

APROVECHAMIENTO DE MATERIALES MARGINALES EXISTENTES EN EL ÁMBITO DE LA U.Z.P. 2.01 EL CAÑAVERAL EN MADRID (ESPAÑA) PARA LA EJECUCIÓN DE LOS VIALES DE LA URBANIZACIÓN. CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

S. GANCEDO & E. WILT

División de Desarrollo Urbano, TYPSA, España

SGANCEDO@TYPSA.ES

RESUMEN

Durante el proceso de crecimiento de las ciudades, generalmente se han ocupado primero los suelos que presentaban una mayor ventaja, no sólo por su situación espacial, sino por la calidad de los materiales existentes en la zona, y que permitían su empleo en la formación de los viales del nuevo desarrollo.

En el caso de la ciudad de Madrid, mientras que los sectores del norte, ubicados en terrenos con buenas características geotécnicas se fueron desarrollando con cierta premura, los ámbitos del sureste, situados en zonas yesíferas y de arcillas expansivas, no se desarrollaron tan rápidamente, en parte debido a los elevados costes de repercusión que la sustitución y el transporte a vertedero de los materiales existentes, no utilizables en la construcción, generaba.

En uno de estos sectores del sureste de Madrid, el denominado U.Z.P. 2.01 El Cañaveral, de 537 ha y 45 km de viales, durante la redacción del proyecto de urbanización, se propuso la utilización de técnicas que permitieran el empleo de los materiales existentes en la zona para la formación de los terraplenes de los viales urbanos.

El objetivo principal del proyecto era la reutilización total de los materiales existentes en el ámbito. La obra era excedentaria en tierras y los materiales existentes se clasificaban como marginales según la normativa española (PG-3).

La solución proyectada, y que se ha ejecutado recientemente, consistía en localizar los materiales marginales de mejor calidad, caracterizados como peñuelas, y estabilizarlos "in situ" con cal, con el fin de controlar sus características plásticas, y obtener un material adecuado para la construcción de los viales, con capacidad portante adecuada a las solicitudes futuras de tráfico.

Los materiales encontrados de más baja calidad se han empleado en la formación de caballones perimetrales, a modo de pantallas acústicas, que resuelven los problemas de ruido que en la zona residencial creaban las autopistas circundantes.

El objetivo finalmente se ha cumplido, no teniendo que sacar del sector los materiales excavados, con el consiguiente ahorro económico y mejora para el medioambiente, evitando la formación de grandes vertederos. Se ha conseguido de esta forma la viabilidad económica y medioambiental de la operación urbanística.

Durante la construcción se ha obtenido un alto nivel de calidad, innovándose en los procedimientos de control de las tongadas, debido a los grandes volúmenes diarios movidos: 30.000 m³ de excavación y 15.000 m³ de terraplén estabilizado, con un total de más de 13 millones de m³ de movimiento de tierras realizado.

A lo largo de la ponencia se describirán las actividades que se realizaron para la formación de los terraplenes, desde las bandas de ensayo para determinar las características de los materiales válidos, los porcentajes de cal y agua a emplear en la estabilización, el procedimiento de puesta en obra, la maquinaria empleada, espesor de las tongadas, control de ejecución, y resultados de los ensayos de laboratorio realizados.

1. INTRODUCCIÓN

La presente comunicación tiene por objeto exponer la experiencia llevada a cabo durante los trabajos de urbanización del ámbito U.Z.P. 2.01 El Cañaveral en Madrid, en relación con el aprovechamiento de los materiales marginales existentes en el área de actuación para la formación de los terraplenes.

En los siguientes apartados se describirán las características más significativas de la urbanización, y del entorno geológico – geotécnico en el que se sitúa. Así mismo se explicará la solución adoptada en proyecto para la ejecución de los terraplenes, y las secciones previstas tanto en desmonte como en terraplén.

Posteriormente se expondrá cómo se realizó, primero, el proceso de localización y caracterización de los materiales marginales de mejor calidad existentes en el sector, y después, el control de las características plásticas de los mismos con el fin de obtener un material adecuado para la ejecución de los terraplenes de las calles de la nueva ciudad.

Se explicará también cómo se ejecutaron bandas de ensayo con el fin de determinar la caracterización de los materiales válidos para los terraplenes, y cuáles fueron las características que finalmente se establecieron como necesarias para que los materiales pudieran emplearse en los trabajos.

Finalmente, se analizarán los parámetros fijados para el control de la calidad durante la ejecución de los viales, los principales problemas que surgieron durante el desarrollo de los trabajos, y los resultados obtenidos con los trabajos.

Las obras de urbanización del sector han sido promovidas por la Junta de Compensación de El Cañaveral, e inspeccionadas por los técnicos del Excmo. Ayuntamiento de Madrid. La Junta de Compensación encargó a TÉCNICA Y PROYECTOS, S.A. (TYPESA) tanto la redacción del proyecto de urbanización como la dirección de las obras y el control de ejecución de las mismas.

2. ENCUADRE URBANÍSTICO DEL ÁMBITO DE ACTUACIÓN

Desde la aprobación del Plan General de Ordenación Urbana de Madrid en 1997, el planeamiento urbanístico ha seguido su curso, y los suelos clasificados como urbanizables se han ido completando, comenzando por aquellos mejor situados, al norte del término municipal, con mejor dotación de infraestructuras y ubicados en suelos con mejores características geotécnicas, y terminando con los ubicados en la zona sureste del término municipal.

