

Mechanical characterization of sportive tracks made with materials recycled from end-of-life tyres

Caracterización mecánica de pistas deportivas fabricadas con materiales procedentes de neumáticos fuera de uso (NFU)

Morales-Gámiz, F.J.¹; Escriba, S.²; García-Villena, F.A.³; Bermejo, J.M.⁴; Saiz, L.⁵

ABSTRACT

The European Framework Directive 2008/98/EC on waste established as priority reuse and recycling before other recovery alternatives. In this normative reference, one the main waste flows identified are the end-of-life tyres, as a material whose mechanical properties could provide advantage in the construction of new structures.

This paper presents the mechanical characterization of a layer made with shredded tires out of use, inside a section of a sportive track which included a sand layer. The use of the shredded tires out of use provides special features related with elasticity and damping to the sportive surface.

In order to do that, a new test based on UNE-14809 was designed. A number of tests were performed using different configuration of sand and shredded tires. From the results obtained, a numerical model was implemented in FEA software.

Keywords: shredded, tyre, modelization, properties, elasticity

1. INTRODUCCIÓN

La Directiva marco de residuos (Directiva 2008/98/CE) [1] establece la jerarquía de residuos, donde tras la prevención y la reutilización, el reciclado de los residuos es prioritario frente a otras alternativas de valorización. Uno de los flujos prioritarios identificados en la misma a los que debe prestarse especial atención son los Neumáticos Fuera de Uso (NFU), que, por su cantidad, características y propiedades de los materiales que lo componen, pueden dar lugar a aplicaciones, entre otras, en nuevas estructuras aportándoles una serie de propiedades ventajosas.

En este artículo se trata la oportunidad de valorizar los NFU como parte de una sección tipo para pistas deportivas en la que se aprovechan distintas propiedades como la elasticidad y el alto índice de huecos del material. Estas construcciones deportivas son sencillas en cuanto a su estructura pero muy

¹ Departamento de I+D. CEMOSA (ESPAÑA). javier.morales@cemosa.es

² Departamento de I+D. CEMOSA (ESPAÑA). sergio.escriba@cemosa.es

³ Departamento de Ingeniería. CEMOSA (ESPAÑA). fantonio.garcia@cemosa.es

⁴ Departamento de Desarrollo de Mercados. SIGNUS Ecovalor (ESPAÑA). jbermejo@signus.es

⁵ Departamento de Desarrollo de Mercados. SIGNUS Ecovalor (ESPAÑA). isaiz@signus.es

exigentes en cuanto a sus características superficiales y comportamiento mecánico del conjunto, formado por capas de diferentes materiales y espesores.

Las condiciones de uso de diferentes pistas deportivas profesionales en condiciones óptimas exige el cumplimiento de determinados valores en parámetros tales como la absorción de impacto, elasticidad y deformación vertical, determinados mediante el empleo de un dispositivo denominado “atleta artificial”, según la norma UNE-EN 14809 [2] que simula los esfuerzos a los que se ven sometidas estas superficies. En algunos tipos concretos de instalaciones, existen diversos sistemas comerciales patentados que garantizan el cumplimiento de estos parámetros de calidad. De un análisis pormenorizado de las características técnicas y funcionales de estos sistemas, surge la idea de incluir en la sección de la pista capas de materiales obtenidos del tratamiento del NFU a tamaño de centímetros, producto comúnmente denominado como “chip”. Las ventajas que se intuyen del empleo de este material frente a los sistemas actuales son, una mayor absorción de la energía de impacto, un coste mucho menor que los sistemas patentados, por supuesto y sobre todo, un claro beneficio medioambiental.

La pista deportiva estudiada en este artículo está formada por una capa de arena y otra de “chip” de NFU, espesores variables. Este conjunto se ha ensayado a escala real en un cajón indeformable dotado de una serie de acelerómetros. Sobre el prototipo construido se han llevado a cabo los ensayos prescritos para la caracterización de la superficie de pistas deportivas y, adicionalmente, por medio de ensayos de placa de carga dinámica se han obtenido una serie de parámetros que han permitido la caracterización mecánica de las distintas configuraciones estudiadas. En cada impacto se han registrado las aceleraciones producidas en cada capa de material, indicativas de su comportamiento dinámico.

En una segunda fase del estudio se ha llevado a cabo la modelización del sistema por medio de elementos finitos y la simulación en el mismo de los ensayos dinámicos. Dicha modelización tuvo por objeto determinar los parámetros que definen el comportamiento mecánico de cada material para posteriormente, extrapolar a otras configuraciones no ensayadas en laboratorio. Para ello, se usaron diferentes modelos de comportamiento dinámico basados en los factores de amortiguamiento de Rayleigh [3], hasta lograr reproducir con fiabilidad los resultados obtenidos en los ensayos reales.

De esta forma, fue posible obtener los valores de amortiguamiento característicos de cada material, arena y NFU, y analizar su contribución al comportamiento general de la pista deportiva.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

2.1. Introducción

En este apartado se presentan los ensayos que deben realizarse sobre la superficie de las pistas deportivas con el objeto de conocer su respuesta ante la carga dinámica a la que se somete durante su uso, esto es, el impacto de una pisada.

