

Resultados obtenidos de la construcción e instrumentación de un terraplén de carretera con neumáticos fuera de uso (NFU).

T. Mateos García & O. García Moreno
Acciona Ingeniería

RESUMEN

En este trabajo se recogen los principales resultados obtenidos tras la construcción de un terraplén de carretera empleando neumáticos fuera de uso (NFU). Se trata de un terraplén de unos 140 m de longitud y altura variable entre 2 a 9 m, ubicado sobre las terrazas del río Jarama. El terraplén fue instrumentado con el propósito de estudiar la deformabilidad de las capas de NFU así como la evolución de su temperatura.

Los datos obtenidos mediante la instrumentación del terraplén fueron analizados mediante un modelo de elementos finitos con el fin de estimar un valor fiable del módulo de deformación de las capas de NFU. Este análisis muestra que el asiento medido en las capas de NFU es semejante a los datos publicados en la literatura técnica sobre el tema y que además está de acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX de forma simultánea a este proyecto.

Este proyecto ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Medio Ambiente.

1. Introducción

El incremento del número de neumáticos que se desechan, del orden de un neumático por persona y año, así como la implementación de nuevas que prohíben que los neumáticos se acopien en vertederos de residuos urbanos o de inertes regulaciones (Directiva 1999/31/CE), son las causas principales del incremento en los problemas de gestión de estos residuos. Por tanto, es importante el desarrollo de aplicaciones medioambientalmente seguras con objeto de mejorar la gestión de estos residuos de acuerdo con las necesidades actuales.

En este sentido, las aplicaciones “geotécnicas” de los NFU en cuerpo de terraplenes o trasdosado de muros son de gran interés debido a que en ellas se puede emplear una gran cantidad de residuo –miles de toneladas en un único proyecto- y, dado que son materiales menos pesados que los suelos, pueden sustituir a otros rellenos ligeros con menor coste (arcillas expandidas, poliestireno, etc).

La construcción de terraplenes con NFU se ha aplicado ampliamente en el estado de Nueva York (USA) con objeto de generar un acopio seguro de estos materiales y de conseguir material de relleno reduciendo la necesidad de búsqueda de préstamos, mientras que en otros estados como California esta alternativa se ha empleado de forma más restrictiva con el único fin de solventar problemas de cimentación de terraplenes en zonas de suelos blandos. En ambos casos, la construcción de estos terraplenes se basa en una norma ASTM (D-6270) que incluye recomendaciones constructivas, consideraciones geométricas de las capas de NFU, así como sobre la granulometría de los trozos de neumático. El cuerpo de terraplén resultante está formado por capas alternantes de neumáticos y suelo. Además, el suelo empleado en la construcción del terraplén debe cumplir con unos requisitos de granulometría y permeabilidad.

Siguiendo estas recomendaciones se construyó un terraplén para un paso superior sobre la carretera M-111 en el norte de Madrid. En este trabajo se recogen los principales resultados obtenidos tras su construcción e instrumentación. Este trabajo forma parte de un proyecto más amplio parcialmente financiado por el Ministerio de Medio Ambiente que también incluye ensayos de laboratorio y análisis teóricos sobre el comportamiento de los neumáticos fuera de uso y que fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña, Acciona i+D e Iberinsa (actualmente Acciona Ingeniería).

2. Propiedades mecánicas de los NFU

La primera propiedad que merece ser mencionada es el peso específico de los NFU que se encuentra entre 1 y 1,27 aproximadamente la mitad que la de los suelos (Humphrey, 2003). Los ensayos de compactación realizados muestran que, con energía semejante a la del ensayo Proctor, la densidad final aparente se mantiene entre 6 y 7 kN/m³. Si los NFU son únicamente vertidos la densidad aparente conseguida es menor, entre 3,5 y 5 kN/m³. Esta es la razón de su empleo como relleno ligero tanto en terraplenes como en trasdós de muros.

La compresibilidad de estos materiales ha sido principalmente estudiada en condiciones edométricas. Por ejemplo, los ensayos realizados por Ahmed (1993) resultaron en valores del índice de compresibilidad (C_c) entre 0,11 y 0,22, si el material había sido previamente compactado. Si los neumáticos habían sido sólo vertidos el valor de C_c aumenta hasta 0,25. Estos valores son similares a los de los suelos de

compresibilidad media a alta. En situación de descarga (C_s) o recarga (C_r) el valor de estos índices es mayor que el habitual en suelos y muy similar a los valores obtenidos en situación de carga ($C_s = 0,11$; $C_r = 0,19$). Consecuentemente, la mayor parte de la deformación generada en carga se recupera al descargar estos materiales.

