

TERRAPLÉN EXPERIMENTAL CONSTRUIDO CON NEUMÁTICOS TROCEADOS

*Herminia Cano, José Estaire y Rafael Rodríguez
Laboratorio de Geotecnia - CEDEX*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el empleo de materiales reciclados en obra civil está sometido en la normativa nacional a las mismas prescripciones técnicas que los materiales naturales; esto conlleva a que en la práctica habitual sea difícil el empleo de los mismos. Para fomentar el empleo de estos materiales y facilitar a las distintas administraciones su promoción, parece necesario disponer de documentos, recomendaciones o normativas específicas que regulen las condiciones de utilización, tanto técnicas como medioambientales, de cada posible uso.

En este sentido, el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, junto con la Dirección General de Carreteras y otras Administraciones Públicas, viene trabajando en los últimos años en estudios, trabajos de investigación y caracterización geotécnica para la búsqueda de aplicaciones o aprovechamiento de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU). Estos trabajos están encaminados no solo al estudio de nuevos campos de aplicación, sino también a impulsar experiencias piloto que permitan validar el uso correcto de estos materiales.

El objetivo que se persigue es elaborar documentos técnicos que recojan las recomendaciones para el empleo de estos materiales y regulen todos los aspectos técnicos y medioambientales inherentes al empleo concreto de los mismos. Se pretende impulsar la conversión de los mismos en verdaderas materias primas secundarias al menor coste posible y con las mayores garantías; en definitiva se trata de “convertir un residuo en un recurso”, objetivo este que recoge tanto el Real Decreto 1619/2005 “Sobre la gestión de neumáticos fuera de uso” como la legislación española que se está trasponiendo de las nuevas directivas europeas sobre residuos.

En el marco de este compromiso, el Laboratorio de Geotecnia ha promovido, en colaboración con la iniciativa privada, un proyecto de I+D financiado por el CDTI, para llevar a cabo una experiencia piloto de ejecución de varias secciones de terraplén construidas con NFU troceado y con mezclas de NFU y suelo. El Proyecto, denominado “Incorporación de neumático troceado como materia prima en la construcción de rellenos” se lleva a cabo a través de un consorcio de empresas del que forman parte Sacyr, Cemosá, Labinker y Signus - como empresa gestora de NFU. Este proyecto tiene entre sus objetivos comprobar y verificar que las estructuras ejecutadas con NFU son consistentes, estables en el tiempo, física y químicamente, duraderas, resistentes, y que el NFU troceado, con y sin mezcla de suelo, puede ser un sustitutivo adecuado al relleno con materiales clásicos.

Cuando se emplean materiales no convencionales, se requiere la ejecución de bandas de prueba previas a la puesta en obra de los mismos, con el fin de poder definir a la luz de los resultados las condiciones óptimas de compactabilidad. Este es el caso de los NFU, en el que, como parte de las tareas iniciales del Proyecto, se han definido y redactado las condiciones técnicas para la realización de bandas de prueba con NFU troceados sin mezclar y con mezcla de suelo, así como para el control de las mismas.

2. TRABAJOS DE EJECUCION DE LAS BANDAS DE PRUEBA

Previo al inicio del trabajo se redactaron unas pautas técnicas para llevar a cabo las pruebas de compactabilidad de NFU una vez revisada la normativa y legislación vigente que afecta al aprovechamiento de los NFU así como, la existente en otros países con mayor tradición y experiencia en materia de aprovechamiento de NFU.

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

consideró de interés controlar la granulometría de los NFU y del material tipo suelo a mezclar con NFU y aspectos en relación a la preparación de la mezcla y su control.

De acuerdo con las recomendaciones establecidas, se llevaron a cabo cuatro bandas de prueba de 4 m de anchura y 20 m de longitud, dispuestas en una superficie adecuadamente preparada para ello y empleando los materiales, (NFU y suelo) previamente preparados y acopiados. Las características básicas de cada una de las bandas realizadas se indican en la Tabla 2.1.