En la actualidad, el ensayo de referencia para la caracterización de pistas deportivas profesionales es el de “atleta artificial”, el cual está regulado por la norma UNE-EN 14809:2006 [3]. El dispositivo para

llevar a cabo estos ensayos presenta una gran complejidad y no es fácil de encontrar en España, por ello, para el desarrollo de esta investigación se ha fabricado un equipo equivalente sobre la base del equipo de placa de carga dinámica, que es mucho más manejable y su uso está mucho más extendido.

2.2. Ensayo “atleta artificial”

2.2.1. Descripción

El ensayo “atleta artificial” se encuentra descrito en la norma UNE-EN 14809:2006 [3] y generalmente se utiliza para la determinación de la deformación vertical de las superficies deportivas. La denominación “atleta artificial” responde al hecho de la simulación de la pisada de un atleta en condiciones de práctica deportiva normal.

El principio de funcionamiento del equipo es la medida de la deceleración de una masa en caída libre sobre una superficie. La masa en caída libre es la simulación del impacto de la pisada sobre el suelo. Por integraciones sucesivas, se deducen las velocidades antes y después del impacto. El conjunto de valores obtenidos permite caracterizar la superficie desde el punto de vista de su respuesta mecánica ante el impacto.

El esquema del dispositivo de atleta artificial se muestra en la siguiente figura (Figura 1), donde se pueden distinguir los distintos componentes del mismo.

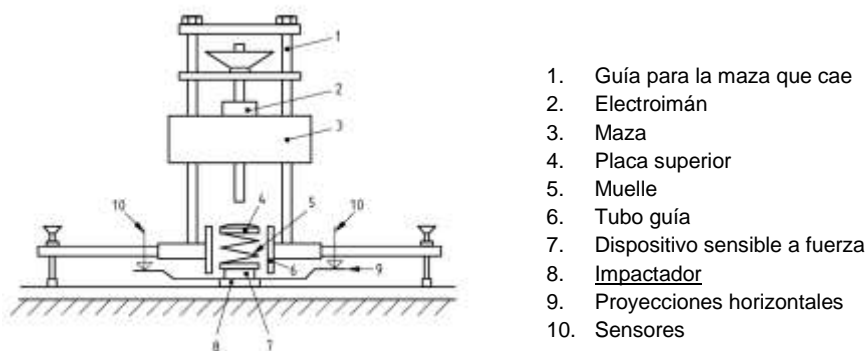


Figura 1. Dispositivo de ensayo “atleta artificial”

2.2.2. Interpretación de resultados

El ensayo “atleta artificial” permite caracterizar las superficies por medio de tres parámetros los cuáles se describen a continuación.

2.2.2.1. Absorción de impacto

Representa la fuerza máxima del impacto sobre la superficie. Se calcula a través de la siguiente fórmula que representa la segunda ley de Newton.

$$F = m \times a$$

= masa x deceleración máxima

Donde

F: es la fuerza máxima del impacto sobre la superficie en Newton (N)

Masa: es la masa de la maza con la que se realiza el golpe en kilogramos (Kg)

Deceleración máxima: es el valor máximo de aceleración en sentido de la gravedad que se produce en la superficie donde se realiza el golpe en metros por segundo cuadrado (m/s²).

El resultado se puede describir como la fuerza de reacción del suelo al impacto. En consecuencia, cuanta más pequeña sea la fuerza, mayor será la absorción de impacto.

2.2.2.2. Energía de restitución (o elasticidad)

Este parámetro, definido de forma imprecisa como Elasticidad en la norma de referencia, representa la energía de restitución de la superficie, esto es, el porcentaje de energía que el sistema devuelve a la maza tras el impacto. Este parámetro se calcula a través de la siguiente expresión:

$$Er (\%) = (\text{velocidad de ascenso en el rebote})^2 / (\text{velocidad de descenso en el impacto})^2$$

Los sensores instalados en el entorno del lugar de ensayo registran las aceleraciones que, tras su filtrado e integración, permiten obtener las velocidades necesarias para el cálculo de este parámetro.

De esta forma el ensayo permite calcular la energía de restitución de la superficie después de un impacto. Se trata de un criterio de rendimiento vertical de la superficie. Cuanto más grande sea su valor, más reactivo es el suelo y por tanto permite más rapidez de evolución.

Este parámetro depende principalmente del módulo de deformación de los materiales y de su coeficiente de amortiguamiento.

2.2.2.3. Deformación vertical

Al igual que en el caso de la absorción de impacto, este parámetro está influenciado por la resistencia a cortante de la superficie, aunque no de forma tan clara como el primero.

Representa la deformación física de la superficie en mm en el lugar del impacto. Se define también como la flexibilidad del suelo.

2.3. Ensayo de placa de carga dinámica

2.3.1. Descripción

Los ensayos de placa de carga dinámica se utilizan para determinar el módulo de deformación de terraplenes y capas granulares de firmes de carretera principalmente. El módulo de deformación es un parámetro de suma importancia en el diseño y control de calidad de obras de carretera, a tenor de la normativa existente.