Además, hay evidencias de rigidización o endurecimiento por deformación según se muestra por ejemplo en los resultados de los ensayos edométricos realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (2007).

La resistencia al corte ha sido estudiada en laboratorio mediante ensayos de corte directo y ensayos triaxiales. Los resultados son muy dispersos debido a la proporción entre el tamaño de los trozos de neumáticos y los equipos de ensayo, problemas con la membrana de la célula triaxial, etc. Sin embargo, en el laboratorio del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC ha sido posible realizar ensayos triaxiales que han proporcionado con resultados “fiables” con material semejante al empleado en la construcción del terraplén (Munuera et al, 2008).

Además, dentro del proyecto de investigación que nos ocupa se han llevado a cabo ensayos de corte directo. Algunos de los resultados de estos ensayos se han incluido en Arroyo et al (2007).

Otra importante propiedad de los NFU es su permeabilidad, del orden de 1 cm/s, que hace que estos materiales sean útiles como capas drenantes. La influencia de la carga vertical sobre esta propiedad ha sido también objeto de estudio (García y Mateos, 2008).

Finalmente, no hay que olvidar que el empleo de NFU en ingeniería civil se ha relacionado con el desarrollo de reacciones de combustión interna. Después de tres experiencias de autocombustión en los primeros años 90 en Estados Unidos, la FHWA constituyó un grupo de estudio dirigido por el profesor D.Humphrey de la Universidad de Maine. Las principales conclusiones de sus trabajos se reflejaron en la norma ASTM D-6270. Desde la aprobación de esta norma se han construido en Estados Unidos más de 70 terraplenes sin ningún problema relacionado con reacciones de autocombustión.

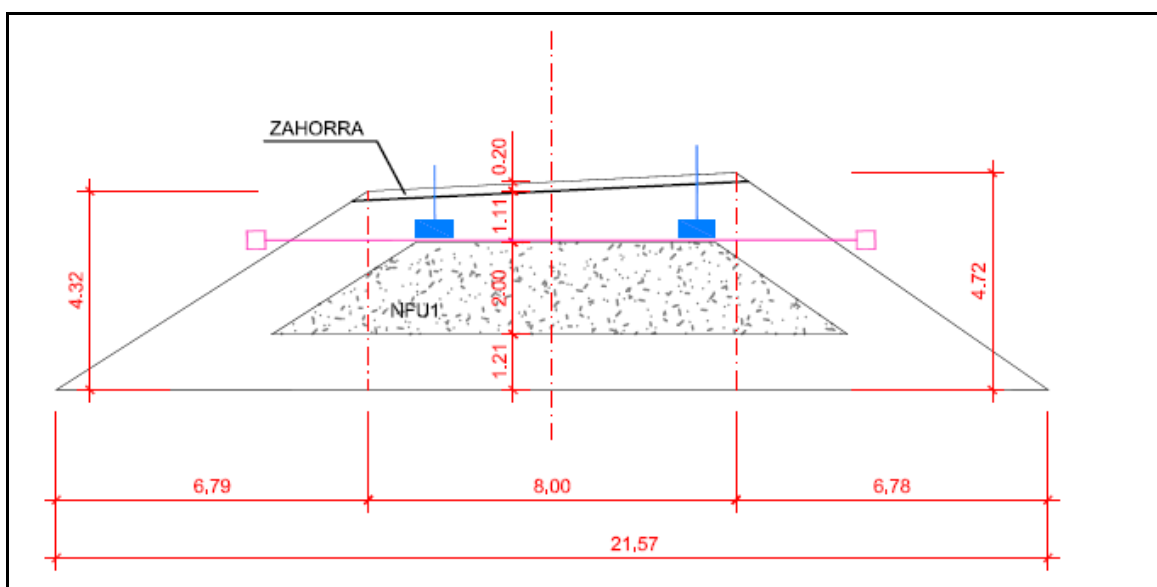
3. Descripción del terraplén

Los NFU fueron empleados en la construcción de un terraplén de acceso a un paso superior sobre la carretera M-111 construido sobre las terrazas del río Jarama, al norte del aeropuerto de Barajas en Madrid.