Para ayudar al desarrollo de las 4.979 ha que el Plan General clasificaba como suelo urbanizable programado (U.Z.P.) en el sureste de Madrid, el Ayuntamiento elaboró, en el año 2002, un Plan Especial de Infraestructuras del Sureste de Madrid, en adelante PEISEM, [1] con el fin de definir las necesidades comunes de infraestructuras básicas de los diferentes sectores, de modo que se pudiera coordinar su implantación entre los sectores y con la ciudad colindante.

Las previsiones incluidas en el PEISEM abarcaban desde infraestructuras de la red viaria, como las vías colectoras de conexión con las vías de alta capacidad, como la M-45, hasta infraestructuras hidráulicas como la aducción para el suministro de agua potable, o los colectores principales de recogida de fecales y pluviales. De igual forma el PEISEM

establecía la necesidad de tener presente la influencia que la urbanización de las nuevas áreas iba a tener en el medio ambiente, con el fin de que se compatibilizaran y armonizaran los intereses urbanísticos con la necesidad de crear desarrollos sostenibles de la ciudad, que garantizaran una adecuada calidad y mejora de las condiciones medioambientales existentes.

En este entorno urbanístico, en marzo de 2003 se aprueba definitivamente el Plan Parcial del ámbito de El Cañaveral, uno de los grandes sectores del sureste de Madrid. Comienza así el desarrollo urbanístico de una de estas últimas bolsas de suelo del Plan General del 97.

3. EL ÁMBITO DE ACTUACIÓN EN CIFRAS.

Las obras de urbanización de la U.Z.P. 2.01 “El Cañaveral” comprenden la actuación sobre una superficie total de 5.388.384 m², de los cuales 2.182.000 m² son edificables incluyendo una zona residencial para 14.000 viviendas, zonas verdes y equipamientos, un polígono industrial, zona de oficinas, y una zona comercial.



Figura 1. - Plan Parcial de El Cañaveral realizado por el estudio APD Arquitectura

Dentro del sector se proyectan 103 viales, con una longitud aproximada de 45 km, basándose en una organización del sistema viario en la que se establece una jerarquización en cuatro niveles.

Se han ajustado las rasantes de modo que se cumplan los requisitos de pendientes mínimas para drenaje, se reduzcan las excavaciones y se obtenga el mayor aprovechamiento posible de los materiales existentes en la zona.

El movimiento de tierras total realizado durante las obras asciende a un volumen total de más de 13 millones de metros cúbicos de los cuales no se ha llevado nada a vertedero.

Tabla 1 - Características de la U.Z.P. 2.01 El Cañaveral

Superficie bruta	538 ha
Superficie edificable	2.182.000 m ²
Superficie viario proyectado	824.000 m ²
Longitud total de viario	45.864 m
Movimiento de tierras - Desmonte	7.343.465 m ³
Movimiento de tierras – Terraplén viales y motas	6.945.900 m ³

4. ENCUADRE GEOTÉCNICO .

En el informe geológico-geotécnico realizado para la redacción del proyecto de urbanización, se relacionan las siguientes formaciones principales:

Rellenos antrópicos

Materiales Cuaternarios.

- Formación Q_G. Glacis.
- Formación Q_E. Rellenos de zonas deprimidas y fondos endorreicos.
- Formación Q_C. Coluvial.

Materiales Terciarios.

- Formación TP. Peñuelas.
 - Predominio de peñuela. TP_P.
 - Predominio de sepiolita. TP_S.
- Formación TE. Facies evaporíticas.
 - Arcillas y margas yesíferas. TE_{MY}.
 - Capas de yesos masivos. TE_Y.

De todas estas formaciones que se encuentran en el sector, se describe a continuación de manera resumida la unidad litológica predominante que se ha empleado en la formación de los terraplenes, y los parámetros geotécnicos que la caracterizan.

4.1. FORMACIÓN TP. PEÑUELAS

Está constituida por un conjunto litológico de lutitas o arcillas fuertemente litificadas por sobreconsolidación o cementaciones carbonatadas, de coloraciones fundamentalmente gris verdoso-azulada con episodios marrones de alteración (TP).

Según la posición geográfica, el mineral arcilloso predominante en las peñuelas es la montmorillonita, o un interestratificado de montmorillonita y sepiolita, o bien la sepiolita, estando la expansividad de las peñuelas asociada al contenido en montmorillonita.

Dentro de la formación Peñuela, se realiza una diferenciación entre material con predominio de peñuela (TP_P) y material con predominio de sepiolita (TP_S). Se ha considerado material con predominio de sepiolita aquel cuya densidad seca es menor de $1,20 \text{ t/m}^3$, y material con predominio de peñuela aquel que tiene densidad seca mayor de $1,20 \text{ t/m}^3$.

4.1.1. Formación TP_P

La formación TP_P presenta un límite líquido medio del 83%, variando entre el 56 y el 100%. El índice de plasticidad oscila entre el 17 y el 53%, con un valor medio del 33%. Teniendo en cuenta que el porcentaje medio de finos es superior al 90% y que el contenido de gravas es despreciable, estos materiales, según la USCS, se clasifican como limos y arcillas de alta plasticidad. Según el actual Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento [2], en adelante PG-3, se clasifican como materiales marginales.