El ensayo de placa dinámica de carga más habitual cuenta con un plato de impacto de 300 mm de diámetro, utiliza una maza de accionamiento manual como elemento de carga y un dispositivo electrónico de medida de los movimientos de la placa. Este equipo ligero y versátil permite la

obtención del módulo de deformación de forma instantánea y muy fiable. Además, su operatividad y rapidez de ejecución permite realizar un alto número de ensayos con un coste y tiempo muy razonables, lo que conlleva la obtención de módulos más representativos que en un ensayo más largo y costoso.

El equipo para la realización del ensayo de placa de carga dinámico comprende una serie de elementos (Figura 2) entre los que destacan:

- La placa de carga
- Medidor de asiento situado en el centro de la placa de carga en ángulo recto con la superficie receptora de la carga
- Equipo de carga consistente en peso suspendido, conjunto de muelles y barra o tubo guía con un resorte de liberación

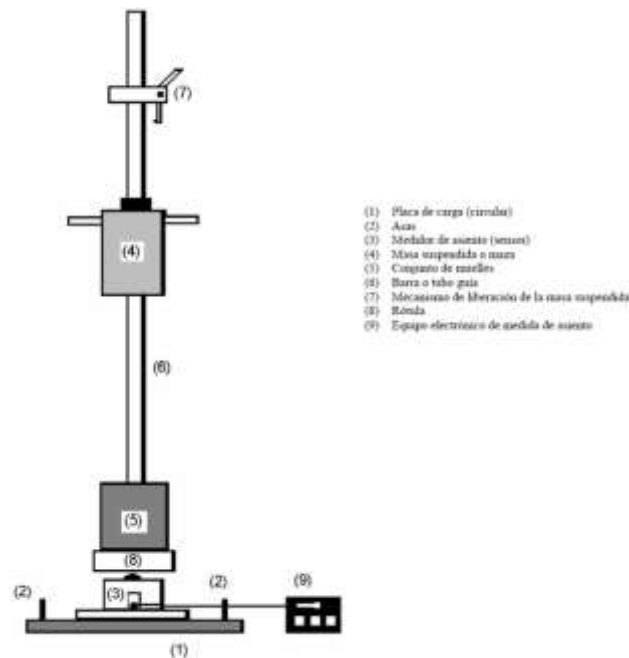


Figura 2. Dispositivo de ensayo de placa dinámica de carga

2.3.2. Interpretación de resultados

2.3.2.1. Asentamientos

El ensayo de placa de carga dinámica permite obtener los valores del asentamiento en cada uno de los golpes. Estos valores se obtienen directamente a través del dispositivo electrónico conectado con la placa.

2.3.2.2. Módulo de deformación vertical

El módulo de deformación vertical bajo carga cíclica se define mediante la relación de Boussinesq:

$$E_{vd} = \frac{1 - \nu^2}{2r} k \quad (1)$$

Dónde:

E_{vd} : es el módulo de deformación vertical bajo carga dinámica (MN/m²)

ν : es el coeficiente de Poisson del suelo

k : rigidez del suelo (N/mm)

r : radio de la placa (mm)

Para el ensayo de placa de carga dinámica la forma de obtención del parámetro viene dado por el dispositivo electrónico conectado a la misma. Este detecta y calcula los asientos resultantes para cada uno de los tres impactos exigidos para la medición. El módulo dinámico de deformación se calcula a través de la siguiente ecuación que relaciona la máxima tensión normal bajo la placa de carga, el diámetro de la placa y el valor medio de los tres asientos medidos, de la siguiente forma:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{max}}{s_{max}} = 1,5 \cdot 0,15 \cdot \frac{0,1}{s_{max}} = \frac{22,5}{s_{max}} \quad (2)$$

Dónde:

r : es el radio de la placa de carga igual a 0,15 metros

σ_{max} : es el valor de la tensión normal bajo la placa igual a 0,1 MN/m²

s_{max} : es el valor medio de los tres asientos medidos en milímetros.

El valor resultante ofrece información acerca de la rigidez de la sección donde se realice el ensayo.

3. MONITORIZACIÓN Y REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS EN LABORATORIO

3.1. Realización de prototipos

Para la obtención de resultados experimentales se procedió a la construcción de una serie de prototipos a escala real sobre los cuáles se pudieran realizar los ensayos anteriormente descritos. Estos prototipos simularían diferentes secciones de pista deportiva que incluían diferentes espesores de arena y del material obtenido del neumático fuera de uso, como capas portantes. Sobre dicha sección se realizarían los ensayos de atleta artificial y de placa de carga dinámica.

Para la construcción de los prototipos se utilizó un cajón metálico de dimensiones suficientes, y debidamente reforzado para evitar deformaciones.

3.2. Sistema de monitorización

El sistema de monitorización durante la realización de los ensayos incluía una serie de acelerómetros repartidos homogéneamente a lo largo de las capas del material obtenido del neumático y la arena. Dichos acelerómetros registraban a una frecuencia de 800 Hz cualquier variación de aceleración en el punto donde se encontraban instalados en un rango de $\pm 16G$.

4. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

4.1. Generalidades

En este apartado se presenta una breve descripción de la implementación computacional del modelo constitutivo descrito en una formulación de elementos finitos.

En particular en este trabajo se adoptó un análisis transitorio que permitía la variación en el tiempo de las cargas inducidas al sistema y que por tanto se adecuaba a las características del ensayo “atleta artificial”.