Tabla 1: Características de diseño de las bandas de prueba

Banda	Compactador	Velocidad (km/h)	Espesor de tongada	Nº de tongadas
NFU	Rodillo liso de 93 kN con vibración	1,5	40 ± 10 cm	4
Mezcla NFU-suelo seleccionado	Rodillo liso de 93 kN con vibración	1,5	40 ± 10 cm	1
NFU	Bulldozer	3,6	40 ± 10 cm	3
Mezcla NFU-suelo marginal	Rodillo liso de 93 kN con vibración	1,5	40 ± 10 cm	3

Los materiales se acopiaron en una superficie próxima a la explanada de ensayo, unos días antes del comienzo de las bandas, formando montones alineados con una altura inferior a 4 m. Previamente se había limpiado y regularizado la superficie y se había extendido una capa de unos 25 cm de material granular para evitar el contacto y posible contaminación de los NFU con el terreno natural subyacente. En total se acopiaron 900 m³ (386,5 t) de NFU troceados y 150 m³ de suelo marginal para las mezclas.

De forma previa al comienzo de las bandas de compactación, se preparó la explanada de ensayo regularizando la superficie y extendiendo unos 30 cm de suelo seleccionado. A continuación se compactó para obtener una densidad mínima del 95% del Próctor Modificado. Posteriormente se comprobó la calidad de la superficie realizando dos placas de carga estática cuyos resultados superaron los 60 MPa mientras que el cociente entre Ev_1 y Ev_2 fue superior a 2,2. Con estos resultados se pudo descartar en este estudio de la compactabilidad de NFU el cimiento como causa de posibles incidencias y asentos.

La ejecución de las bandas de NFU se realizó volcando los materiales, extendiéndolos y regularizándolos con bulldozer en tongadas de unos 40 cm de altura. La altura de tongada se controló con barras metálicas marcadas a cada lado de las bandas y también, midiendo con cinta métrica. Para las bandas ejecutadas con mezcla de suelo y NFU se extendió primero una capa de NFU de 20 cm de altura y luego una de suelo procediendo al mezclado in situ con la ayuda del cazo grande. Una vez conseguida una mezcla homogénea ésta se extendió con la pala del bulldozer. Este proceso se puede ver en las fotografías nº 1.



Fotografía 1: Ejecución de las bandas de prueba de NFU mezclado con suelo

El control de la compactación se llevó a cabo mediante topografía, controlando 20 puntos de una malla previamente diseñada, de 2 x 18 m. Los puntos para el control se colocaron en el centro de la banda a los 5, 7, 9, 11, 13 y 15 m de la longitud de su eje longitudinal medio y a los 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16 m de la longitud de la banda, separados 1 m del eje central. Además, se establecieron líneas de control en el suelo a ambos lados de las bandas para el control topográfico de la explanada.



Fotografía 2: Operaciones de control de topografía

En la Tabla 2 se recogen las pasadas de compactador en las que se tomaron lecturas topográficas y en la Figura 2 se muestra la distribución de los puntos y la numeración asignada.

Tabla 2: Condiciones experimentales de las cuatro bandas de prueba

Material	Compactador	Tongada	Espesor tongada	Pasadas de control ⁽¹⁾
NFU	Rodillo (93 kN)	1ª	30,0 cm	0, 3 y 6
		2ª	38,8 cm	0, 3, 6 y 9
		3ª	32,7 cm	0, 3, 4, 6 y 9
		4ª	41,5 cm	0, 3, 4, 5, 6 y 9
NFU	Bulldózer (265 kN)	1ª	30,0 cm	0, 3, 5 y 8
		2ª	43,4 cm	0, 3, 6 y 9
		3ª	37,5 cm	0, 3, 6 y 9
NFU - suelo seleccionado	Rodillo (93 kN)	1ª	42,0 cm	0 y 3
NFU - suelo marginal	Rodillo (93 kN)	1ª	43,0 cm	0, 3, 6 y 9
		2ª	39,0 cm	0, 3, 6 y 9
		3ª	35,0 cm	0, 3, 4, 5 y 9