La altura máxima del terraplén es del orden de 9 m y su longitud de 140 m. El terreno de cimentación son las terrazas del río Jarama, formadas por niveles de arenas y gravas. Bajo estas se encuentran los sedimentos terciarios característicos de la Cuenca de Madrid. Estos suelos se consideran suficientemente rígidos como para que su compresibilidad sea despreciable en relación con la de los NFU, lo que facilita la interpretación de los asientos medidos con la deformabilidad de los niveles de neumáticos.

El procedimiento constructivo y geometría final del terraplén fue definida de acuerdo con la norma ASTM-6270. Así, según la altura del relleno se proyectaron dos secciones tipo, la primera de ellas incluye una única capa de NFU de 2 m de espesor y la segunda, correspondiente a la parte del terraplén de mayor altura, incluye dos capas de NFU, la inferior de unos 2 m de espesor y la superior variable hasta de 2 m de espesor.

Siguiendo la normativa, las capas de neumáticos deben estar siempre rodeadas por una capa de suelo de al menos 1 m de espesor y envueltas en un geotextil que separe las partículas de suelo de los neumáticos troceados. Las secciones descritas se muestran en la figura 1.



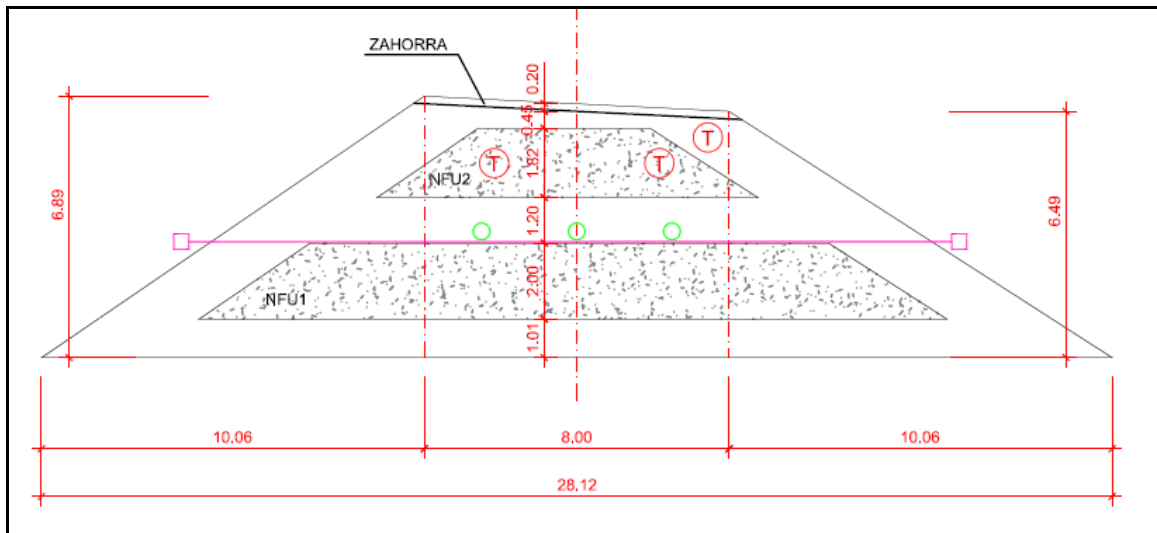


Figura 1. Secciones tipo del terraplén

La granulometría del suelo empleado en la construcción del terraplén ha sido semejante a la requerida en la norma ASTM-6270, pero con un menor contenido en finos. Dado que este requisito está relacionado con la capacidad del suelo para ser suficientemente impermeable para evitar que el agua alcance los NFU, las capas de neumáticos fueron envueltas en un geotextil impermeable. Habitualmente, si la granulometría del suelo cumple con los requisitos citados en la normativa es suficiente con envolver los neumáticos con un geotextil de separación que evite la mezcla entre el suelo y los neumáticos.

De forma previa a la construcción del terraplén se estableció un procedimiento de control de calidad de las características de los neumáticos que iban a ser empleados. De esta forma también se comprobó la validez del procedimiento establecido y su validez para futuros trabajos similares.

En la figura 2, se muestra una imagen de la compactación de las capas de NFU.