4.2. Caracterización de los materiales

La arena y sobre todo el material obtenido del NFU requirió un análisis previo de comportamiento antes de proceder a su ajuste. Para ello se ha llevado a cabo una búsqueda bibliográfica sobre trabajos de investigación donde ya se han caracterizado estos materiales, aunque para aplicaciones diferentes.

En cuanto al material del NFU, existe una gran variabilidad en los parámetros encontrados, como puede observarse en la Tabla 1, debido fundamentalmente a que los tamaños de partícula de cada uno de los estudios difiere considerablemente. Tras su análisis, se decidió emplear como valores iniciales los correspondientes a la última referencia (Iberinsa I+D) dada su mayor similitud con el caso en estudio. El peso específico se tomó de la referencia Shalaby y Khan (2005).

Tabla 1. Propiedades de los NFU en bibliografía

Fuente	Propiedad			
	Tamaño máximo (mm)	Peso específico (kN/m ³)	Módulo elástico (kPa)	Coefficiente de Poisson
Cecich et al. (1996) [1]	12,5	5,51-5,86	-	-
Youwai (2003) [2]	-	6,97	-	-
Lee et al. (1999) [3]	50	6,3	1129	-
Moo-Young (2003) et al. [4]	50-100	7,25	-	-
Shalaby (2005) [5]	50-300	5,886	-	0,30
Humphrey et al. (1993) [6]	38	6,064	770	0,32
Yang (2002) [7]	10	5,73	1129	0,28
Iberinsa I+D	-	-	350	0,32

En la arena, por su parte, la bibliografía existente es mucho más amplia. Sirva la Tabla 2 como una muestra de los valores encontrados. En este caso, se tomaron inicialmente los valores correspondientes a “arena floja”.

Tabla 2. Parámetros elásticos típicos de suelos arenosos [8]

Material	Propiedad		
	Densidad (kg/m ³)	Módulo elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
Arena floja	1400-1650	10,5-24,0	0,20-0,40
Arena media	1900	17,0-27,0	0,25-0,40
Arena densa	2080	34,5-55,0	0,30-0,45
Limo arenoso	1400-1500	10,5-17,5	0,20-0,40

Así, para los primeros tanteos se consideraron los siguientes parámetros:

Tabla 3. Características representativas de los materiales en el primer tanteo

Material	Propiedad		
	Densidad (kg/m ³)	Módulo elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
Arena	1650	10,5	0,30
Limo arenoso	600	0,35	0,32

4.3. Modelos constitutivos

4.3.1. Elección del modelo

Debido a la corta duración y elevada energía del impacto, el modelo empleado tanto para la arena como para el material obtenido del NFU es el viscoelástico, es decir, comportamiento elástico con amortiguamiento.

Uno de los principales retos ante los que se encuentra cualquier problema dinámico es la resolución de la ecuación del movimiento que se muestra a continuación y que describe el comportamiento total del sistema en términos de masa, rigidez y amortiguamiento, características también presentes en dicha expresión.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + ku = F(t) \quad (1)$$

En esta ecuación, M es la matriz de masas, C es la matriz correspondiente al amortiguamiento viscoso y K es la matriz de rigidez, con F(t) representando la fuerza aplicada. Estas características están basadas en las propiedades físicas de los materiales del sistema y en las condiciones de contorno existentes, las cuáles influyen decisivamente en las vibraciones y respuesta dinámica del propio sistema.

Cuando el material considerado es un suelo, la matriz de rigidez y de amortiguamiento no es necesariamente constante ante un esfuerzo cortante. Tanto el amortiguamiento como el módulo de cortante varían con la deformación del suelo durante la aplicación de la carga. En este caso, sin embargo, dada la escasa magnitud del esfuerzo aplicado, puede considerarse que estos parámetros permanecen constantes sin cometer errores importantes.

4.3.2. Amortiguamiento

Una de las principales características de los materiales de comportamiento elástico con amortiguamiento es, precisamente, su amortiguamiento. Este factor interviene en el movimiento relativo de sus partículas y su fricción interna, claramente presentes tanto en la arena como en el NFU. Los modelos de elementos finitos introducen este parámetro a través de la siguiente expresión que relaciona la matriz de rigidez con dos parámetros α y β , conocidos como parámetros de amortiguamiento de Rayleigh.

$$C^R = \alpha^R M + \beta^R K \quad (2)$$

Donde:

M es la matriz de masas del sistema

K es la matriz de rigidez

C es la matriz de amortiguamiento

Las fórmulas que permiten calcular los parámetros de amortiguamiento de Rayleigh son:

$$\alpha^R = \xi \left(\frac{4\pi}{T} \right) \left(\frac{n}{n+1} \right) \quad (3)$$

$$\beta^R = \xi \left(\frac{4\pi}{T} \right) \left(\frac{n1}{n+1} \right) \quad (4)$$

Donde:

T es el periodo fundamental de vibración del material

ξ es el objetivo de amortiguamiento buscado

n es número entero que corresponde el número de modo de vibración m para el cual el objetivo de amortiguamiento coincide, calculándose el mismo como $n=2m-1$

Como se observa el valor de ambos parámetros depende del periodo de vibración del material y de los modos de vibración del sistema.