(1) Ida y vuelta del compactador en cada parte de la superficie de la banda

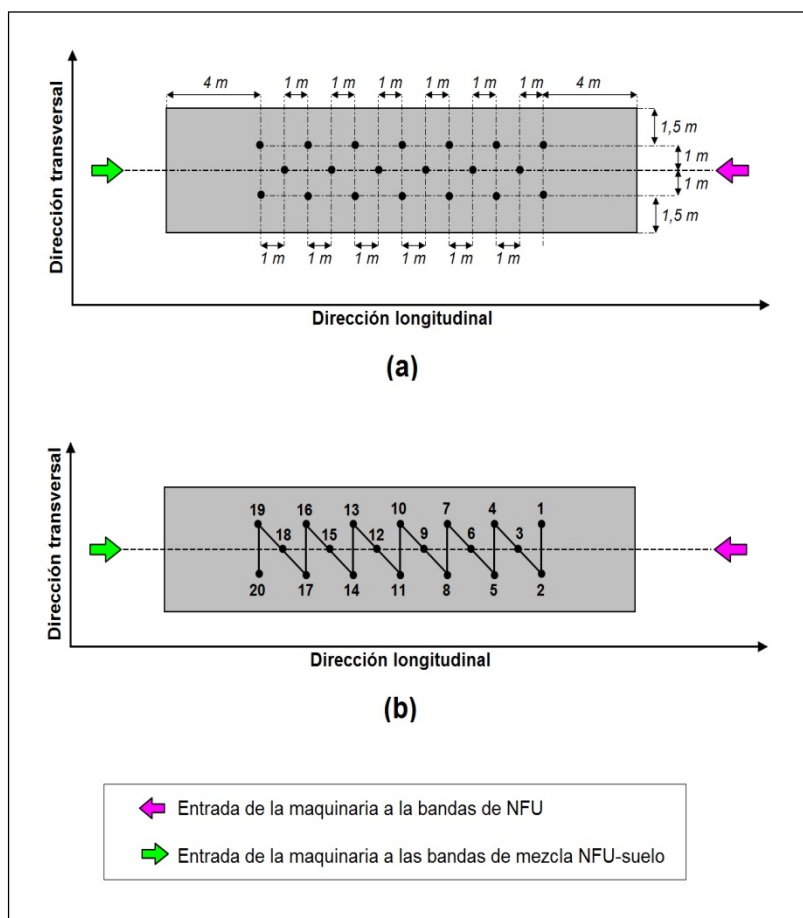


Figura 2: Disposición de los puntos de control de las tongadas (a) y su numeración (b)

En la Fotografía nº 3 se muestra una vista general de las cuatro bandas al finalizar su ejecución.



Fotografía 3: Vista general de la explanada con las cuatro bandas de prueba.

Una vez alcanzada la altura final de las bandas y finalizado el control topográfico se hicieron ensayos estáticos de carga con placa de 600 mm y dinámicos con placa de 300 mm. Además se ejecutó una calicata en cada una de las bandas de aproximadamente 0,5 x 0,5 x 0,5 m para controlar la densidad in situ. Los materiales extraídos de las calicatas se pesaron en laboratorio mientras que el volumen se midió con agua, colocando previamente un geotextil, con arena calibrada y tomando distintas medidas con cinta métrica para calcular analíticamente el volumen de la misma como tronco de pirámide. Transcurridas unas semanas se realizaron 60 ensayos de carga con placa dinámica de 300 mm, 20 en cada una de las tres bandas finalizadas y tres ensayos estáticos de carga con placa de 600 mm, una en cada de las bandas.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos se analizaron individualmente para cada una de las cuatro bandas haciendo un estudio pormenorizado de la evolución de los asientos sufridos por los materiales para diferentes pasadas de compactador de cada una de las tongadas extendidas. Los resultados se representaron en gráficos recogiendo los asientos de los 20 puntos de control para la última pasada en la que se tomaron medidas, en cada una de las tongadas extendidas.

En las figuras 3 y 4 se muestran los gráficos de asientos para el caso de la banda de prueba de NFU sin mezclar, compactadas con rodillo liso vibratorio y con bulldozer, y, en la figura 5 el caso de NFU sin mezclar compactado con bulldozer. No se recoge el caso de NFU mezclado con suelo y compactado con bulldozer porque no se completó la misma.

