

Comportamiento de cenizas volantes en terraplenes experimentales

FERNANDO PARDO DE SANTAYANA (*)

CARLOS OTEO (*)

RESUMEN. Se ha llevado a cabo un estudio sobre las características geotécnicas de varios tipos de cenizas volantes producidas en España y de su comportamiento utilizadas como material de terraplén. Se ha desarrollado una amplia investigación en laboratorio, parte de cuyos resultados se presentan en este artículo, y se han construido, asimismo, varios pequeños terraplenes con ceniza volante de la central de Lada (Asturias) para examinar el comportamiento *in situ* del material. Se ha estudiado especialmente la influencia de la energía de compactación y del contenido de humedad sobre la densidad seca y la resistencia de las cenizas compactadas. Los resultados de los ensayos en laboratorio muestran que se produce una cierta degradación del material cuando se compacta con energías altas. Energías de compactación relativamente suaves dieron buenos resultados en los trabajos *in situ*. Se describen al final del artículo otras características del comportamiento *in situ* de las cenizas volantes de Lada durante la construcción de los terraplenes.

BEHAVIOR OF FLY ASH IN EXPERIMENTAL EMBANKMENTS

ABSTRACT. A study has been carried out of the geotechnical characteristics for several types of Spanish fly ash, and their behavior when used as compacted fill material. A wide range of laboratory research work was performed, and some of the results are shown in this paper. Several small embankments were constructed using fly ash from the Lada Power Plant, with a view to examining their *in situ* behavior. Emphasis has been placed on the influence of compaction energy and water content on the dry density and strength of the compacted material. The laboratory results showed that some degradation of the material takes place when it is compacted with high energies. Relatively light compaction energies gave good results for the *in situ* works. Other characteristics of Lada fly ash field behavior in the construction of experimental embankments, are described at the end of the paper.

INTRODUCCION

El laboratorio de Geotecnia del CEDEX ha llevado a cabo una investigación sobre la utilización de cenizas volantes españolas en la construcción de terraplenes y rellenos compactados. Un porcentaje alto de estos productos residuales se destina todavía en España a vertedero. Se ha realizado un estudio en laboratorio sobre las características geotécnicas de varias muestras de cenizas volantes producidas en las centrales térmicas de Los Barrios, Puertollano y Lada, y se han construido una serie de pequeños terraplenes con ceniza volante de Lada para poder analizar el comportamiento *in situ* de estos materiales, especialmente la influencia de la compactación sobre la calidad del relleno.

INVESTIGACION EN LABORATORIO

Seis muestras de cenizas volantes se han utilizado en la investigación en laboratorio; algunas de sus características básicas y de compactación se muestran en la tabla 1. La resistencia mecánica del material compactado se ha analizado mediante ensayos de rotura a compresión simple y triaxiales. Se han estudiado, asimismo, la deformabilidad, los cambios volumétricos, la permeabilidad, el comportamiento frente a esfuerzos dinámicos y la erosionabilidad de las cenizas compactadas, y la evolución de estas propiedades con el tiempo desde la compactación, así como la influencia de aditivos.

Las seis cenizas, por su composición química (tabla 2),

son todas del tipo sílico-aluminoso. El contenido de cal libre es pequeño, excepto en la muestra de ceniza Los Barrios CM, en la que alcanza el 1 %, lo que le proporciona un comportamiento claramente autoendurecedor.