Los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh también han sido aproximados en primera instancia a partir de valores existentes en la bibliografía. En el caso del material obtenido del NFU, los valores iniciales (Tabla 4) se fueron ajustando libremente según los resultados de los ensayos llevados a cabo en los prototipos. En el caso de la arena, dada la cantidad, profundidad y detalle de

los estudios encontrados, se optó por emplear directamente valores de la bibliografía (Tabla 5) y se eligió aquella que mejor reflejaba el comportamiento en el prototipo construido.

Tabla 4. Coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh para el NFU según bibliografía [9]

Material	Parámetros de Rayleigh	
	α^R	β^R
NFU	0.6103	0.002276

Tabla 5. Coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh para la arena según bibliografía [10]

Material	Coeficiente de amortiguamiento global (%)	Parámetros de Rayleigh	
		α^R	β^R
Arena	1,5	0,31102	0,00026
Arena	5,5	1,1404	0,00095
Arena	9,5	1,96978	0,00165
Arena	13,5	2,79916	0,00234
Arena	17,5	3,62854	0,00304

4.3.3. Cargas aplicadas

El ensayo utilizado para la calibración del modelo ha sido el de placa de carga dinámica, dado que por su mayor energía y superficie de impacto su resultado es representativo del comportamiento global del prototipo. La carga aplicada en este ensayo, según se especifica en la norma UNE-103807-2, corresponde a un impacto (fuerza de valor F_s) transmitido mediante la caída de un peso desde una altura dada, sobre una placa de carga circular de ciento cincuenta milímetros de radio ($r=150$ mm) y de espesor suficiente para considerarla rígida. El dispositivo está calibrado para que la fuerza producida sea tal que la tensión normal σ bajo la placa del ensayo alcance los 0,1 MPa.

La norma presenta unas figuras con la ley de fuerzas y de asientos que se debería de obtener en el impacto (ver Figura 1).

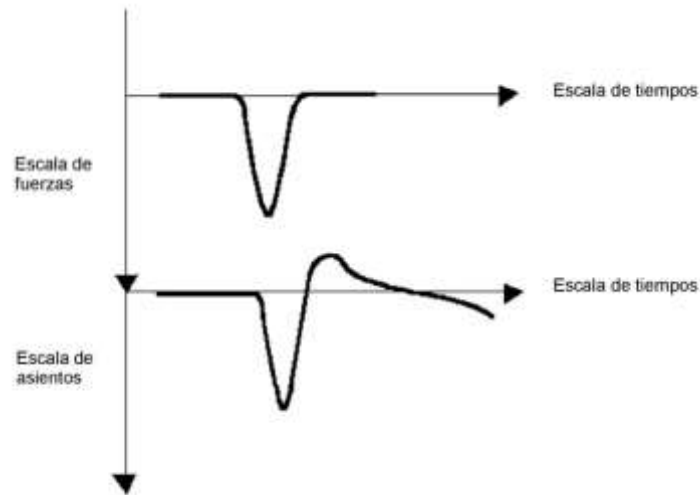


Figura 3. *Secuencia temporal de la fuerza de impacto ejercida por el dispositivo de carga y del asiento que genera en la placa*

Siguiendo estas premisas, en el modelo se ha considerado una presión variable tipo impulso de corta duración (17 ms) y con un pico máximo correspondiente a los 0,1 MPa, aplicada sobre una superficie circular de 150mm de radio, según se establece en dicha norma

4.4. Calibración del modelo

4.4.1. Introducción

La calibración del modelo numérico consiste en la modificación de las características de los materiales hasta que los resultados teóricos se ajusten a los resultados obtenidos en todos los prototipos. En concreto, la modificación de los parámetros elásticos (módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson) tienen mayor influencia en la salida de deformaciones, mientras que la variación de los coeficientes de amortiguamiento causan modificaciones en las curvas de aceleración.

El procedimiento de calibración comienza con el ajuste de uno de los prototipos. A continuación se comprueba si los resultados de ensayo en el resto de prototipos también se reproducen correctamente con los parámetros seleccionados o si por el contrario es necesario un nuevo ajuste. En ese caso, se procede de forma iterativa hasta que la simulación sea válida para todos los casos ensayados.

El análisis de deformaciones es directo y no precisa mayor explicación. La comparación de aceleraciones, sin embargo, requiere un procesamiento previo de los datos de laboratorio que pasa a describirse a continuación.

4.4.2. Filtrado de los acelerogramas reales

El registro de datos brutos procedentes de los acelerómetros instalados en el cajón debe de ser filtrado previo a su utilización con el fin de eliminar las frecuencias procedentes de las vibraciones secundarias del cajón o de otro tipo de interferencias. Para ello se utiliza la técnica de filtro pasa-banda. La determinación de las frecuencias representativas se llevó a cabo mediante un análisis frecuencial del registro de mediciones de aceleraciones. Dichos análisis llevaron a establecer los modos de vibración principales asociados al golpe de la placa de carga dinámica sobre el cajón. Estos

vendrán dados por una serie de picos dentro de la gráfica relacionados con una mayor energía asociada a la frecuencia en la que se encuentren.