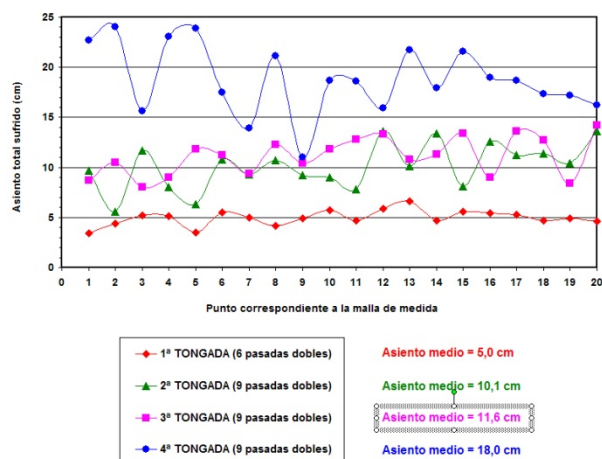


Figura 3: Asientos totales de los puntos de control en cada tongada. Banda de NFU sin mezclar compactada con rodillo liso.

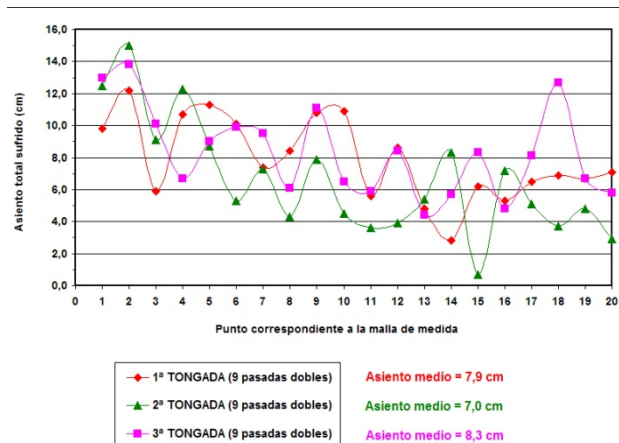


Figura 4: Asientos totales de los puntos de control en cada tongada. Banda de NFU con material marginal compactada con rodillo liso.

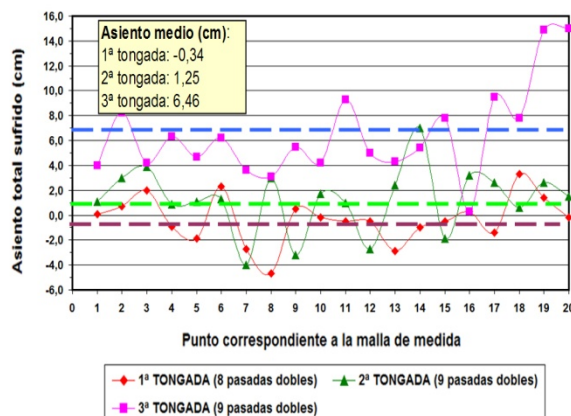


Figura 5: Asientos totales de los puntos de control en cada tongada. Banda de NFU sin mezclar compactada con bulldozer.

Como puede observarse en las figuras 3 y 5 la dispersión de los resultados crece con el número de tongada, (los asientos sufridos por la primera tongada son claramente más uniformes que en el resto de las tongadas, debido probablemente a que esta primera tongada apoya sobre un cimiento firme) hecho que no se observa en el caso de los NFU mezclados donde la fuerte dispersión de datos es similar en todas las tongadas.

En términos de asientos, el valor medio en el caso de NFU sin mezclar compactado con rodillo liso resultó ser: 5; 10,1; 11,6 y 18 cm respectivamente para cada una de las cuatro tongadas en las que se compactó, lo que en términos de deformación vertical acumulada referida a todo el espesor de tongada, resulta de 16,7% 25,9%, 33,7% y 45,3% respectivamente. El asiento total medido fue de 44,7cm, para una altura inicial total de 143 cm, lo que corresponde a una deformación vertical del 31,2%. Con estos resultados se puede indicar que el esfuerzo de compactación se extiende claramente a las tongadas subyacentes, ya que éstas también sufren asientos cuando se produce la compactación de una capa superior.

