la exi-

Los valores obtenidos difieren poco de los analizados en los estudios anteriores, siendo quizás la diferencia entre la humedad natural y la humedad óptima un poco menor en

gida. Por lo que respecta al grado de compactación (densidad seca obtenida/densidad seca de referencia), es bueno, con valores por encima del 95 %. Este hecho era de esperar, debido a que las curvas del ensayo como ya hemos hecho notar son en general muy planas; y compactar del lado húmedo no implica, como se ha visto, una pérdida de densidad. En general, la humedad de compactación ha estado muy próxima al óptimo del ensayo de referencia (P.N.), sin que por ello se obtuviera un material de difícil trabajabilidad, con valores de dicha humedad por debajo del límite plástico, como se exigía a estos materiales.

En cuanto a los ensayos con placa de carga (43 determinaciones según NLT 357/86) y los asientos del ensayo de la huella (78 determinaciones), han dado los valores que se reflejan en la *tabla 5*.

Como se puede observar, de todas las determinaciones del ensayo de placa realizadas en ningún caso se han medido valores no admitidos. En el caso del ensayo de la huella, sólo en cinco de ellos (lo que supone un 6,40 %) se ha producido el rechazo de la capa realizada, lo que indica el buen comportamiento del material compactado.

De esta forma se ha obtenido un terraplén que podemos considerar de buenas características, con un respeto al problema medioambiental importante.

6. Agradecimientos

Los autores del artículo quieren agradecer la inestimable colaboración de D. Carlos Oteo Mazo, como asesor de la Comunidad de Madrid, así como a la propia concesionaria, representada por su Director Técnico, D. Vicente de Paz y a los ingenieros de las constructoras, D. Rafael Gómez del Río, D. Manuel Jiménez y D^{ña} Soledad Pérez Galdos. ■