Las densidades secas de estos materiales varían entre $1,21$ y $1,63 \text{ t/m}^3$, con un valor medio de $1,34 \text{ t/m}^3$. Presentan una humedad natural media del 35%, variando entre un mínimo del 19% y un máximo del 49%.



Figura 2. - Material de la formación TP_P extraído durante la campaña geotécnica

Aunque la propia denominación de “peñuela” alude a materiales muy compactos y resistentes, puede observarse que existen niveles de baja compactación, con valores de golpeo menores de 15, a profundidades mayores de 10 metros. También se obtienen resultados muy variables en el ensayo a compresión simple, estando los valores típicos entre $0,22$ y $4,13 \text{ kg/cm}^2$. Los valores mayores se pueden corresponder con las zonas más cementadas por carbonatación. Los más bajos probablemente correspondan a muestras que hayan sufrido un alto proceso de alteración.

Análoga dispersión se observa en los valores de resistencia al corte determinados en los ensayos de corte directo. La cohesión efectiva oscila entre $0,3$ y $4,8 \text{ t/m}^2$, mientras que el ángulo de rozamiento interno varía entre 24° y 36° .

Los ensayos de compactación realizados, Proctor Normal, dan valores de la densidad máxima de $1,31 \text{ t/m}^3$. El índice CBR al 100% PN presenta valores muy dispersos, variando desde 3 hasta 23.

4.1.2. Formación TP_S

La formación TP_S tiene un límite líquido medio del 93%, variando entre el 73 y el 120%. Tiene una humedad natural media del 58%, variando entre un mínimo del 40% y un máximo del 84%. El índice de plasticidad oscila entre el 11 y el 52%, con un valor medio del 26%. El porcentaje medio de finos es superior al 90%, excepto en dos muestras que tienen contenidos de arena en torno al 70%, mientras que el contenido en gravas es despreciable.

Por lo tanto, estos materiales, según la USCS, se clasifican como limos y arcillas de alta plasticidad, con intercalaciones de niveles más arenosos. Según el actual PG-3, se clasifican como materiales marginales.

La densidad seca presenta un valor medio $1t/m^3$, variando entre un mínimo de $0,80t/m^3$ y un máximo de $1,15t/m^3$. La humedad natural varía entre el 40% y el 84%, con un valor medio del 58%.



Figura 3. - Material de la formación TP_S extraído durante la campaña geotécnica

La compacidad de estos materiales es variable, observándose niveles de baja compacidad, valores de golpeo entorno a 15 golpes, a profundidades entorno a 10m. También se obtienen resultados muy variables en el ensayo a compresión simple, estando los valores típicos entre 0,38 y 3.39kg/cm². Igual que en la formación anterior, los valores mayores se pueden corresponder con las zonas más cementadas por carbonatación. Los valores inferiores probablemente correspondan a muestras muy alteradas o fisuradas.

En ambas formaciones, los ensayos de hinchamiento Lambe justifican que se consideren materiales potencialmente expansivos.

5. SOLUCIONES INCLUIDAS EN EL PROYECTO DE URBANIZACIÓN.

De acuerdo a los tráficos esperados, el proyecto de urbanización establece una explanada tipo E-2, que de acuerdo a la Orden Circular 10/2002 del Ministerio de Fomento [3], alcanza un módulo de compresibilidad de al menos 120 MPa en el segundo ciclo de carga de un ensayo de placa de carga.

Los materiales de fondo de desmonte existentes en el ámbito, como hemos visto en el apartado anterior, se clasifican según el PG-3 como materiales marginales. De acuerdo a la orden circular 10/2002 del Ministerio de Fomento, las distintas formaciones de una explanada E-2 incluyen capas de espesores importantes de suelos tolerables, adecuados o seleccionados según la formación seleccionada. (Ver figura 4)

La gran extensión de los viales proyectados y la no existencia de materiales en el área objeto de actuación que cumplan las exigencias de los suelos necesarios para la formación de explanada, han obligado a la búsqueda de alternativas viables para la formación de los viales como es la estabilización de los materiales marginales con cal.