Para el caso de los NFU sin mezclar compactados con bulldozer los asientos medios medidos resultaron ser claramente inferiores a la banda compactada con rodillo liso, con valores de -

0,34; 1,25 y 6,5 cm respectivamente para cada una de las 3 tongadas en que se compactó. Los asientos negativos, indicativos de un esponjamiento del material, concuerdan con las observaciones que pudieron hacerse durante el proceso de compactación en el que se vio que los trozos de NFU eran arrollados y levantados al paso de los dientes de las cadenas del bulldozer, quedando la superficie final muy irregular.

Para el caso de los NFU mezclados con suelo marginal, los asientos medios por tongada resultaron ser 7,9; 7 y 8,3 cm, lo que corresponden a unas deformaciones de 18,4%; 18,3% y 19,9% respectivamente. El asiento total experimentado tras la compactación de las tres tongadas, cuyo espesor inicial total era de 117 cm, resultó ser de 23,8 cm, correspondiente a una deformación vertical del 19,9%. A diferencia del comportamiento de la banda de NFU sin mezclar, los asientos sufridos por las tres tongadas son similares, no aumentando significativamente a medida se va incrementando la altura de material compactado,

Por otra parte, para facilitar la interpretación, los datos y resultados se representaron en gráficos, dibujando las curvas de evolución de las deformaciones en función del número de pasadas de compactador para cada una de las tongadas ensayadas. De forma complementaria, se ajustaron los valores medidos mediante expresiones potenciales para poder analizar analíticamente la tendencia en la evolución de los valores de la deformación en función del número de pasadas de compactador. Dichos ajustes se muestran en las figuras 6 y 7, correspondientes respectivamente a las dos bandas compactadas con rodillo liso. No se incluye la banda de NFU sin mezclar compactada con rodillo liso ya que los ajustes resultaron dispares y arrojan escasa información.

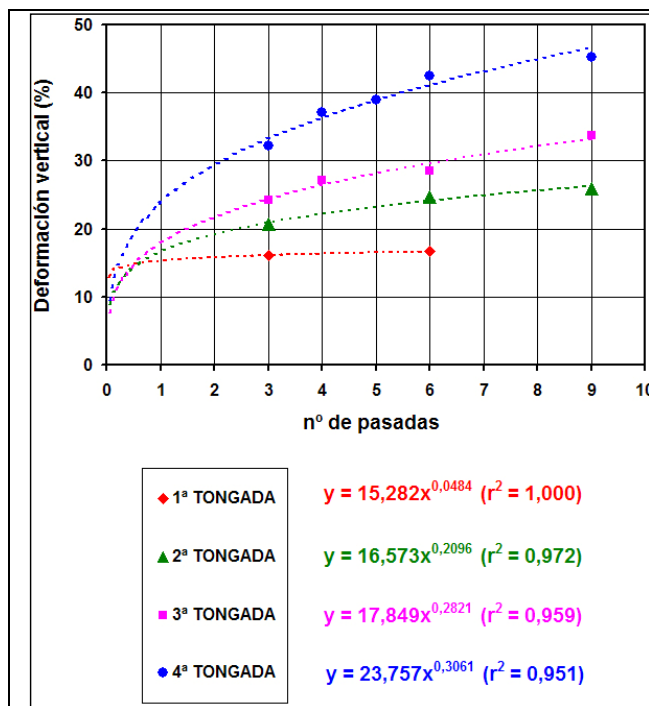


Figura 6: Relaciones matemáticas entre la deformación vertical y el número de pasadas de compactador para el ensayo de la banda de NFU compactada con rodillo liso vibratorio