Figura 2 Compactación de las capas de NFU

Debido al desarrollo de la obra en la que se encuentra el terraplén su construcción se prolongó durante casi seis meses, durante los cuales se registraron tanto los asientos como la temperatura en el cuerpo de terraplén.

4. Resultados

El terraplén fue instrumentado con objeto de registrar los asientos y la temperatura en las capas de NFU. Los principales resultados se muestran a continuación.

4.1. Asientos

El registro de asientos se prolongó durante casi seis meses, a la vez que el terraplén fue construido. La figura 3 muestra los datos correspondientes a la línea continua de asientos situada sobre la capa inferior de neumáticos en una sección tipo de dos capas. Por esta razón los asientos medidos corresponden sólo a la deformación de esta capa de NFU y no a la de la capa superior.

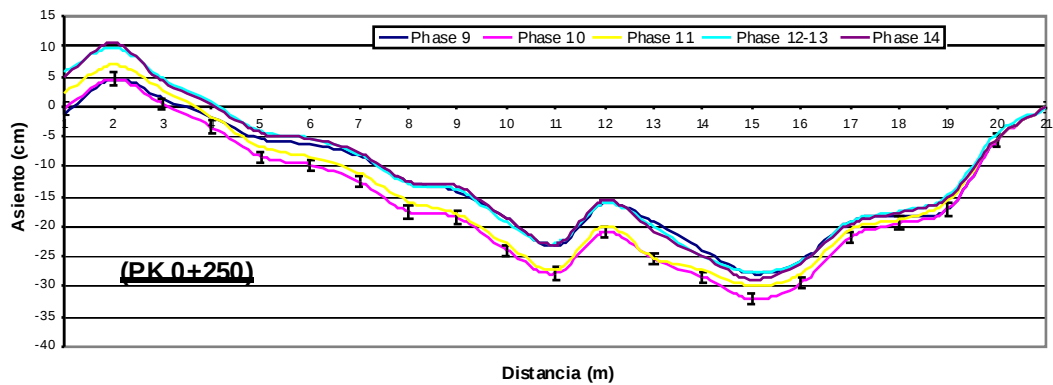


Figura 3. Registro de asientos del terraplén

El valor máximo de los asientos registrado al final de la construcción está entre 20 y 30 cm. No ha sido posible establecer el desarrollo temporal de los asientos en relación con la historia de construcción del terraplén. Por este motivo, sólo se pudo relacionar el movimiento vertical total final en esta sección del terraplén con la carga total aplicada al final de la construcción.

4.2. Temperatura

La temperatura se registró en varios puntos en el interior de las capas de NFU durante todo el periodo de construcción del terraplén. Los datos obtenidos muestran que la temperatura se ha mantenido prácticamente constante en todo este tiempo en la capa inferior. En la capa superior la temperatura ha variado menos de 4°C mientras que la temperatura del suelo variaba desde 13°C a 21°C desde el comienzo de Mayo al final de Junio.

5. Modelización de asientos

Los asientos registrados se reprodujeron mediante un modelo de elementos finitos realizado con el programa PLAXIS. El propósito de la modelización era reproducir un asiento en la capa inferior de NFU semejante al registrado por la instrumentación para poder realizar una estimación fiable del módulo de deformación in situ del material empleado.

Los parámetros empleados en el modelo para el suelo situado alrededor de las capas de NFU, fueron valores típicos para el tipo de material empleado ($c' = 10$ kPa; $\phi' = 32^\circ$; $E = 20$ Mpa). En el caso de los NFU se empleó un modelo elástico lineal y el valor del

módulo de deformación se obtuvo mediante sucesivas aproximaciones hasta obtener un valor de asientos semejante al registrado.

Los resultados se muestran en la Figura 4, en la que se reproducen sólo los asientos desarrollados en el cuerpo del terraplén debido a la construcción de su mitad superior. El movimiento vertical en coronación del terraplén es de unos 35 cm. Este valor correspondería a los asientos registrados por la línea continua de asientos situada en la capa de tierras que separa las dos capas de NFU.