La figura 1 muestra las curvas de compactación Proctor normal de las seis cenizas. Las curvas del Proctor modificado son similares, en cuanto a forma, con un incremento de la máxima densidad seca entre el 2 y el 9,5 %. El aspecto de estas curvas es también parecido al que manifiestan cenizas volantes de otros países, y, comparadas con las de los suelos naturales, presentan entre otras las siguientes características: curvas relativamente planas; hay un máximo de densidad seca, al igual que en los suelos de grano fino; el valor de la máxima densidad seca es relativamente bajo, debido al bajo peso específico de las partículas, a su forma y a la distribución granulométrica; la gama de valores de la máxima densidad seca y de la humedad óptima es amplia, incluso para muestras procedentes de la misma central. No se ha observado, por otra parte, una relación clara entre la máxima densidad seca y el peso específico de las partículas, al menos con las diferentes cenizas analizadas. Se ha visto, además, que los puntos de máxima densidad seca, en ensayos de apisonado utilizando diferentes moldes y energías, corresponden a grados de saturación por debajo del 85 %, e incluso del 75 % en algunos casos.

Los valores de la resistencia a compresión simple de muestras de los seis tipos de ceniza, compactadas en Proctor normal, han oscilado entre 100 y 180 kN/m². Para una energía de compactación determinada, se obtiene un máximo de resistencia correspondiente a un contenido de humedad pró-

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

CENIZA VOLANTE	GRANULOMETRIA			PESO ESPECIFICO	PROCTOR NORMAL		PROCTOR MODIFICADO	
	< 74 μ	< 20 μ	< 2 μ		γ_d (g/cm ³)	W_{opt} (%)	γ_d (g/cm ³)	W_{opt} (%)
LOS BARRIOS CCS	89	46	0	2,24	1,09	38	1,18	32
LOS BARRIOS CCE	90	25	0	2,39	1,28	27	1,37	22
LOS BARRIOS CM	89	51	2	2,26	1,25	27,5	1,36	22,5
PUERTOILANO	84	41	0	2,07	1,25	22	1,31	19,3
LADA CCF	86	42	2	2,13	1,20	27,7	1,25	24,1
LADA CSF	89	51	2	2,37	1,50	17,5	1,53	17,4

TABLA 1. Algunas características de identificación y de compactación de las cenizas volantes.

CENIZA VOLANTE	COMPONENTE (%)							PERDIDA AL FUEGO (%) (1.000°)	HUMEDAD (%) (105-110°)	CAL LIBRE (%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂			
PUERTOILANO	61,7	25	5,9	1,3	0,72	0,15	0,78	2,1	0,13	0,06
LOS BARRIOS CCS	43,4	32,3	6,9	7,8	2,0	0,7	1,6	5,6	1,1	0,19
LOS BARRIOS CCE	39,3	24,3	15,3	8,4	2,8	1,2	0,94	3,8	1,4	0,16
LOS BARRIOS CM	44,5	32,9	4,0	7,8	2,3	0,55	1,6	3,8	0,08	0,94
LADA CCF	47,1	25,0	7,4	3,5	1,7	0,32	0,81	6,9	13,0	0,28
LADA CSF	40,7	28,3	7,8	3,2	1,9	0,37	1,0	1,5	0,46	0,25

TABLA 2. Composición química de las cenizas volantes.

ximo al óptimo de compactación. Por debajo de este óptimo, la resistencia decae suavemente. Para contenidos de humedad mayores que el óptimo, la resistencia decrece más bruscamente. Cuanto mayor es la energía de compactación, ma-

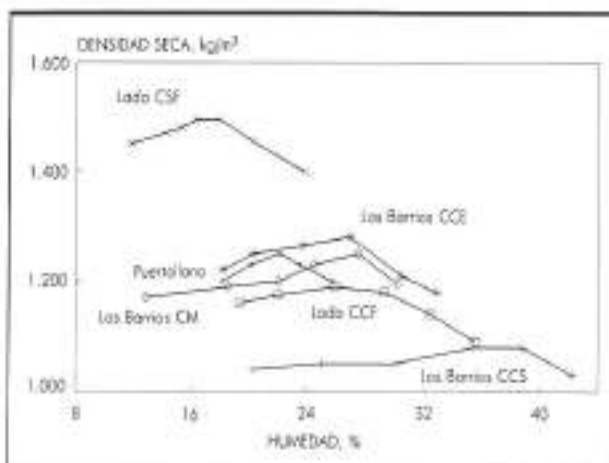


FIGURA 1. Curvas de compactación Proctor normal de los seis tipos de ceniza volante.

yor resistencia se obtiene del lado seco del óptimo de humedad; sin embargo, del lado húmedo esto no es tan evidente.