Por otra parte, mediante el modelo numérico se obtienen los modos de vibración teóricos y sus frecuencias asociadas (Tabla 6).

Tabla 6. Modos de vibración procedentes del modelo numérico

Modo de vibración	Frecuencia (Hz)
1	26,14
2	40,89
3	49,67
4	51,40
5	53,50

A continuación, se seleccionaron en los acelerogramas sólo aquellas frecuencias próximas los principales modos de vibración teóricos. Los resultados obtenidos para los casos en estudio se pueden observar en la Figura 4. En ella se muestran los registros de aceleraciones obtenido directamente de uno de los acelerómetros colocados bajo la placa del ensayo de placa dinámica de carga. En la Figura 5 se presentan los espectros de frecuencia obtenidos tras para los mismos acelerogramas tras el análisis frecuencial.

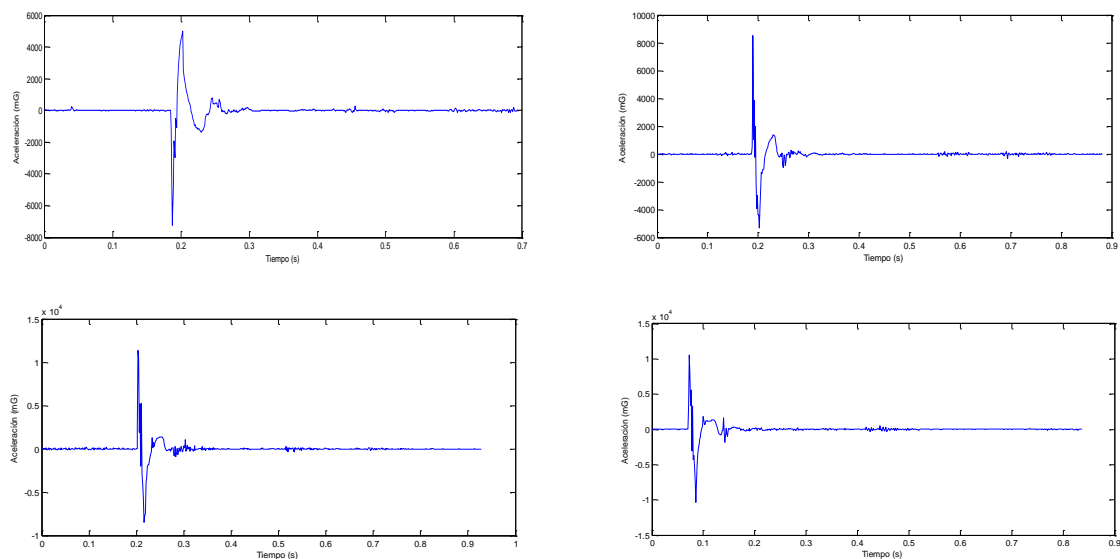


Figura 4. Acelerogramas obtenidos

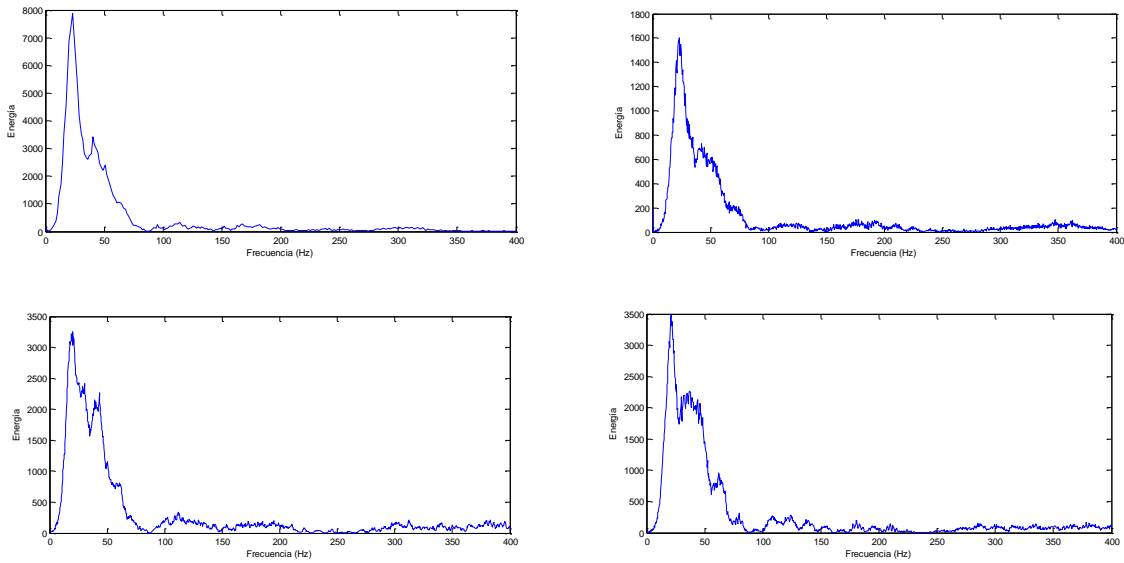


Figura 5. Análisis espectral de frecuencias

Se puede comprobar como los valores de los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh α y β , son bastante diferentes a los encontrados en la bibliografía.. Esto es debido a la gran diferencia de espesores de material de NFU entre los prototipos de este proyecto y los casos documentados en la bibliografía, ya que estos últimos van orientados al relleno de trasdós de muros y por tanto sus dimensiones son de varios metros.