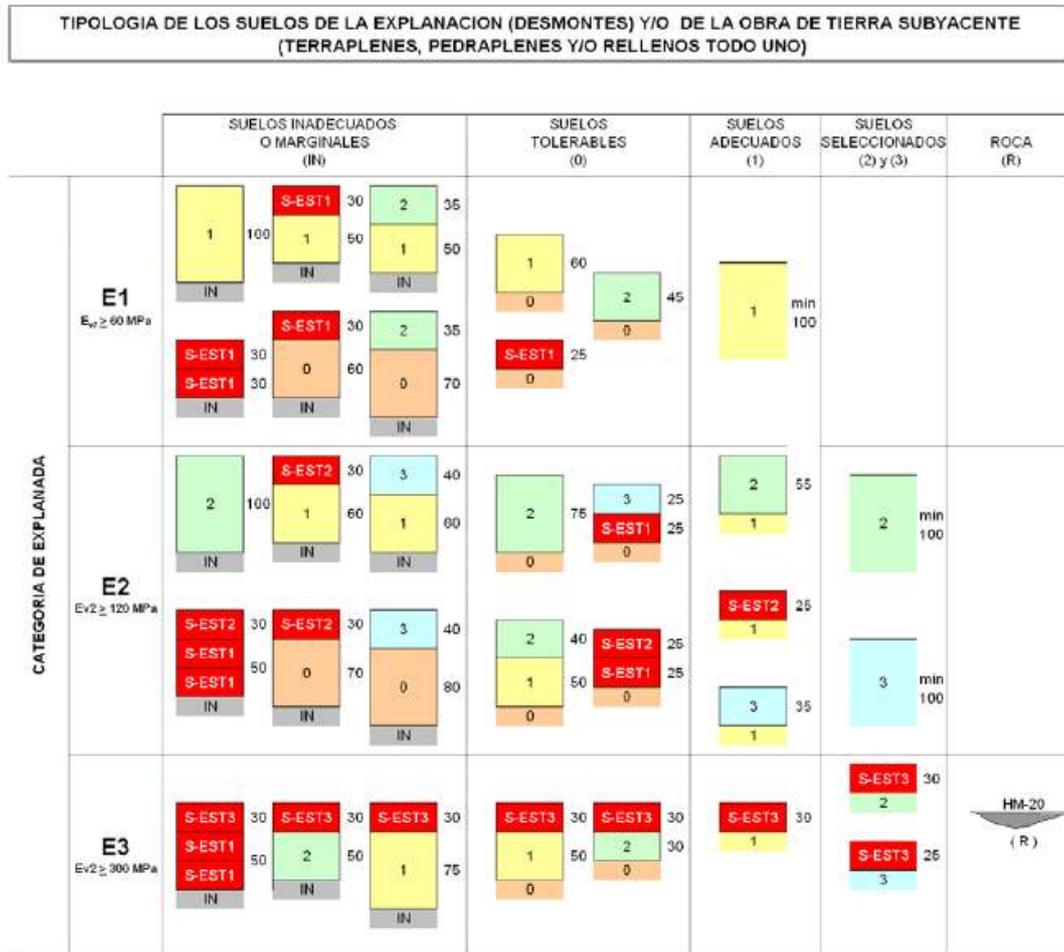


Figura 4. - Categorías de explanada-Orden Circular 10/2002 Ministerio de Fomento

El proyecto de urbanización establecía que la formación de explanada estaría constituida por los siguientes materiales:

- Suelo estabilizado in situ con cal tipo S-EST-1 en dos capas, totalizando 50 cm de espesor.
- Suelo estabilizado in situ con cal tipo S-EST-2, en una capa de 30 cm de espesor.

El apoyo de la explanada se realiza sobre el terreno natural, saneando las zonas de vertidos antrópicos. Al ejecutar los viales se eliminan los materiales de vertido existentes y se sanea la excavación en la profundidad indicada en el estudio Geológico y Geotécnico, de manera que la explanada apoye sobre el terreno natural.

Los materiales clasificados como marginales del tipo peñuela, se pueden emplear para la formación del núcleo de los terraplenes, tratándolos con cal, descartándose los materiales de la transición tosco-peñuela que estén constituidos predominantemente por sepiolita (TP_S). El resto de materiales excavados (materiales cuaternarios) se utilizan para construir el caballón perimetral, que se realiza con funciones medioambientales, a modo de pantalla acústica, y en los rellenos de áreas destinadas a zonas ajardinadas.

La excavación de los taludes permanentes en los materiales terciarios se proyecta con pendientes no más fuertes que el 3H:2V. mientras que los rellenos para viales se proyectan con taludes no más verticales que el 2H:1V.

Con objeto de ajustar el contenido en cal y el espesor de la tongada a ejecutar, así como el procedimiento de puesta en obra de los materiales, se han realizado durante la fase de obra distintas pruebas de compactación de los rellenos con distintos procedimientos, hasta obtener densidades secas del orden del 95% de la densidad Proctor Normal.

Se expone a continuación el proceso de ejecución de bandas de ensayo para la formación de los terraplenes y explanadas, que se realizó en el ámbito durante la fase de obras, con el fin de establecer un procedimiento de puesta en obra de los materiales que permitiera un control exhaustivo del mismo.

6. BANDAS DE ENSAYO PREVIAS A LA EJECUCIÓN DE LOS TERRAPLENES.

De acuerdo a lo expuesto, la naturaleza marginal de los materiales existentes según la clasificación de la normativa vigente (art. 330 4.1. del PG3) hacen necesario un estudio pormenorizado del aprovechamiento de los materiales.

El estudio para el empleo de los suelos se basa en la experiencia obtenida en el año 2002 con el uso de estos materiales en la construcción de obras de carreteras ejecutadas en la zona, tales como la autovía de circunvalación del sur-este de Madrid M-45, en la cual se emplearon este mismo tipo de materiales estabilizados con cal, con resultados positivos. Los detalles de los ensayos realizados y el procedimiento finalmente adoptado se detallan a continuación.

6.1. Bandas de prueba. Descripción y análisis de resultados:

Se ejecutaron cuatro zonas de prueba con el fin de elegir la maquinaria más adecuada y el procedimiento de ejecución.

Se llevo a cabo a la extensión del material procedente de las excavaciones realizadas en los desmontes y parcelas del ámbito, empleando el material de la formación Peñuela con predominio de Peñuela (TPp) como materia prima fundamental. El extendido se realizó en calles paralelas sobre las que se probaron diversos espesores de tongadas, y distinta maquinaria de mezclado y de compactación.