Todas las muestras de ceniza volante compactadas (en Proctor normal), con la excepción de la ceniza Los Barrios CM, han mostrado un moderado incremento, con el tiempo, de la resistencia a compresión simple. En cuatro semanas, normalmente, el valor de la resistencia dobla el valor inicial; y al cabo de seis meses, llega a ser del orden del triple del inicial (300 a 400 kN/m²), para prácticamente estabilizarse posteriormente. Los aumentos de resistencia de la ceniza Los Barrios CM han resultado mucho más notable (desde los 150 kN/m² de las probetas recién compactadas —en Proctor normal— hasta 750 kN/m² a los 28 días, y 2.440 kN/m² al cabo de un año). Las muestras ensayadas a distintas edades fueron compactadas en molde de 1.000 cm³, recubiertas posteriormente con parafina y mantenidas en un ambiente con humedad constante durante el tiempo especificado, al cabo del cual se tallaban las probetas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura para los ensayos de rotura.

En la figura 2 pueden verse los valores de la resistencia a compresión simple a los 0, 7 y 28 días de las muestras de ceniza Los Barrios CCS compactados con energía Proctor modificado y diferentes humedades.

La relación entre resistencia a compresión simple, densi-

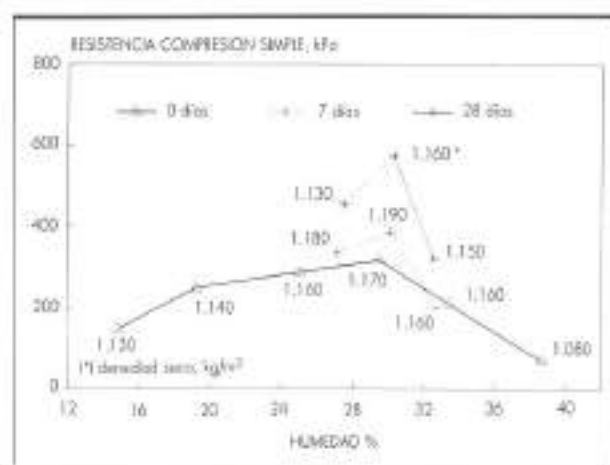


FIGURA 2. Resistencia a compresión simple a los 0, 7 y 28 días de los probetas de ceniza Los Barrios CCS compactadas con la energía Proctor modificada y diferentes contenidos de humedad.

dad seca y tiempo, puede verse en la figura 3. Estos resultados corresponden a las probetas de ceniza volante de Puertollano compactadas con diferentes humedades y con energías de compactación Proctor normal o Proctor modificado. Hay una clara relación entre la resistencia y la densidad seca para cada edad, y puede observarse un cierto grado de endurecimiento puzolánico hasta un tiempo máximo de seis meses. Sin embargo, la banda correspondiente a probetas recién