4.4.3. Obtención de curvas de aceleraciones con el modelo numérico

A partir del modelo del cajón de ensayo y tras calcular la respuesta ante la carga teórica aplicada se puede obtener la curva de aceleraciones en cualquier punto del modelo. En particular, para la calibración interesa conocer la respuesta teórica en los lugares donde se ubican los acelerómetros.

El proceso iterativo de ajuste de la curva de aceleraciones al acelerograma filtrado comienza por la asignación inicial de coeficientes α y β de amortiguamiento de Rayleigh al NFU y a la arena. Estos valores debían de cumplir un criterio de homogeneidad entre ellos y estar asociados a un determinado valor de amortiguamiento global del material.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo del proceso de ajuste de las curvas de aceleración, donde se fueron variando los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh.

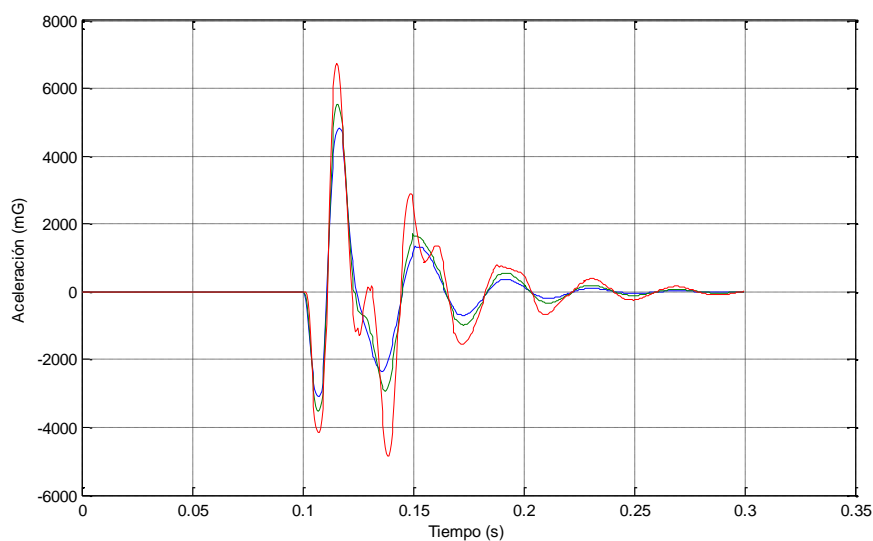


Figura 6. Proceso iterativo de ajuste de la curva de aceleraciones mediante variación de los coeficientes de Rayleigh

Como resultado, se obtuvo que los parámetros de arena y NFU necesarios para conseguir un buen ajuste de la curva de aceleraciones son los representados en la siguiente tabla:

Tabla 7. Parámetros finales asignados a los materiales

Material	Parámetros				
	Densidad (kg/m ³)	Módulo elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson	α^R	β^R
NFU	1650	8.5	0.36	3.62854	0.00304
Arena	600	0.1	0.29	6.68	0.0251

En la figura 7 se puede comprobar como las aceleraciones teóricas y las reales coinciden casi a la perfección.

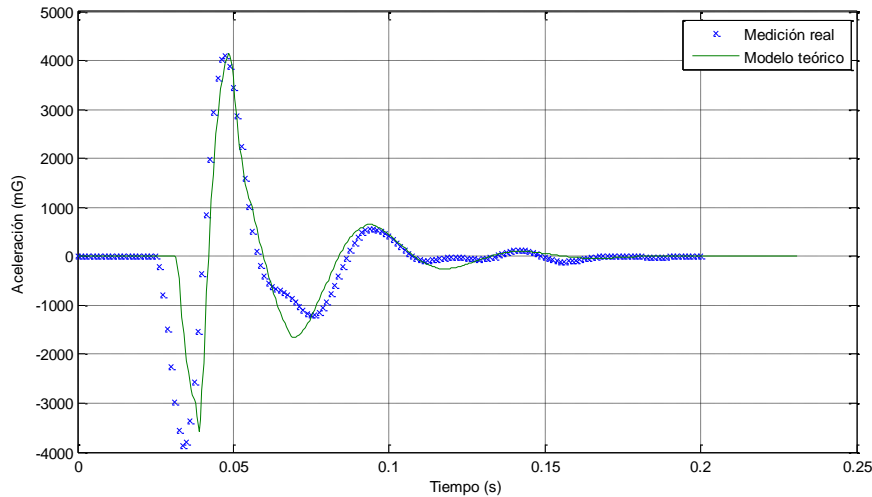


Figura 7. Comparación de resultados teóricos y reales de aceleraciones tras el ajuste

Se puede comprobar como los valores de los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh α y β , difieren un poco respecto a los de la bibliografía encontrada al respecto. Esto es debido al pequeño espesor de la capa de NFU que se utilizó para los ensayos y los espesores de capa estudiados en la bibliografía, ya que estos últimos van orientados al relleno de trasdós de muros y por tanto sus dimensiones son de varios metros.