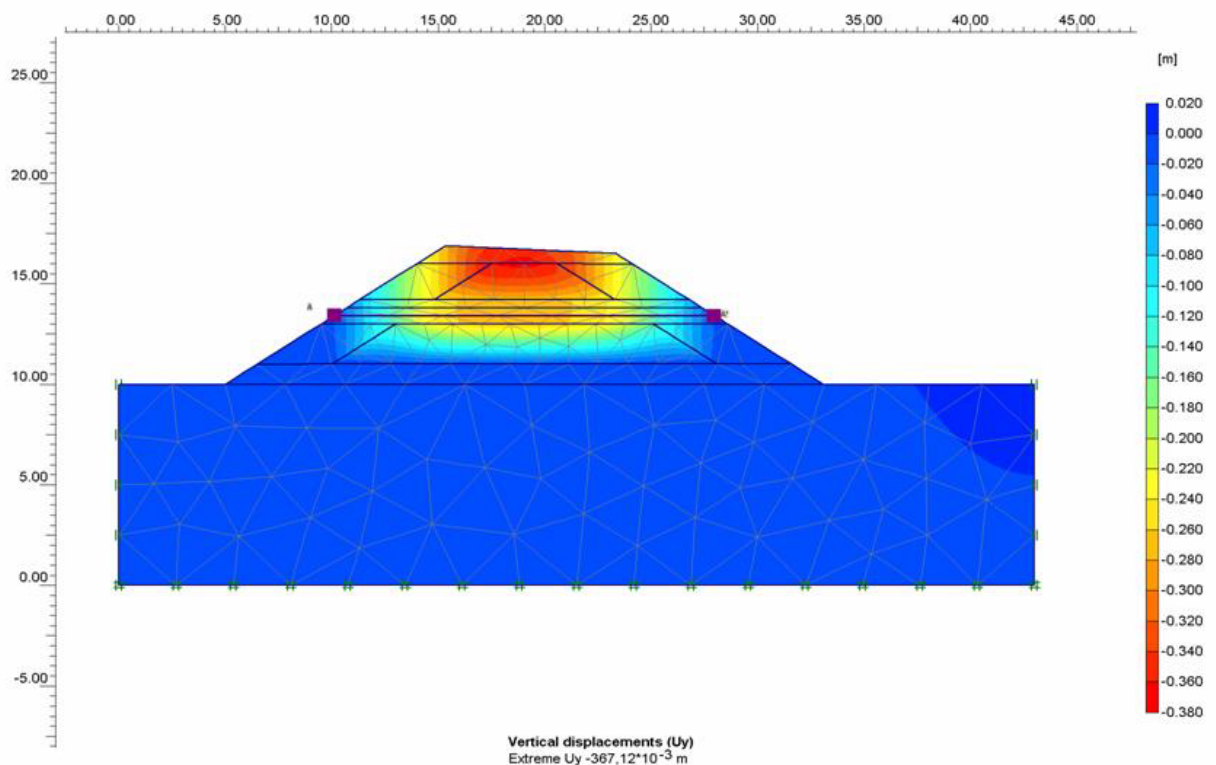


Figura 4. Asientos debidos a la construcción de la mitad superior del terraplén

En la figura siguiente se muestran los asientos que se habrían desarrollado en la capa inferior de NFU debidos a la construcción de la mitad superior del terraplén. El valor máximo en la zona central es de unos 25 cm, que es muy semejante al registrado por la instrumentación (ver figura 3).