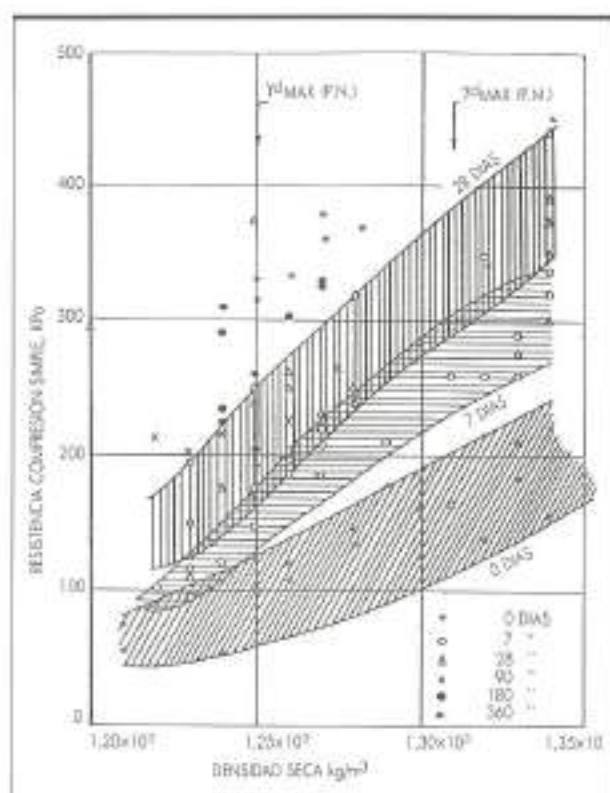


FIGURA 3. Resistencia a compresión simple de ceniza volante de Puertollano compactada, en función de la densidad seca y la edad.

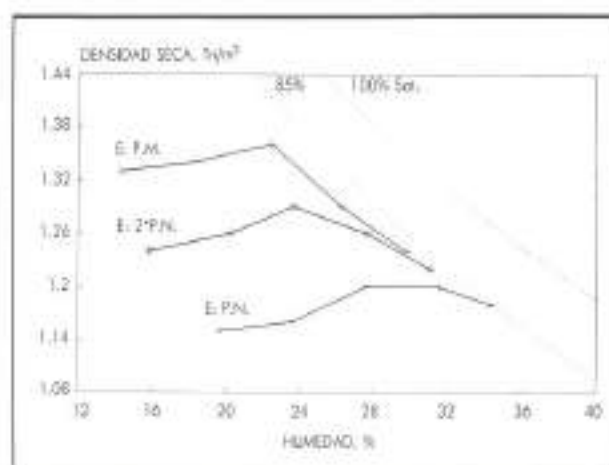


FIGURA 4. Curvas de compactación de la ceniza volante Los Barrios CM correspondientes a las energías del Proctor normal, dos veces la del Proctor normal y Proctor modificado.

compactadas manifiesta una dispersión considerable, debida, al menos parcialmente, a diferencias en el contenido de humedad y en la energía de compactación. A este respecto cabe mencionar los resultados obtenidos por Leonard et al. (1982), en ensayos de compactación Proctor modificado sobre muestra fresca y reutilizada de una ceniza volante de Indianápolis: las curvas de compactación, de la muestra fresca y de la muestra vuelta a utilizar, son diferentes, evidenciando, pues, una degradación de la ceniza durante la compactación.

La figura 4 muestra las curvas de compactación de la ceniza volante Los Barrios CM. Las probetas, de 3,81 cm de diámetro y 7,65 cm de altura, se compactaron con tres energías diferentes y cinco contenidos de humedad por energía. La resistencia de estas probetas, expresada en términos de un medio del desviador de rotura en ensayo triaxial sin drenaje (UU) con presión de confinamiento de 100 kN/m², puede verse en la figura 5. Se observa que con contenidos de humedad altos se obtienen resistencias más elevadas con las

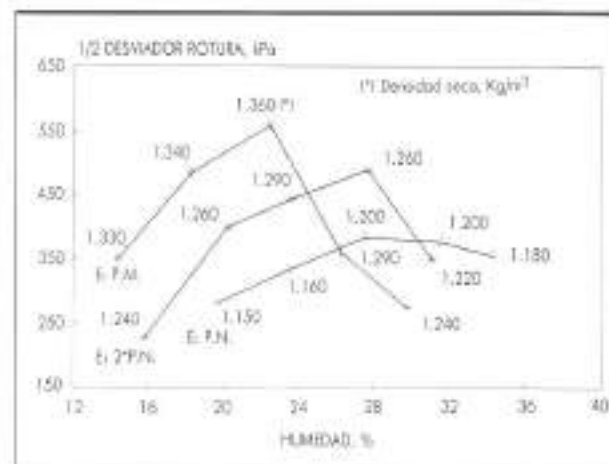


FIGURA 5. Relación entre un medio del desviador de rotura, en ensayo triaxial UU con presión de confinamiento de 100 kPa, y el contenido de humedad y energía de compactación de la probeta (ceniza volante Los Barrios CM).