4.5. Validación del modelo numérico

El siguiente paso es comprobar si con los coeficientes elásticos y de amortiguamiento seleccionado el modelo numérico logra reproducir otras configuraciones geométricas, en particular las correspondientes a los demás prototipos ensayados. El parámetro empleado como comprobación es la elasticidad o energía de restitución, obtenida mediante golpeo a través del dispositivo “atleta artificial”. La energía de restitución se calcula a partir de las velocidades registradas en la superficie del modelo, tanto de descenso en el impacto como de ascenso en el rebote. En la Tabla 8 se comparan los resultados teóricos así obtenidos con los calculados anteriormente a partir de datos reales.

Tabla 8. Energía de restitución o elasticidad en los modelos numéricos y en los ensayos de laboratorio

Prototipo	Espesor de arena (cm)	Espesor de NFU (cm)	Elasticidad obtenida en el modelo computacional (%)	Elasticidad obtenida en laboratorio (%)	Desviación
1	30	20	35,40	37,60	-5,85%
2	20	20	39,02	38,70	0,83%
3	20	10	30,64	30,10	1,79%
4	20	5	34,64	34,10	1,58%

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado la caracterización mecánica de una capa construida con un material obtenido del procesado de neumático fuera de uso como capa portante dentro de la sección de una pista deportiva. Las buenas propiedades de este tipo de material respecto a los valores de elasticidad y amortiguamiento hacían altamente recomendable su uso junto con el beneficio ambiental que supone dar salida a materiales obtenidos a partir de residuos.

La realización de una serie de ensayos de caracterización mecánica especialmente diseñados para este tipo de superficies junto con la monitorización del comportamiento de las capas en unos prototipos que se fabricaron en laboratorio dieron por resultado, una serie de acelerogramas que se utilizaron como base para el desarrollo y calibración de un modelo de elementos finitos.

El modelo de elementos finitos desarrollado, exigía la definición de una serie de parámetros intrínsecos del material junto con una ley de comportamiento. En base a la bibliografía existente y por la propia experiencia del empleo de este tipo de materiales, se definió un modelo viscoelástico, dotando a la capa del material obtenido del neumático de unas propiedades físicas determinadas.

Tras una serie de iteraciones y ajustes del modelo computacional, los resultados a nivel de aceleraciones consiguieron reproducir con bastante exactitud los obtenidos en los ensayos de laboratorio. Como consecuencia, la energía de restitución, parámetro característico de las pistas deportivas, presentó una excelente correlación entre los valores teóricos obtenidos con el modelo computacional y los reales obtenidos en laboratorio.

De esta forma, se pudo obtener una caracterización precisa de parámetros de amortiguamiento, módulo elástico y coeficiente de Poisson de la capa construida utilizando materiales obtenidos del tratamiento del neumático fuera de uso. Esta caracterización resulta muy útil puesto que permitirá la optimización de la sección de la pista deportiva en la búsqueda de las propiedades más adecuadas para la práctica deportiva que se desee en función de los parámetros que se obtienen del ensayo "atleta artificial", sin necesidad de realizar ensayos físicos en laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] «Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas. L312/3 de 22.11.2008,» 2008.
- [2] AEN/CTN 41, «Superficies deportivas. Determinación de la deformación vertical,» AENOR, Madrid, 2006.
- [3] O. Farhang, N. Deng y J. Roesset, «Estimating Total System Damping for Soil-Structure interaction Systems,» Proceedings Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, Menlo Park, California, USA, 2004.

- [4] V. Cecich, L. Gonzales, A. Hoisaeter, J. Willilams y K. Reddy, «Use of Shredded Tires as Lightweight Backfill Material for Retaining Structures,» *Waste Management and Research*, 1996.
- [5] S. Youwai y D. Bergado, «Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures,» *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 2003.
- [6] H. Lee y H. Roh, «The use of tire chips to minimize dynamics earth pressure during compaction of backfill,» *Construction and Buildings Materials*, 21, 2007.
- [7] H. Moo-Young, K. Sellasie, D. Zeroka y G. Sabnis, «Physical and Chemical properties of Recycled tire shreds for use in construction,» *Journal of Environmental Engineering*, 129(10), 2003.
- [8] A. Shalaby y R. Khan, «Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study,» *Resources, Conservatorion and Recycling*, 44, 2005.
- [9] D. Humphrey, T. Sandford, M. Cribbs y W. Manion, «Shear Strength and Compressibility of Tire Chips for Use as Retaining Wall Backfill,» *Transportation Research Record*, 1422, 1993.
- [10] S. Yang, R. Lohnes y B. Kjartanson, «Mechanical Properties of Shredded tires,» *Geotechnical Testing Journal*, 25, 2002.
- [11] *Geotecnia II*, 40 ICA, «El Solido elástico,» UAX, Madrid, 2005.
- [12] E. Huggins, «Numerical and reliability analysis of gravity cantilever retaining walls backfilled with shredded tires subjected to seismic loads,» *Clem University. TigerPrints.*, 2012.
- [13] C. Hsein, P. Kok Kwang, A. Puppala, R. Green y G. Fenton , «Damping in sands,» *Proceedings of GeoRisk: Geotechnical Risk Assessment and Management*, ASCE, Atlanta, 2011.