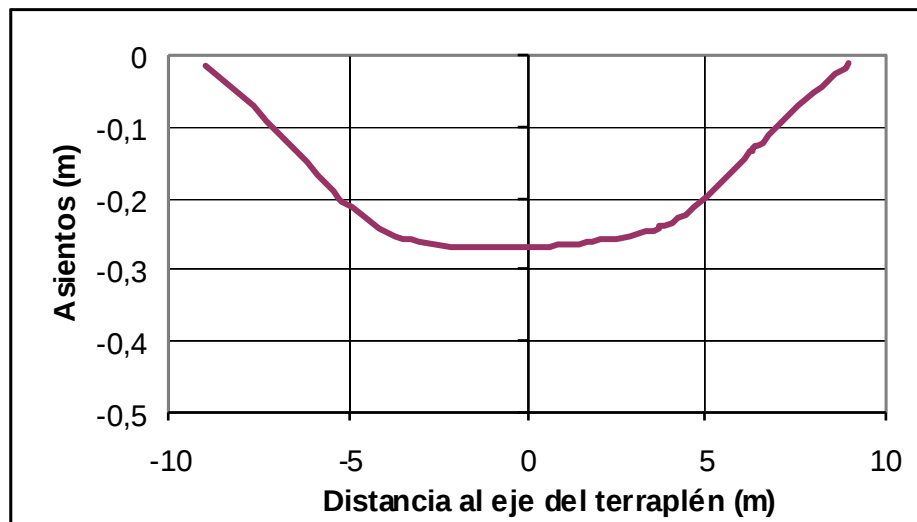


Figura 5. Asientos en la capa inferior de NFU

Finalmente, a partir de estos resultados se estima que el valor total de los asientos predichos por el modelo al final de la construcción del terraplén deben ser del orden de 47 cm (Figura 6).

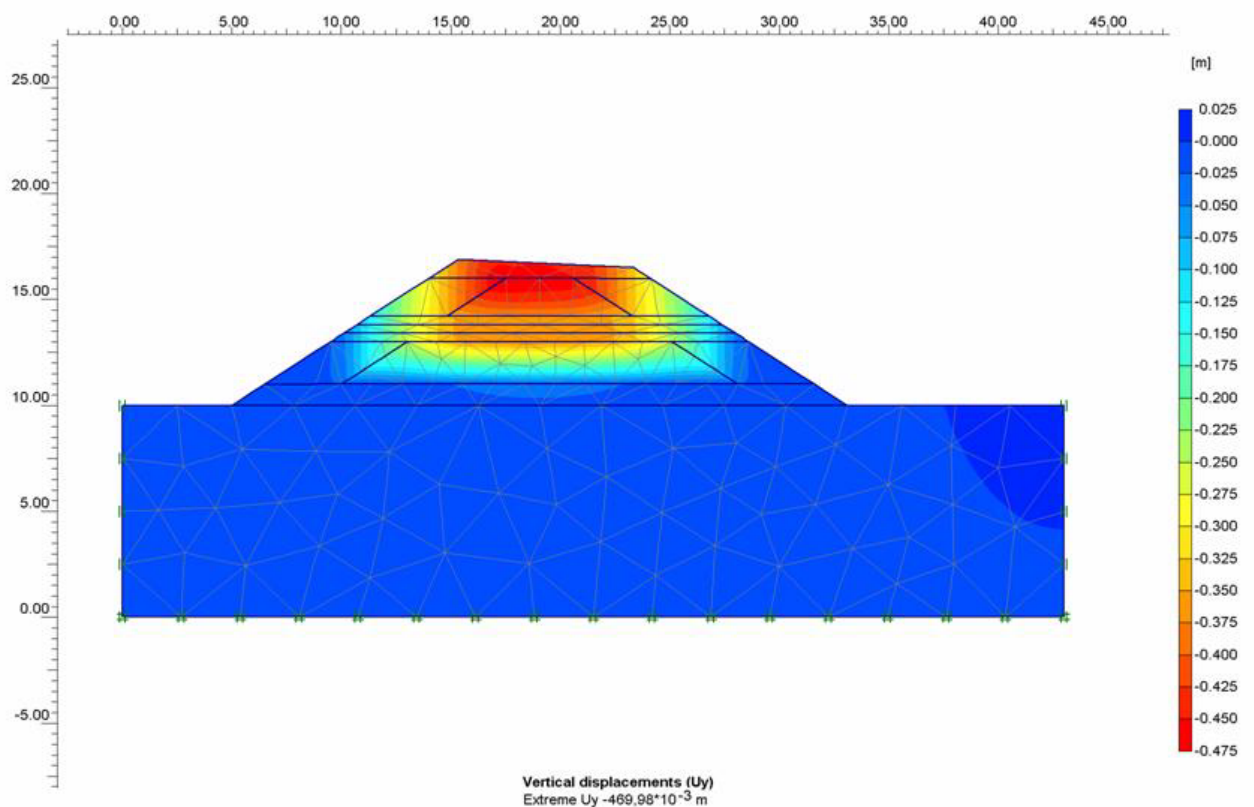


Figura 6. Asientos totales en el terraplén

Sin embargo, no ha sido posible comprobar experimentalmente este resultado debido a que la velocidad a la que se desarrolla la deformación en este tipo de materiales ha sido más rápida que la construcción del relleno, lo que implica que de forma simultánea a la construcción del terraplén se estaban generando los asentos en las capas de NFU, por lo que las sucesivas tongadas de tierras y NFU han debido ser siempre de mayor espesor que las inicialmente proyectadas.