energías de compactación más bajas. Parece, pues, que cuando el contenido de humedad es alto, un esfuerzo de compactación elevado causa una rotura de las partículas de ceniza volante, en su mayor parte de forma esférica y huecas, aumentando con ello el índice de huecos; se produce también una rotura de las agregaciones de partículas, lo cual disminuye la resistencia friccional. Esto conduce a resistencias menores cuando el esfuerzo de compactación es mayor, incluso a pesar de que la densidad seca es más elevada.

Cuando los contenidos de humedad son bajos, un valor más alto de la cohesión aparente, debida a la succión, puede inducir un menor deterioro de las partículas.

TERRAPLENES EXPERIMENTALES

Siete pequeños terraplenes de dos metros de altura se han construido con ceniza volante en la central de Lada. Se han compactado de diferente forma, realizándose en ellos ensayos de control *in situ*, básicamente determinaciones de densidad y humedad, ensayos de placa de carga y ensayos de huella. El lugar para su construcción fue el depósito de cenizas de Cotorraso (Asturias), utilizado como escombrera para los productos residuales de la central de Lada. El terreno de apoyo de los terraplenes estaba formado por cenizas volantes y de hogar compactadas y endurecidas con el tiempo, y con alta capacidad drenante.

La ceniza volante, transportada en camiones abiertos, con humedades entre el 8 y el 13 %, se extendía sin mayores problemas con una pala cargadora de 26 t y una empujadora de 20,5 toneladas. La compactación se llevaba a cabo, primero, mediante varias pasadas de la pala empujadora, barriendo en cada pasada toda la superficie de la tongada con su huella (sistema utilizado satisfactoriamente para compactar el depósito), y, posteriormente, mediante pasadas de rodillo vibratorio de 8 toneladas de peso estático. Para controlar el contenido de humedades en obra, las muestras se secaban mediante un hornillo en un recipiente cerrado. El método de

la arena (NLT-109) se utilizó para determinar la densidad *in situ*.

Las propiedades de la ceniza utilizada en los terraplenes pueden encuadrarse entre las de las muestras Lada CCF y Lada CSF estudiadas en laboratorio. Se utilizaron en los distintos terraplenes espesores de tongada de 25, 35 y 50 cm, así como diferentes contenidos de humedad y esfuerzos de compactación. En cada tongada par, se llevaron a cabo ensayos de placa de carga (DIN 18134) y de huella (SNV 670-365). La figura 6 muestra una planta de los rellenos T-6 y T-7 y de los ensayos llevados a cabo sobre una de las tongadas.

El contenido de humedad se ajustó mediante regado de la tongada extendida; este sistema condujo a cierta dispersión en los resultados. Seis terraplenes se compactaron con cuatro pasadas de la empujadora de cadenas y diferente número de pasadas del rodillo vibratorio por tongada. El terraplén T-6 se compactó sólo con cuatro pasadas de la empujadora. Los resultados de las determinaciones de densidad seca en los rellenos T-6 y T-7 pueden verse en la figura 7, y se comparan con las curvas de compactación en laboratorio de las mismas cenizas. Para el T-6, el 75 % de los puntos controlados dieron una densidad seca y una humedad comprendidas entre las curvas Proctor normal y Proctor modificado. El contenido de la humedad osciló entre el 16 y el 21 %. Se observa una tendencia, en los resultados de las determinaciones en el T-6, a formar una curva de compactación, cuya densidad máxima sería de 1.460 kg/m^3 (por lo tanto, entre los 1.440 kg/m^3 del Proctor normal, y los 1.490 kg/m^3 del modificado), correspondiendo a una humedad óptima del 18 %. Esta curva correspondería, pues, a la energía de compactación utilizada en este terraplén (cuatro pasadas de la empujadora).