La maquinaria para el extendido del material se encontraba compuesta por Bulldozer CATERPILLAR D9N. y motoniveladora CAT 16G



Figura 5. - Maquinaria de extendido y compactación del material

Para la mezcla se empleaba Rotavator de la marca HAMM modelo RACO 450 y para la extensión y compactación un pata de cabra de la marca CATERPILLAR modelo 825 y un compactador de rodillo liso LEBRERO II de 18.1 Tn..



Figura 6. - Maquinaria de mezcla del material con la cal

Para la compactación se empleaba rodillo pata de cabra de la marca CATERPILLAR modelo 825, y compactador de rodillo liso LEBRERO II de 18.1 Tn. Además como maquinaria auxiliar se empleaba un camión cisterna de cal con distribuidor/dosificador, una cuba de agua remolcada con tractor y un tractor con vertedera.



Figura 7. - Camión cisterna de cal con distribuidor/dosificador



Figura 8. - Tractor cuba para el transporte y el aporte de agua

Los parámetros establecidos para cada una de las bandas de ensayo se resumen en la tabla 2, y la disposición de las diferentes bandas de ensayo se esquematiza en la figura 9.

Tabla 2 - Parámetros empleados en las bandas de ensayo

Espesor tongada (cm)	% Cal añadido	Mezclado	Compactado	Nº de tongadas ejecutadas
30	0.0	N/A	Pata de cabra *	6
30	1.0, 1.5 y 2.0%	Rotavator	Rodillo liso	6
30	1.0, 1.5 y 2.0%	Pata de cabra	Pata de cabra *	6
20	1.0, 1.5 y 2.0%	Pata de cabra	Pata de cabra *	9

*La compactación realizada con Pata de Cabra se finalizaba con dos pasadas de rodillo liso para sellar la capa.

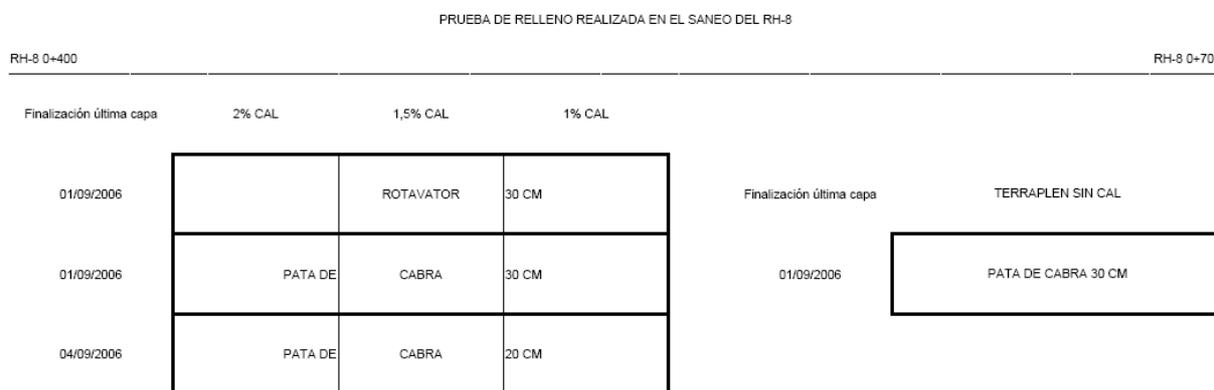


Figura 9. - Disposición de las bandas de ensayo

6.2. Suelo Base - Antes del tratamiento con cal

De acuerdo a los datos del Anejo Geotécnico del Proyecto de Construcción y a los ensayos previos realizados, la clasificación del material utilizado en las pruebas corresponde a suelos marginales debido a la plasticidad, sin que se cumplan las condiciones para ser tolerables. ($LL < 65$ ó si $65 > LL > 40$, $IP > 0.073 \times (LL - 20)$).

El resto de características, recogidas en la tabla 3, englobarían al material en el ámbito del suelo tolerable.

Tabla 3 - Características del material empleado en las bandas de ensayo

	Material Empleado
Materia orgánica	≈ 0.5%
Sales solubles	0.05% (máx. 0.12%)
Granulometrías	
Pase por tamiz 0.08 mm	18.3 al 77.4 %
Pase por tamiz 2 mm	89.2 al 77%
Hinchamiento	<3%
CBR	1.4 a 8 (100% PM)

6.3. Tratamiento de los suelos con cal:

Para formar la banda de ensayo y con objeto de mejorar las características anteriores, los suelos se trataron con 1.0, 1.5 y 2.0% de cal viva en cada una de las bandas, observándose que los parámetros más precarios del suelo sin tratar, mejoran considerablemente incluso con el contenido menor de cal (1%).

El CBR pasa a valores superiores a 30 en todos los casos. Los índices de plasticidad se reducen a valores entre 3 y 9, y en algunos casos se transforman en no plásticos. Hay que señalar que este parámetro no denota mejoras considerables al aumentar el porcentaje de cal por encima del 1.0%.

En el caso del grado de compactación, los resultados obtenidos en las diferentes bandas de prueba indican que los materiales tratados o sin tratar con cal no presentan dificultad en alcanzar el 95% del Proctor Modificado, con independencia del % de cal añadido.