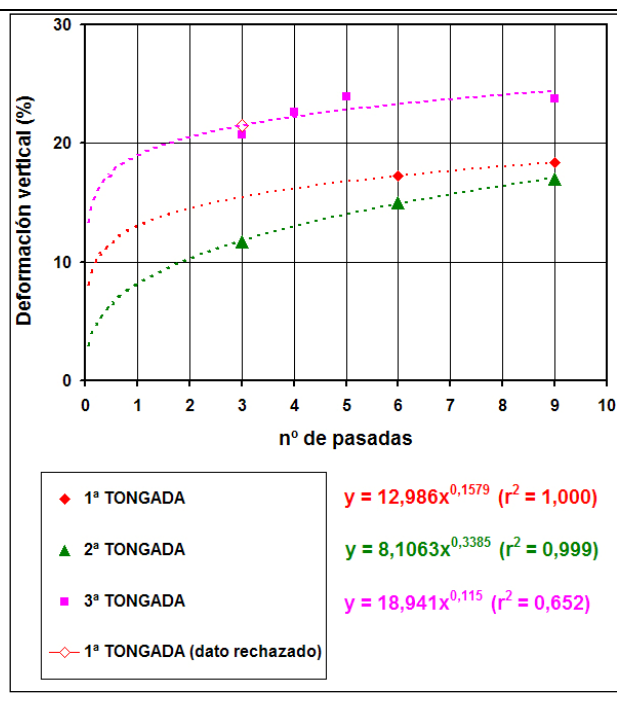


Figura 7: Relaciones matemáticas entre la deformación vertical y el número de pasadas de compactador para el ensayo de la banda de mezcla NFU-suelo marginal

Finalmente, de la estimación de las deformaciones que se producirían para un número mayor de pasadas de compactador utilizando los ajustes matemáticos, se puede resaltar, que si se admite una variación de deformación máxima entre pasadas del 2%, lo que corresponde a un asiento diferencial entre pasadas, 4,5; 4 y 4 cm para la 2ª, 3ª y 4ª tongada para un capa de 2m de espesor de NFU. En la figura 8 se muestra dicha estimación.

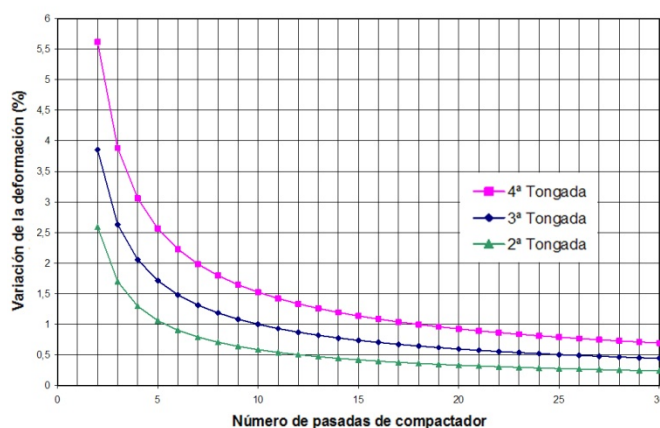


Figura 8: Variación de la deformación en función del número de pasadas de compactador, adoptando el ajuste matemático considerado para las tongadas 2ª, 3ª y 4ª

En cuanto a las medidas de la densidad obtenidas in situ mediante catas manuales se obtuvieron los siguientes resultados, variando ligeramente en función del método de medida del volumen empleado:

- NFU no mezclado compactado con rodillo: 0,84 y 0,91 t/m³
- NFU no mezclado compactado con bulldozer: 0,72 y 0,91 t/m³
- Mezcla NFU-suelo marginal compactado con rodillo: 1,5 y 1,9 t/m³

Estos valores de densidad son similares a los obtenidos en los ensayos de corte directo sobre tiras de NFU realizados en la caja de corte de 1 x 1 m del CEDEX que resultaron de 0,85 t/m³ para una tensión normal de 100 kPa, equiparable a la transmitida por los compactadores empleados en la ejecución de las bandas. También están en concordancia con los valores obtenidos de la revisión bibliográfica.

4. CONCLUSIONES

Una vez analizados todos los datos, las principales conclusiones que se pudieron extraer del trabajo son las siguientes:

- La maquinaria más adecuada para realizar la compactación de tiras de NFU no mezclados y de mezclas con suelos es el rodillo liso vibratorio.
- No se ha podido determinar con absoluta claridad el número mínimo de pasadas de compactador necesarios para la compactación de terraplenes ejecutados con NFU y mezclas de NFU con suelo.
- El relleno con NFU compactado presenta una densidad muy ligera que puede ser ventajosa para determinadas aplicaciones.
- La mezcla de NFU con suelo produce un material más denso, menos deformable y más fácilmente compactable.