El terraplén T-7 se compactó con cuatro pasadas de la pala empujadora y cuatro del rodillo vibratorio por tongada, se obtuvo un máximo de densidad de 1.490 kg/m^3 , pero los resultados fueron más irregulares que en el T-6.

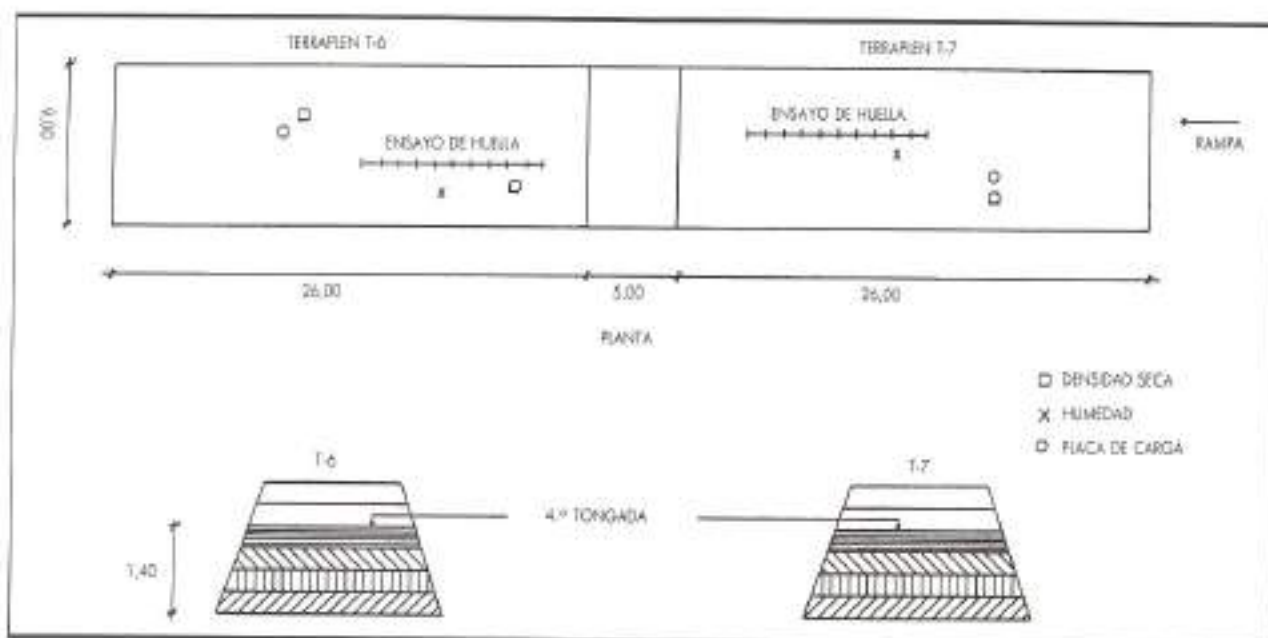


FIGURA 6. Croquis de los terraplenes T-6 y T-7 con los ensayos *in situ* realizados en una de sus tongadas.

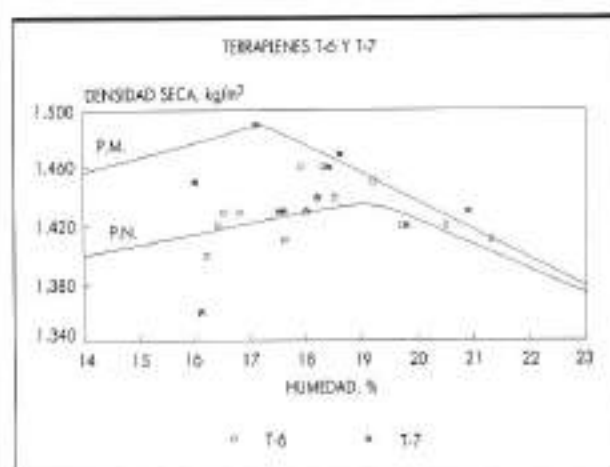


FIGURA 7. Densidades secas *in situ* determinadas en los terrapienes T-6 y T-7.