Tabla 4 - Número óptimo de pasadas de compactación

Espesor tongada (cm)	Mezclado	Compactado	Nº de pasadas dobles recomendadas
30	N/A	Pata de cabra*	6
30	Rotavator	Rodillo liso	4
30	Pata de cabra	Pata de cabra*	4
20	Pata de cabra	Pata de cabra*	4

*La compactación del Pata de Cabra se finalizaba para sellar la capa con dos pasadas de rodillo liso.

En cuanto a capacidad portante, todas las tongadas tratadas con cal dieron buenos resultados en los ensayos de placa de carga obteniéndose valores que superan siempre los 30 MPa de segundo módulo de carga, cumpliendo así las prescripciones necesarias para núcleo de terraplén.

Estos resultados mejoran al aumentar el % de cal añadida y a mayor edad, debido a las características de los efectos de la cal sobre los suelos arcillosos, en los cuales se obtienen unas modificaciones de la estructura del suelo, estabilización por modificación, que se produce de forma inmediata (minuto/horas) y unas modificaciones a largo plazo debido a la estabilización por cementación que se producen a medio plazo (semanas/meses).

Las primeras conclusiones obtenidas de los resultados de las bandas de ensayo han sido que los valores que presentan los materiales no tratados con cal, en relación con hinchamientos mayores del 11% y CBR inferiores a 3, se han corregido al estabilizar los materiales con cal, por lo que sólo podrán emplearse los materiales marginales existentes en la zona, en la formación de núcleos de terraplén si se tratan con cal.

A la vista de los resultados obtenidos en cuanto a compactación y capacidad portante del terraplén ejecutado, resulta posible aceptar terraplenes ejecutados con los cuatro procedimientos ensayados. Teniendo en cuenta las exigencias de calidad marcadas en el proyecto y las necesidades de la obra en cuanto a plazos, se decidió utilizar el siguiente procedimiento para el empleo de los materiales según las calidades de los suelos empleados.

Para suelos tipo peñuela: Densidades secas entorno a 1.4 gr/cc

- Extendido del material en tongadas de 20 cm.
- Extendido de cal viva al 1.5% respecto al peso seco del suelo extendido.
- Vertido de agua sobre la cal viva con el fin de apagarla.
- Mezclado con 4 pasadas dobles del compactador pata de cabra.
- Sellado con 2 pasadas dobles de compactador liso.
- Control de densidades y humedades.

Para suelos tipo sepiolíticos: Densidades secas entorno a 1.1 gr/cc y nunca inferiores a 1,0 gr/cc.

- Extendido del material en tongadas de 30 cm.
- Extendido de cal viva al 2.0% respecto al peso seco del suelo extendido.
- Vertido de agua sobre la cal viva con el fin de apagarla.
- Mezclado con el rotavator y compactado con el rodillo liso.
- Control de densidades y humedades.

En coronación de explanada

- Empleo de suelos tipo peñuela Tpp con densidades entorno a 1.4 gr/cc
- Extendido del material en tongadas de 30 cm.
- Extendido de cal viva al 2.0% respecto al peso seco del suelo extendido.
- Vertido de agua sobre la cal viva con el fin de apagarla.
- Mezclado con el rotavator y compactado con el rodillo liso.
- Control de densidades y humedades.

Para cimientos y núcleos de terraplén, la puesta en obra se realizará con rodillo “Pata de Cabra” y con 20 cm de espesor de tongada, cuando los suelos sean peñuela y mediante rotavator cuando de tipo sepiolítico.

7. PARÁMETROS DE CONTROL DE LA CALIDAD.

Una vez establecidos los criterios de aceptación y rechazo de los materiales en origen, se determinaron las características a controlar durante la ejecución de los terraplenes, y los valores de aceptación y/o rechazo de la unidad de terraplén terminada.

Si durante la construcción aparecían defectos localizados, tales como blandones, se corregían antes de iniciar el muestreo. Se consideraba como lote de recepción, al menor que resultara de aplicar los cuatro criterios siguientes a una sola capa de suelo estabilizada:

- Quinientos metros de calzada (500 m).
- Tres mil quinientos metros cuadrados de calzada (3.500 m²).
- La fracción construida diariamente.
- La fracción construida con el mismo material, de la misma procedencia y con el mismo equipo y procedimiento de ejecución.

Se asignaron a cada lote de recepción las probetas fabricadas durante el control de ejecución que le correspondían. En los puntos donde se realizaba el control de la compactación, se determinaba el espesor de la capa de suelo estabilizado.

Los criterios de aceptación o rechazo del producto terminado fueron los siguientes:

Densidad: En cada lote, la densidad obtenida debía ser $\geq 95\%$ P.M. en el S-EST1 y $\geq 97\%$ P.M. en el S-EST2, y no más de dos muestras podían presentar resultados individuales inferiores en dos puntos porcentuales a la densidad especificada.

Los ensayos de determinación de la humedad eran de carácter indicativo y no constituían por si solos, base para aceptación o rechazo.

Resistencia: Para cada lote, la media de los índices CBR a siete días, debía ser ≥ 6 para el S-EST-1 y ≥ 12 para el S-EST-2, y ningún resultado individual podía ser inferior a dicho valor en más de un 20%.

Placas de carga: Cada tres capas de terraplén se realizaban placas de carga dinámica y cada seis capas de terraplén placas de carga estática, siendo los valores exigidos los siguientes:

- 30 MPa para núcleos de terraplén,
- 60 MPa para los 50 cm de S-EST-1
- 120 MPa para el S-EST-2.