Todos estos resultados de asentos han sido conseguidos empleando un valor del módulo de deformación para las capas de NFU de 350 kPa. Este valor es semejante al que resulta de los ensayos edométricos realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (2007) para un rango de tensiones semejante.

Durante este estudio se observó que la mayor parte de la deformación en las capas de NFU se produce inmediatamente y de forma simultánea a la construcción del terraplén. Sin embargo, debido a la magnitud de los asentos estimados, en este tipo de rellenos debe preverse un volumen extra de material para alcanzar la cota de rasante final del relleno. Este volumen sólo se puede estimar de forma adecuada si se dispone de un valor del módulo de deformación suficientemente aproximado para los niveles de NFU.

En el modelo que reproduce el terraplén construido, con las limitaciones anteriormente expuestas, se registró una deformación entre el 14% y el 20% para la capa inferior de NFU y entre el 4% y el 8% para la capa superior. Estos valores son semejantes a los registrados en otro terraplén con una geometría muy semejante al de este estudio (Humphrey et al, 1998 y 2000; Humphrey, 2004). Este ejemplo corresponde a la construcción de un terraplén de 10 m de altura que incluye dos capas de NFU de 3 m de espesor. Al final de la construcción el valor de la deformación medida en la capa inferior fue de un 15,6% en la capa inferior y de un 10% en la superior. El procedimiento constructivo fue también semejante al empleado en este estudio, por lo que parece que los resultados obtenidos fueron semejantes a otras experiencias previas publicadas en la literatura sobre el tema.

6. Conclusiones

En este trabajo se muestran algunos de los principales resultados obtenidos de la construcción e instrumentación de un terraplén para un paso superior, de una carretera, construido con NFU.

La construcción de este terraplén así como la selección de los materiales empleados se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM D-6270. Esta norma incluye recomendaciones constructivas, geométricas y sobre las propiedades de los materiales a emplear y fue redactada con objeto de poder emplear los NFU en la construcción de rellenos en obra civil limitando el riesgo de autocombustión y obteniendo rellenos suficientemente estables.

El asiento máximo registrado por una línea continua de asientos situada sobre la capa inferior de los NFU fue del orden de 25 cm. A partir de este valor se ha estimado que el valor del módulo de deformación para las capas de NFU es del orden de 350 kPa. Este valor es semejante a los obtenidos por otros autores mediante ensayos de laboratorio o a partir de resultados de otros terraplenes experimentales.

Empleando este valor del módulo de deformación, los datos de deformaciones obtenidos del modelo de elementos finitos son semejantes a los registrados en otros terraplenes de geometría muy similar construido en Maine (USA).

Finalmente, sólo comentar que tras un año desde que comenzó el registro de datos de asientos y ocho meses tras la apertura del paso superior al tráfico no se han registrado problemas de deformabilidad del relleno.

7. Agradecimientos

La experiencia descrita ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Medio Ambiente a través del proyecto 197/2006 2.5-2.

8. Bibliografía

Ahmed, I (1993) Laboratory study on the properties of rubber soils, PhD thesis, Purdue University.

Arroyo, M., Estaire, J., Sanmartín, I. & Lloret., A. 2007. Size effect on tire derived aggregate mechanical properties. International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials (TDG) – Opportunities and Challenges. Yokosuka (Japón).

Esaire, J. (2007). Informe interno (CEDEX).

García. O. & Mateos, T. (2008) "Use of tire derived aggregate in landfill's drainage systems". Euroengeo 2008. Madrid (Spain).

Humphrey, D.N., Whetten, N., Weaver, J. & Recker, K.(2000) "Tire shreds as lightweight fill for construction on weak marine clay" Procc. of the Int. Symposium on coastal Geotechnical Engineering in Practice. Balkema, Rotterdam, pp. 611-616.

Humphrey, D.N. (2003) Civil engineering applications using tire derived aggregate (TDA), California Integrated Waste Management Board.

Humphrey, D.N. (2006) "Course on: Civil Engineering applications using tire derived aggregate (TDA)". Sponsored by: California Integrated Waste Management Board.

Munuera, J., Lloret, A. & Arroyo,M. 2008. Caracterización del comportamiento mecánico de neumáticos troceados. UPC.