Un esfuerzo de compactación relativamente ligero, como el usado para el T-6, dio resultados bastante satisfactorios. La compactación adicional proporcionada por el rodillo dio resultados más heterogéneos y más sensibles al contenido de humedad.

Algunas conclusiones relativas al comportamiento *in situ* de estas cenizas volantes pueden resumirse en lo siguiente:

- Las cenizas volantes de Lada no retienen fácilmente el contenido óptimo de humedad. La permeabilidad del relleno de cenizas es mayor que la determinada en laboratorio, siendo ésta de 10^{-7} a 10^{-6} m/seg.
- La tongrada superficial de los rellenos de ceniza es altamente sensible a la erosión, tanto en tiempo seco como con lluvias intensas: la densidad seca del material compactado disminuye en estos casos, y el material pierde resistencia.
- Tanto los ensayos de placa de carga como los de huella resultan de utilidad para controlar la calidad de la ceniza volante compactada. Sin embargo, los ensayos de huella se ven influidos en gran medida por las condiciones meteorológicas si se produce un retraso entre la compactación y el ensayo.
- La ceniza volante de Lada bien compactada, con una densidad seca próxima a, o entre, los máximos Proctor normal y modificado, da valores del módulo E_{v2} , del ensayo de placa de carga, por encima de los 60 MPa, e incluso de

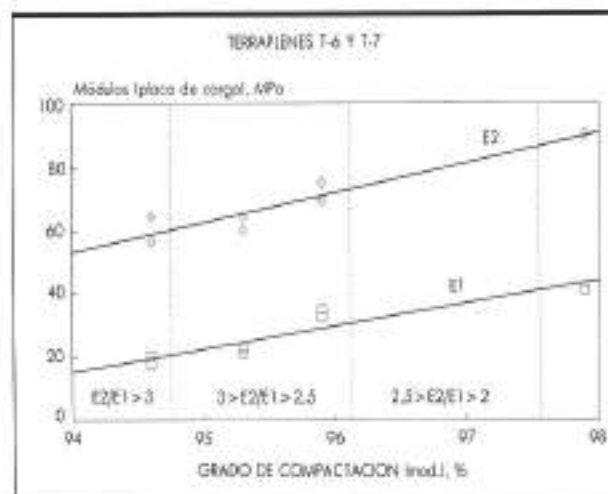


FIGURA 8. Relación entre los módulos de los ensayos de placa de carga y el grado de compactación.

90 MPa. La razón E_{v2}/E_{v1} varía entre 2 y 3.5; los valores más bajos se corresponden bien con las densidades secas más altas (véase fig. 8).

- Además de los problemas causados por el polvo en tiempo seco, se observan problemas de erosión por escorrentía en pendientes, incluso suaves.

Finalmente, volviendo a la cuestión de la compactación, no parece conveniente utilizar energías elevadas para compactar la ceniza volante en obra, pues esto puede conducir a un deterioro del material por rotura de las partículas. Sin embargo, la calidad del material en obra debe controlarse, en principio, mediante la densidad seca, y en muchos casos mejorará con el tiempo, debido a un cierto grado de endurecimiento puzolánico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Carreteras y a don José A. Hinojosa el apoyo prestado y la financiación para llevar a cabo este trabajo, así como las facilidades proporcionadas por la compañía Eléctrica de Langreo, S. A.

REFERENCIAS

- LEONARD, G. A. y BAILEY, B. (1982). «Pulverized Coal Ash as Structural Fill». *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, Vol. 108, N. GT4, abril.