El control de ejecución de la formación del núcleo de terraplén se ha realizado por tanto de acuerdo al croquis adjunto como figura 10.

CROQUIS PARA EL CONTROL DE NÚCLEOS DE TERRAPLEN		ENSAYOS A REALIZAR	
Nº DE TONGADA	DENSIDAD / %W	PLACAS DE CARGA DINÁMICA	PLACAS DE CARGA ESTÁTICAS
22ª	X		
21ª	X	X	
20ª	X		
19ª	X		
18ª	X	X	X
17ª	X		
16ª	X		
15ª	X	X	
14ª	X		
13ª	X		
12ª	X	X	X
11ª	X		
10ª	X		
9ª	X	X	
8ª	X		
7ª	X		
6ª	X	X	X
5ª	X		
4ª	X		
3ª	X	X	
2ª	X		
1ª	X		

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL (GR. LA, PM, CBR HL, SS Y MO. SE REALIZARÁ EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS DE MATERIAL EN LOS FRENTES DE EXCAVACIÓN)

Figura 10. - Croquis de control de ejecución de los núcleos de terraplén

Espesor: El espesor de las tongadas variaba en función del procedimiento de mezcla, siendo de 20 cm de espesor para la ejecución con rodillo de pata de cabra, y de 30 cm para la ejecución con rotavator, y no más de dos individuos de la muestra ensayada podían dar resultados que bajaran de lo especificado en un 10%.

Rasante: La rasante de la capa terminada no debía superar a la teórica en ningún punto, ni quedar por debajo de ella en más de 20mm.

A fin de realizar el seguimiento a pie de obra de todos estos parámetros se estableció un sistema que permitió a los vigilantes mediante un “check-list” el control de la ejecución de cada lote establecido con su correspondiente trazabilidad. (Ver figura 11)

FICHA DE INSPECCIÓN										REV: 1		
TÍTULO: SUELO ESTABILIZADO "IN SITU" CON CAL. (suelo estabilizado tipo S-EST1) OBRA: EL CAÑAVERAL N° OBRA: 2.905 FICHA N° 4-a REGISTRO:												
LOCALIZACIÓN										Hoja 1 de 1		
OBRA	PROYECTO	ZONA	ESPECÍFICO	CAPÍTULO	SUBCAPÍTULO	ESPECIALIDAD	SECTOR	LOCALIZACIÓN	ELEMENTO	LOTE		
296	UR											
N°	DESCRIPCIÓN OPERACIÓN	FRECUENCIA	RESPONS. S.A.C.	TIPO DE INSPECCIÓN	CRITERIO ACEPTACIÓN / RECHAZO (SÍMB. EN ÍNDICE FICHAS)		AVISO ESPERA	APTO NO APTO	V° B°	FECHA	OBSERVAC.	
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES / FORMULA DE TRABAJO												
1	Comprobación idoneidad de los materiales de la traza a emplear en la ejecución del suelo estabilizado	Al inicio y cada 100 ml.	I/L	Ensayos	Cernido acumulado(% en masa) tamices UNE -EN 933-2(mm)		P.A.					
2	Dosificación de la cal	Al inicio y cada 100 ml.	I/L	Ensayos	S-EST1: $\geq 1,5\%$ de cal en masa del suelo seco		P.A.					
EJECUCIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN												
3	Comprobación condiciones climatológicas. T° y lluvia	Cada día	I	Visual	T° $\geq 1^\circ$ C y T° $< 35^\circ$. Ausencia de lluvias intensas. Ausencia de viento fuerte.		P.A.					
4	Comprobación preparación superficie existente	100%	I	Visual	Ausencia de irregularidades, lomos o depresiones		P.A.					
5	Comprobación humedad suelo a estabilizar	2/ cada día	I/L	Ensayo			P.A.					
6	Comprobación consumo efectivo de la cal	Mínimo 2/ cada día	I/L	Ensayo	S-EST1: $\geq 1,5\%$ de cal en masa del suelo seco		P.A.					
7	Comprobación compactación	Ver programa de ensayos	I/L	Ensayo	S-EST1: $d_{media} \geq 95\%$ Proctor Modificado		P.E.					
8	Comprobación espesor	5 medidas cada (3.000m ² o 250m, medidos a lo largo del eje) meneje y bordes de perfiles transversales	I	Geométrica	Comprobación espesores no mayor de 25cm		P.A.					
9	Inspección topográfica: Cota terminación.	5 medidas cada (3.000m ² o 250m, medidos a lo largo del eje) meneje y bordes de perfiles transversales	T	Topográfica	Tolerancia cota media: por defecto: + 2 cms. por exceso: + 0 cms. Tolerancia cotas puntuales: por exceso: + 2 cms. (hasta 2 medidas) tolerancia sacuhra: ± 10 cm.		P.A.					
10	Comprobación cualidades suelo estabilizado	Ver programa de ensayos	I/L	Ensayo	S-EST1 CBR a 7 días > 6 (S-EST1) Deflexión patrón (10°-2mm) < 250 PLACA CARGA ESTÁTICA EV > 60 Mpa		P.E.					

S.A.C.: I: Inspector
L: Laboratorio
T: Topógrafo

S.A.C.: Supervisión de Aseguramiento de la Calidad
P.E: puntos de inspección en los que la obra no puede proseguir sin la aprobación de Typsa.
P.A: puntos en los que la ausencia del personal convocado no obliga la interrupción del trabajo.

N° Serie equipo topográfico que realiza la comprobación

Figura 11. - Modelo de Ficha de Inspección para la ejecución de los suelos estabilizados

8. PLAZOS Y RENDIMIENTOS.

Los rendimientos obtenidos con el sistema constructivo adoptado han sido elevados llegándose a superar, durante la fase punta de los trabajos, los 30.000 m³ de excavación diarios de los que aproximadamente el 50% se emplearon como material de base para los estabilizados con cal de la formación de viales de la urbanización, y el otro 50% se empleo en el terraplenado en las pantallas acústicas situadas en el perímetro de la zona residencial. Estos trabajos se prolongaron durante cerca de 15 meses.

9. PROBLEMATICA DURANTE EL DESARROLLO DE LOS TRABAJOS Y SU RESOLUCIÓN.

La ejecución de los trabajos no ha estado exenta de algunos problemas. La aparición de bolos de silex, asociada al contacto entre las capas de peñuela y las de sepiolita, ha sido una constante a lo largo de toda la construcción de la urbanización. Como solución se

procedió a intercalar entre la fase de extendido, y previo al paso de la maquinaria de estabilización, un tractor con una vertedera especial con el fin de eliminar dichos bolos. Esta operación se hizo fundamental debido a las averías mecánicas que provocaban los bolos de sílex en la maquinaria de estabilización.

Durante la realización de las bandas de ensayo, y dado el volumen de cal que iba a ser necesario emplear para la formación de los terraplenes, la dirección de obra decidió el empleo de cal viva para la estabilización de los materiales. Esta elección se convirtió en un factor clave que permitió la ejecución de los trabajos de movimiento de tierras durante los meses más húmedos del año.

Se llevó a cabo la formación necesaria del personal que participaba en los trabajos, y con las correspondientes protecciones tanto en materia de seguridad y salud, como medio ambientales, tales como el uso de las protecciones individuales para el personal y la restricción de los trabajos en los días de fuerte viento, el uso de este material se llevo a cabo sin incidencias.

CONCLUSIONES

La normativa española ha evolucionado durante los últimos años para permitir el uso de materiales marginales en la ejecución de las grandes obras de movimiento de tierras. En esta línea, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento (PG3), permite en la actualidad el uso de materiales clasificados como marginales. Estos materiales, con un tratamiento adecuado y un cuidadoso procedimiento de puesta en obra, son perfectamente capaces de resistir las sollicitaciones proyectadas de forma duradera.

En el caso de las arcillas existentes en el ámbito de la U.Z.P. 2.01 “El Cañaveral”, este material, que en otro tiempo hubiera sido desechado, obligando a la sustitución del mismo, con los grandes costes económicos y medioambientales que supone en una actuación de estas dimensiones, actualmente ha sido empleado de forma exitosa aplicando el procedimiento específico que se ha expuesto en esta comunicación.

Durante la ejecución de las obras, la combinación de procedimientos antiguos, como es la adición de cal a las arcillas para mejorar sus propiedades, unido a una mejora en el conocimiento y en la normativa de aplicación, ha permitido que con una aportación del 2% de cal respecto al peso seco del suelo extendido, se hayan podido construir más de dos millones y medio de metros cúbicos de terraplenes para los viales de una urbanización que albergará una población de unos 45.000 habitantes.

En una realidad social en la que los problemas medioambientales crecen y la actividad humana los potencia, cualquier solución que tienda a reducirlos debe convertirse en una prioridad. En el caso de la U.Z.P. 2.01 “El Cañaveral” estas premisas se incorporaron desde la misma fase del proyecto, con la utilización de los materiales marginales estabilizados en la formación de los viales, y con el uso del material no estabilizable en la formación de las pantallas antirruído perimetrales que aíslan acústica y visualmente a las futuras viviendas del sector.

El hecho de contar con un importante volumen excedentario de material en el balance de movimiento de tierras, lejos de ser un problema como inicialmente pudiera parecer, se convirtió en un aliado excelente al poder dotar a toda la zona residencial de unas motas

que han formado una perfecta pantalla natural para las viviendas frente al ruido del tráfico de las autopistas circundantes.

La solución adoptada en el movimiento de tierras de la urbanización ha tenido grandes e importantes repercusiones económicas, como es el ahorro en la inversión necesaria, del entorno de 30 millones de euros, al no tener que aportar suelos procedentes de préstamos que cumplieran con las características de tolerables o adecuados, para la ejecución de los viales.

Además, con la utilización de los materiales existentes en el ámbito se han reducido drásticamente los costes ambientales de la actuación, al eliminarse los transportes de material a vertedero y la utilización de los mismos para el material sobrante, y reducirse el transporte de materiales procedentes de préstamo a los necesarios para el aporte del material de las zanjas de los servicios

REFERENCIAS

1. Ayuntamiento de Madrid. Gerencia Municipal de Urbanismo. Dirección de Servicios del Plan. (Marzo, 2002). Plan Especial de Infraestructuras del Sureste de Madrid, pp 4-5
2. Ministerio de Fomento. (2002), Orden Circular 10/2002
3. Ministerio de Fomento, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG3