

ENSAYOS DE RESISTENCIA LATERAL DE VÍA REALIZADOS EN EL CAJÓN FERROVIARIO DEL CEDEX Y SU MODELIZACIÓN

Track lateral stability tests performed in CEDEX Track Box and their modelling

José Estaire Gepp*

Vicente Cuéllar Mirasol**

María Santana Ruiz de Arbulo***

RESUMEN – En el Cajón Ferroviario del CEDEX se han realizado una serie de ensayos de resistencia lateral de vía con la ayuda de un útil especialmente diseñado que es capaz de empujar horizontalmente la traviesa mientras se registra su movimiento. La resistencia lateral de vía depende de tres factores principales: el rozamiento con el balasto, tanto en la base como en las caras laterales de la traviesa y los empujes pasivo y activo que se desarrollan en los hombros de la traviesa. Para cuantificar dichos factores de acuerdo a la Mecánica del Suelo, se determinó previamente la resistencia al corte del balasto en una caja de grandes dimensiones (1x1 m de plano de corte) que permite ensayar el balasto en su tamaño real. Además, en varios de esos ensayos, el balasto se contaminó con una arena fina y uniforme para reproducir el efecto de unas posibles condiciones medioambientales adversas (por ejemplo: una tormenta de arena) en una línea de alta velocidad que se desarrolle en una zona desértica.

SYNOPSIS – Some track lateral stability tests were performed in CEDEX Track Box (CTB) with the aid of a special tool built for that purpose that pushes away the sleeper while its movement is recorded. The lateral resistance of the sleeper is due to three mechanisms: the friction in the sleeper base with the ballast, the friction in the sleeper lateral faces with the ballast and the passive and active resistances of ballast in the sleeper shoulders. To quantify those mechanisms according to Soil Mechanics laws, the ballast shear strength was previously determined in large direct shear tests (in a 1x1x1 m shear box). The large size of that test equipment makes it possible to test ballast in its real size. Furthermore, in some of those tests the ballast was fouled with fine and uniform sand to reproduce the effect of adverse environmental conditions (e.g. a sand storm) in desert high speed lines.

Palabras Clave – vía-férrea, ensayos de estabilidad lateral, laboratorio, modelización.

Keywords – railway, lateral stability tests, laboratory, modelling.

1 – INTRODUCCIÓN

La resistencia de la vía tiene tres componentes en el plano horizontal (lateral, longitudinal y torsional) y una en el plano vertical, siendo dicha resistencia uno de los elementos clave en el buen comportamiento de las vías ferroviarias. La resistencia lateral es la reacción que ejerce el balasto

* Jefe de Área de Infraestructuras Tecnológicas. Responsable del Cajón Ferroviario del CEDEX.

Laboratorio de Geotecnia – CEDEX. Madrid (España). E-mail: jose.estaire@cedex.es

** Dr. Ingeniero de Caminos. Laboratorio de Geotecnia – CEDEX. Madrid.

E-mail: vicente.cuellar.mirasol@gmail.com

*** Licenciada en CC Geológicas, Laboratorio de Geotecnia – CEDEX. Madrid. E-mail: Maria.S.Ruiz@cedex.es

contra el movimiento lateral de la vía, siendo fundamental para evitar la aparición de pandeos en la vía. Esta resistencia lateral depende de varios factores tales como: el espesor de la capa de balasto, su tipo, la consolidación de la banqueta de balasto, su mantenimiento, el tipo y peso de la traviesas y las cargas que transmiten los trenes a su paso (Kish, 2011).

La medida de la estabilidad lateral se debe hacer en vía real, aunque su realización presenta grandes dificultades dado que tiene que cortarse el tráfico de trenes. Este hecho hace que sea interesante realizar los ensayos de estabilidad lateral en laboratorio, especialmente si alguno de los elementos de la vía son prototipos y no se han usado previamente en vías reales o en el caso de que se realicen ensayos bajo condiciones ambientales no usuales (por ejemplo, tras una tormenta de arena en una línea de alta velocidad que atraviere un desierto de arena).

El Cajón Ferroviario del CEDEX es una instalación de ensayos que permite construir modelos de vía férrea a escala real 1:1 en la que se pueden realizar diferentes tipos de ensayos, entre los que se encuentran los ensayos de estabilidad lateral en vías.

2 – EL CAJÓN FERROVIARIO DEL CEDEX (CTB)

El Cajón Ferroviario del CEDEX (CTB, acrónimo de su versión en inglés, CEDEX Track Box) es una instalación de 21 m de longitud, 5 m de anchura y 4 m de profundidad cuyo principal objetivo es ensayar, a escala 1:1, secciones completas de vía de líneas convencionales y de alta velocidad, al paso de trenes de pasajeros y mercancías y tráfico mixto, a velocidades hasta 400 km/h. En la Figura 1 se muestra una vista general de la instalación.

La principal ventaja de la instalación es la posibilidad de ejecutar ensayos de fatiga de forma rápida, ya que en una semana de trabajo se puede reproducir el efecto del paso de trenes que circulan durante un año por una sección real.

La reproducción del efecto del acercamiento, paso y alejamiento de un tren en la sección de ensayo, como ocurre en una vía real, se realiza mediante la aplicación de cargas verticales, desfasadas adecuadamente en función de la velocidad de los trenes que se estén simulando, producidas por tres pares de actuadores servohidráulicos que pueden aplicar una carga máxima de 250 kN a 50 Hz de frecuencia, situados en cada carril y separados 1,5 m en la dirección

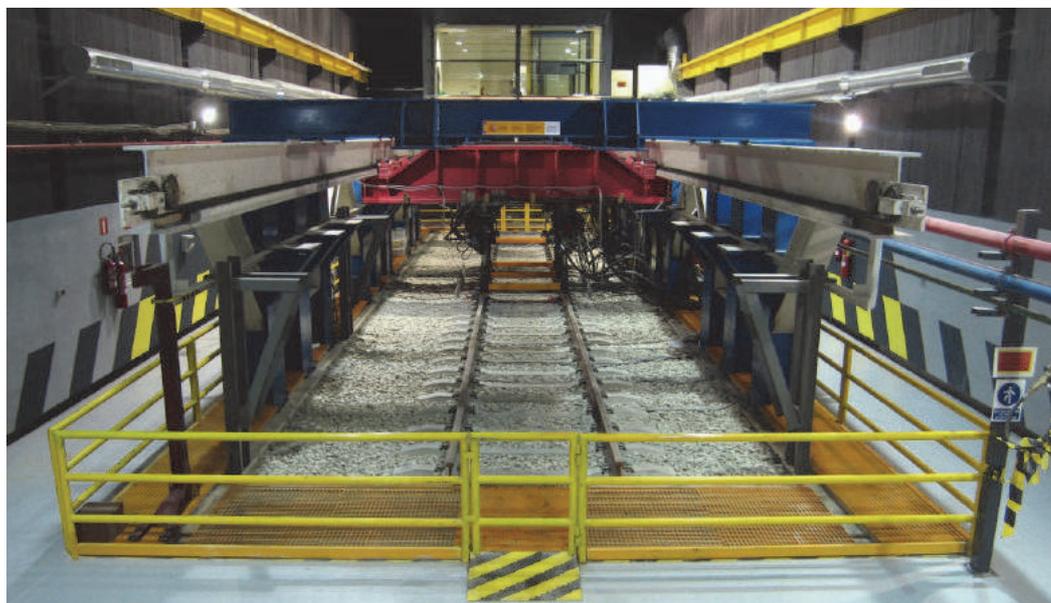


Fig. 1 – Vista general del Cajón Ferroviario.

longitudinal.

Además, la reproducción de los efectos dinámicos, que inducen las imperfecciones en el carril en forma de cargas de baja amplitud a altas frecuencias, también puede hacerse mediante el uso de dos actuadores piezoeléctricos que pueden aplicar cargas de hasta 20 kN a una frecuencia de 300 Hz.

La respuesta de la vía se mide mediante una serie de sensores tipo LVDT, geófonos, acelerómetros y células de presión instaladas dentro del terraplén y de las capas de asiento (balasto, subbalasto y capa de forma) de la vía. Por otra parte, la respuesta de la superestructura se mide con un cierto número de transductores mecánicos de desplazamiento, sensores láser, geófonos y acelerómetros instalados en los diferentes componentes de la vía (carril, traviesa y suela).

El Cajón Ferroviario del CEDEX se ha utilizado en los últimos años para investigar diferentes temas, tales como (Estaire et al, 2017):

- Medida de la rigidez vertical de vía en diferentes condiciones de vía.
- Determinación de la estabilidad lateral de vía.
- Estudio del comportamiento a corto y largo plazo de secciones de vía mediante la deducción de las curvas de asiento permanente del balasto obtenidas en ensayos de fatiga.
- Cálculo de las deflexiones de vía bajo el paso de trenes a altas velocidades hasta 400 km/h.
- Optimización del espesor de la capa de subbalasto bituminoso.
- Análisis del comportamiento de traviesas con suelas bajo traviesas (USP).
- Estudio del comportamiento de Líneas de Alta Velocidad sometidas a tráfico mixto de pasajeros y mercancías.
- Calibración de modelos numéricos en 3D.

3 – PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

3.1 – Sistema de carga

El ensayo de resistencia lateral de vía se ejecuta en una traviesa situada en la capa de balasto, una vez que se han liberado las sujeciones de los carriles. El útil para realizar el ensayo se atornilla a los extremos laterales de la traviesa y se sujeta al actuador hidráulico, encargado de generar las cargas horizontales, perpendiculares al eje de vía. El actuador hidráulico horizontal está equipado con una célula de carga conectada al sistema de adquisición de datos. Es de destacar que, durante la realización del ensayo, no se aplica ninguna carga vertical sobre la traviesa. La Figura 2 muestra el útil de ensayos (pintado de rojo) una vez montado en la traviesa.

El útil está constituido por una pieza de acero que se fija a uno de los marcos de reacción del Cajón. El actuador hidráulico es servo-controlado, tiene una capacidad de 50 kN y sus pistones tienen un rango de desplazamiento de 40 mm (± 20 mm). Algunos de estos detalles pueden verse en los esquemas de la Figura 3.



Fig. 2 – Equipo de tiro de traviesa para la realización de los ensayos, montado sobre una traviesa.

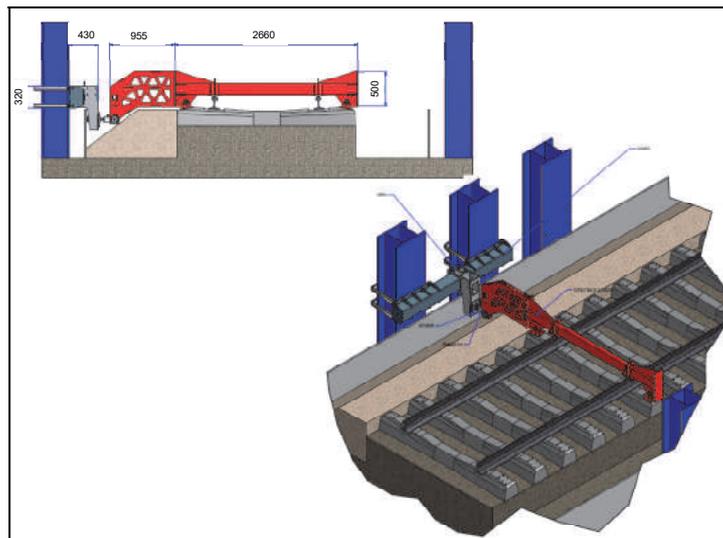


Fig. 3 – Esquemas del equipo de tiro de traviesa para la realización de los ensayos.

3.2 – Aplicación de cargas

La carga horizontal se aplica a la traviesa mediante el actuador hidráulico con una velocidad programada, mayor al comienzo del ensayo cuando los movimientos de la traviesa son menores y disminuyendo la velocidad a medida que aumentan los movimientos. No se ha aplicado carga vertical a la traviesa durante la realización del ensayo. La historia temporal de cargas horizontales aplicada en unos de los ensayos puede verse en la Figura 4.

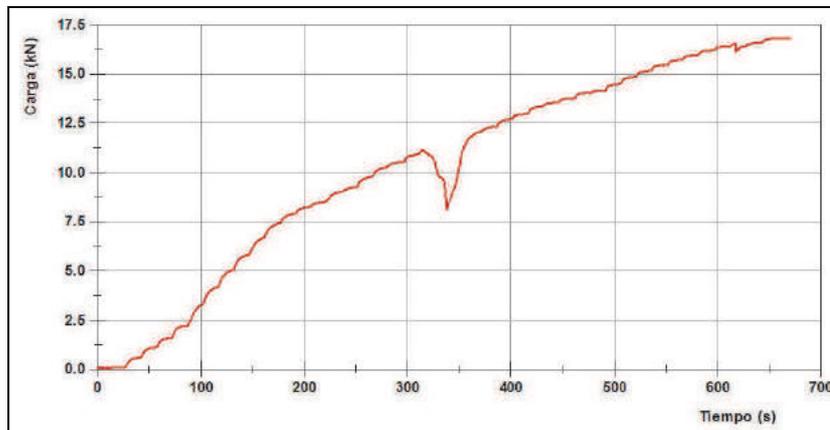


Fig. 4 – Evolución temporal de la carga aplicada durante uno de los ensayos.

Como puede verse en este caso, la historia temporal de cargas puede dividirse en tres etapas:

- Etapa inicial (comprendida entre 25 y 200 segundos): la carga se incrementó hasta un valor de 8,5 kN, a una velocidad de 4,9 kN/s.
- Etapa intermedia (entre 200 y 620 segundos): la carga se elevó de 8,5 a 16 kN, a una velocidad de 1,8 kN/s. El pequeño ciclo de carga-descarga que aparece fue debido a un ligero fallo en el control de aplicación de carga que no tuvo consecuencias en el desarrollo posterior del ensayo.
- Etapa final (de 620 a 680 segundos): la carga se mantuvo estable alrededor de un valor de 16 kN.

3.3 – Sistema de medición

El sistema de medición instalado para controlar los movimientos de la traviesa estaba formado por:

- Dos sensores láser para registrar los desplazamientos horizontales de la traviesa al aplicar las cargas. Los emisores láser se montaron en otra traviesa situada a 1,80 m de distancia, mientras que los receptores láser se instalaron en la traviesa de ensayo.
- Dos potenciómetros, instalados en las partes exteriores de ambos carriles, para medir el desplazamiento vertical relativo entre carril y traviesa con el objetivo de comprobar que durante todo el ensayo no se produce rozamiento entre ambos elementos.

La Figura 5 muestra los dos elementos del sistema de medición.



Fig. 5 – Vista de los elementos del sistema de medición, una vez instalados en la traviesa de ensayo.

4 – MATERIALES ENSAYADOS

4.1 – Balasto

4.1.1 – Ensayos de identificación

El balasto utilizado en este trabajo es de origen andesítico, como se puso de manifiesto con los resultados de los ensayos de difracción de Rayos X en los que se obtuvieron los siguientes resultados: 62% plagioclasa –andesita-; 14% cuarzo; 8% feldespatos potásicos; 6% biotita; 6% clorita; 4% hornablenda y 4% otros. El aspecto del balasto puede verse en la Figura 6.



Fig. 6 – Aspecto del balasto utilizado en los ensayos.

La curva granulométrica muestra que el tamaño máximo es de unos 60 mm, el diámetro medio (D_{50}) es 40 mm, mientras que el contenido de finos es despreciable. El coeficiente de uniformidad, definido como el cociente entre los tamaños de partículas correspondientes a los percentiles 60 y 30, es 1,2.

Los ensayos realizados a las partículas de balasto han permitido obtener los siguientes valores de diferentes parámetros, de acuerdo a la terminología utilizada en EN 13450 “Áridos para balasto”:

- Índice de Lajas: 8% (clasifica al balasto como Categoría FI15).
- Índice de forma: 9% (clasifica al balasto como Categoría SI10).
- Partículas de longitud ≥ 100 mm: 2% (clasifica al balasto como Categoría A).
- Coeficiente de Los Ángeles: 13% (clasifica al balasto como Categoría LARB 14).
- Coeficiente Micro-Deval: 3% (clasifica al balasto como Categoría MDERB 5).
- Ensayo de sulfato de magnesio: 1%.
- Absorción de agua: 1,7%.
- Densidad específica de las partículas: 2,60 t/m³.
- Densidad mínima: 1,28 t/m³.
- Resistencia a carga puntual (PLT): 6,3-8,0 MPa ($I_{s,50}$).

A la vista de estos resultados, el balasto se puede clasificar como de muy alta calidad y, de acuerdo a EN 13450, como de clase A, por lo que cumple todos los requisitos para su uso en las infraestructuras de las Líneas de Alta Velocidad.

4.1.2 – Ensayos de corte directo

4.1.2.1 – Equipo de corte utilizado

Los ensayos se realizaron en una caja de corte de grandes dimensiones, que posee el Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), que tiene un plano de corte de 1 x 1 m. Con esas dimensiones, el tamaño máximo de partícula que puede utilizarse en los ensayos es 8,5 cm, ya que se deben cumplir los requisitos establecidos en ASTM D3080: un ratio 1/2 entre el espesor y la anchura de la muestra y un ratio 1/6 entre el tamaño máximo de partícula y el espesor de la muestra. En este caso, esta limitación se cumple dado que el tamaño máximo del balasto ensayado es 6 cm.

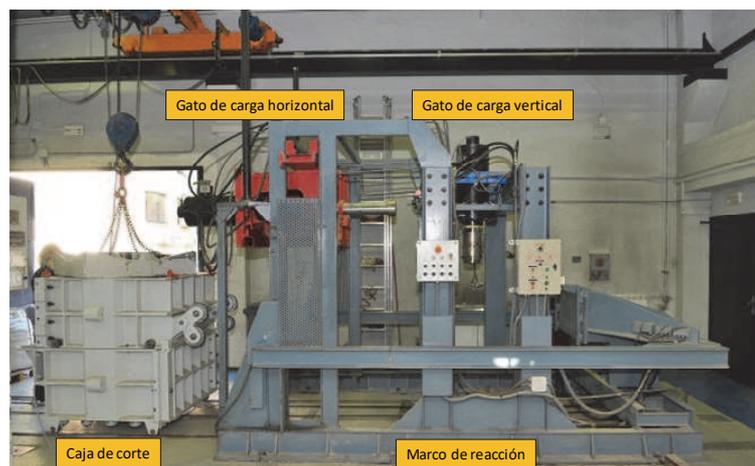


Fig. 7 – Fotografía del equipo de corte directo utilizado en los ensayos, en la que la caja de corte está fuera del marco de reacción del equipo de aplicación de cargas

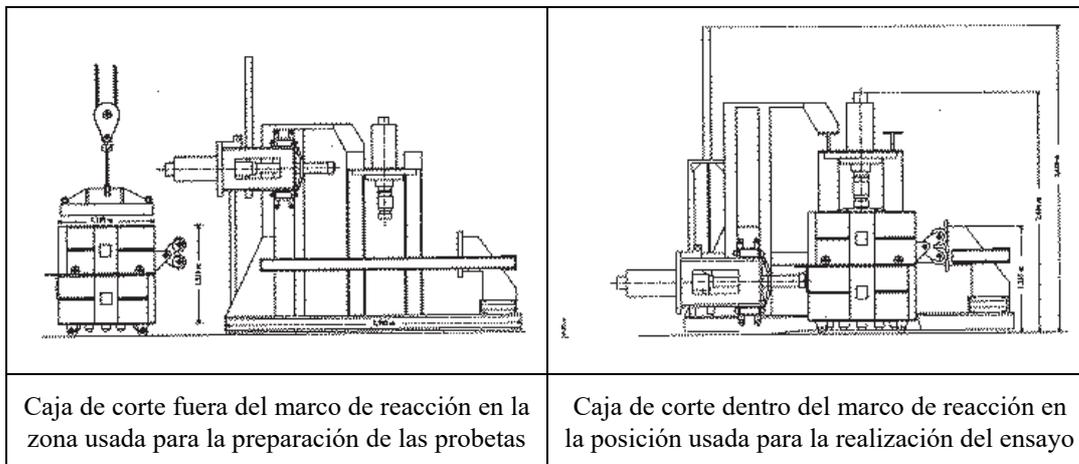


Fig. 8 – Esquema del equipo de corte directo utilizado en los ensayos.

La máxima carga vertical que puede imponerse al material ensayado es de 1000 kN. El máximo desplazamiento horizontal de la caja de corte es 25 cm, suficiente generalmente para obtener la resistencia de pico en este tipo de materiales granulares. La carga horizontal, con un máximo de 1000 kN, puede imponerse a una velocidad constante, que puede estar comprendida entre 0,5 y 45 mm/min; en este estudio se utilizó una velocidad de 0,8 mm/min. Este equipo se ha utilizado profusamente para el estudio de escolleras portuarias y de presas (Estaire y Olalla, 2005 y 2006). Las Figuras 7 y 8 muestran, respectivamente, una fotografía y un esquema del equipo utilizado en los ensayos.

4.1.2.2 – Preparación de muestras en los ensayos realizados

Se han realizado tres ensayos, diferenciados en la forma de preparación de las muestras:

- Ensayo A: las muestras se prepararon vertiendo el material en la caja de corte, sin compactación posterior. Estas muestras podrían ser consideradas como representativas de un balasto sin estabilizar en vía. La densidad obtenida fue de 1,33 t/m³, un 4% mayor que la mínima obtenida en laboratorio (1,28 t/m³).
- Ensayo B: las muestras se compactaron ligeramente, en cinco capas, con un compactador dinámico manual, cuya imagen se recoge en la Figura 9. La densidad que se logró en las muestras fue de 1,50 t/m³, muy similar a la normalmente utilizada en vías reales.
- Ensayo C: las muestras se prepararon mediante compactación en cinco capas con el mismo compactador y, adicionalmente, cada una de las capas se contaminó completamente, antes de la compactación, con una arena fina, uniforme, seca y cuarcítica, como puede verse en la Figura 10. Estas muestras podrían ser representativas de la capa de balasto de una línea de alta velocidad situada en una zona desértica, una vez producida una tormenta de arena. La densidad obtenida fue de 1,95 t/m³, considerando también la arena existente en los huecos de la estructura del balasto.



Fig. 9 – Compactadora manual utilizada en los ensayos.



Fig. 10 – Aspecto de una capa de balasto completamente contaminada con arena fina y uniforme.

Las tensiones verticales utilizadas en los ensayos cubren un amplio rango de tensiones desde 10 hasta 200 kPa, dado que:

- La tensión menor (10 kPa) corresponde a la presión vertical en el centro de una capa de balasto de espesor normal (35 cm). Esta tensión es la suma de la presión vertical debido al peso de la traviesa (3,5 kN actuando en un área horizontal de unos 0,65 m²) y el peso de la columna de balasto (17 cm de un material que tiene un peso específico de unos 15,5 kN/m³).
- La tensión vertical intermedia (100 kPa) corresponde a la presión en la superficie de la capa de balasto transmitida por la traviesa cuando se considera el efecto estático de la carga de un eje de un tren de pasajeros (alrededor de 170 kN) cuando actúa sobre la superficie horizontal de la traviesa (0,65 m²), teniendo en cuenta además un factor de distribución de cargas entre traviesas de 0,4, de acuerdo a la teoría de Winkler (Lichtberger, 2011).
- La tensión vertical mayor (200 kPa) corresponde a la presión en la superficie de la capa de balasto transmitida por la traviesa cuando se considera el efecto dinámico de la carga de un eje de un tren de mercancías (alrededor de 225 kN) cuando actúa sobre la superficie

horizontal de la traviesa ($0,65 \text{ m}^2$), teniendo en cuenta además un factor de distribución de cargas entre traviesas de 0,4, de acuerdo a la teoría de Winkler y un factor de amplificación dinámica, cuantificado normalmente como de 1,35 (Lichtberger, 2011).

4.1.2.3 – Resultado de los ensayos

La Figura 11 muestra los resultados de los Ensayos A y B, con objeto de visualizar las diferencias entre las muestras preparadas por vertido y compactadas.

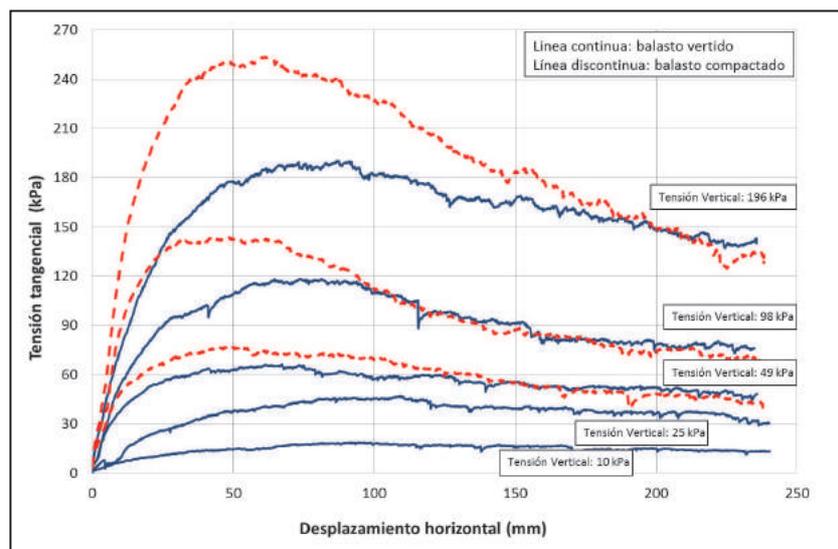


Fig. 11 – Resultado de los ensayos de corte directo realizados con muestras preparadas mediante vertido y compactación.

Puede verse que para las tres tensiones verticales comunes a los dos tipos de ensayos, la resistencia de pico obtenida con las muestras de balasto compactado es superior a la correspondiente a las muestras de balasto vertido, pasando de 1,19 veces superior para la tensión de 49 kPa a 1,33 veces superior para la tensión vertical de 196 kPa. Sin embargo, las resistencias obtenidas al final de los ensayos, para grandes desplazamientos horizontales alrededor de 250 mm, son prácticamente coincidentes en ambos tipos de ensayos para todas las tensiones verticales aplicadas, como preconiza la teoría del Estado Crítico para materiales granulares.

Por otra parte, la Figura 12 muestra los resultados de los Ensayos B y C para comprobar la diferencia de comportamiento del balasto compactado cuando está limpio y cuando está completamente contaminado con arena fina y uniforme.

Puede verse que el balasto contaminado con arena tiene un comportamiento más rígido comparado con el balasto limpio. Esta diferencia es mayor para las cargas verticales menores (49 y 98 kPa) mientras que para la carga vertical mayor (198 kPa) las curvas son bastante similares. Además, la resistencia de pico obtenida en las muestras de balasto contaminado es mayor que en las de balasto limpio (1,2 veces superior para la tensión vertical de 49 kPa, 1,1 para la tensión de 98 kPa e igual para la de 196 kPa), mientras que la resistencia para grandes desplazamientos es bastante similar.

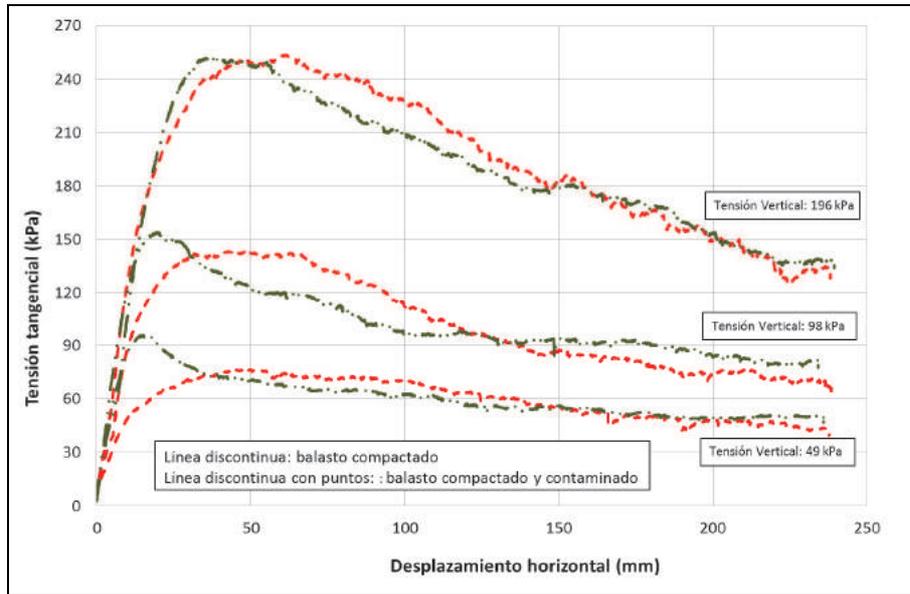


Fig. 12 – Resultado de los ensayos de corte directo realizados con muestras compactadas, limpias y completamente contaminadas con arena fina y uniforme.

4.1.2.4 – Análisis de los resultados de los ensayos

Los ensayos se interpretaron de acuerdo al criterio de rotura de Mohr-Coulomb (con y sin cohesión) y con un modelo parabólico, tal como se indica en Estaire y Santana (2017) donde se hace un análisis pormenorizado de estos métodos de interpretación. La Figura 13 muestra, por un lado, los valores de la resistencia de pico obtenida en los tres ensayos, en función de la tensión vertical aplicada, y, por otro lado, las rectas del modelo de Mohr-Coulomb y las curvas parabólicas que mejor ajustan los resultados.

Los parámetros geotécnicos obtenidos de las tres interpretaciones mencionadas anteriormente, mediante un ajuste por mínimos cuadrados, se recogen en la Tabla 1.

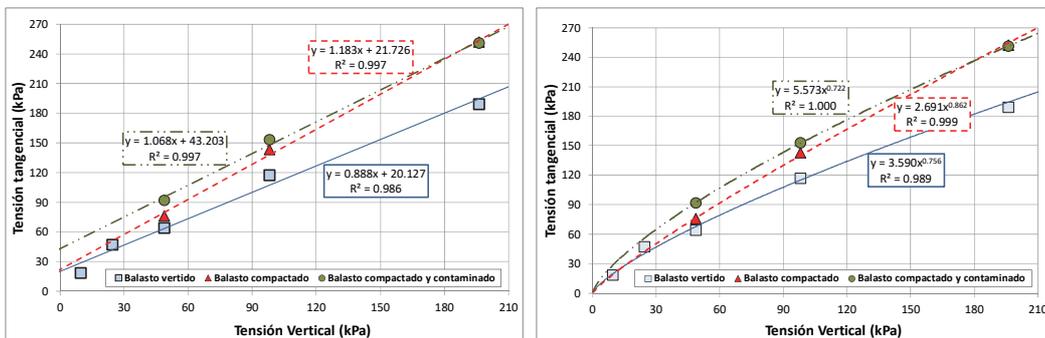


Fig. 13 – Resistencias de pico obtenidas de los ensayos junto con las rectas de ajuste del modelo de Mohr-Coulomb y las curvas de ajuste del modelo parabólico.

Tabla 1 – Parámetros de resistencia de pico obtenidos de la interpretación de los ensayos

Método de preparación de las muestras	Mohr-Coulomb (con cohesión) ($\tau = c + \phi_v \cdot \tan \sigma_v$)			Mohr-Coulomb (sin cohesión) ($\tau = \phi_v \cdot \tan \sigma_v$)			Modelo Parabólico ($\tau = a \sigma_v^b$; τ y σ_v en kPa)		
	c (kPa)	ϕ_v (°)	Coef. Regr.	c (kPa)	ϕ_v (°)	Coef. Regr.	a	b	Coef. Regr.
Vertido (Ensayo A)	20	41	0,986	0	46	0,936	3,59	0,76	0,989
Compactado (Ensayo B)	20	50	0,997	0	53	0,977	2,62	0,87	0,999
Compactado contaminado (Ensayo C)	45	47	0,997	0	54	0,900	5,58	0,72	1,000

El análisis de la Tabla 1 permite resaltar los siguientes aspectos:

- El uso del modelo de Mohr-Coulomb completo (con cohesión) tiene poco sentido ya que es difícil considerar el balasto como un material con un comportamiento cohesivo, como parece deducirse de los valores obtenidos relativamente elevados de cohesión, entre 20 and 45 kPa, combinados, en este caso, con valores del ángulo de rozamiento entre 41 y 50°.
- Las interpretaciones que pueden considerarse mejores son las obtenidas con el modelo parabólico, como puede verse en los coeficientes de regresión que son cercanos a 1,0 en los tres ensayos. Además, este modelo implica considerar un comportamiento no-cohesivo, tal como se supone que el balasto debe tener.
- El balasto vertido, sin compactación posterior, tiene los menores valores de ángulo de rozamiento: 46°, en los casos en los que no se considera cohesión.
- Los ángulos de rozamiento para el balasto compactado, tanto limpio como contaminado, son bastante similares: 53 y 54°, considerando cohesión nula, respectivamente.

Una vez obtenidas las curvas de ajuste parabólicas, se puede deducir el valor del ángulo de rozamiento secante instantáneo para cualquier tensión vertical, tal como se muestra en la Figura 14.

Puede verse que, en los tres casos, los valores del ángulo de rozamiento secante instantáneo decrecen con el incremento de la carga vertical aplicada. Los valores más bajos se obtienen en los ensayos realizados con el balasto vertido mientras que en los otros dos ensayos (realizados con balasto compactado, o limpio o contaminado) los ángulos de rozamiento son mayores y bastante similares entre ellos para tensiones verticales mayores de 100 kPa. Es importante resaltar que para tensiones verticales bajas, los valores del ángulo de rozamiento secante instantáneo deducidos del modelo parabólico están comprendidos entre 65° y 80°.

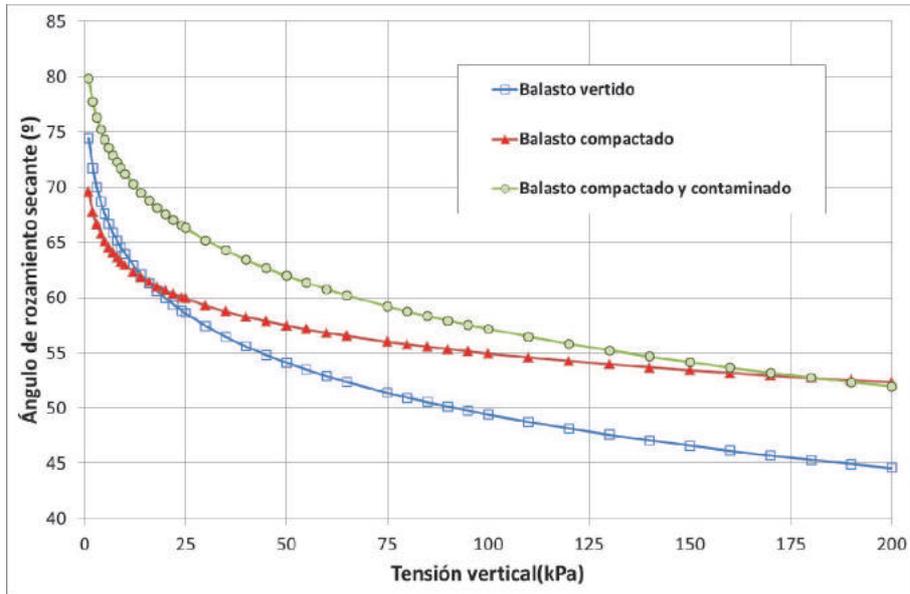
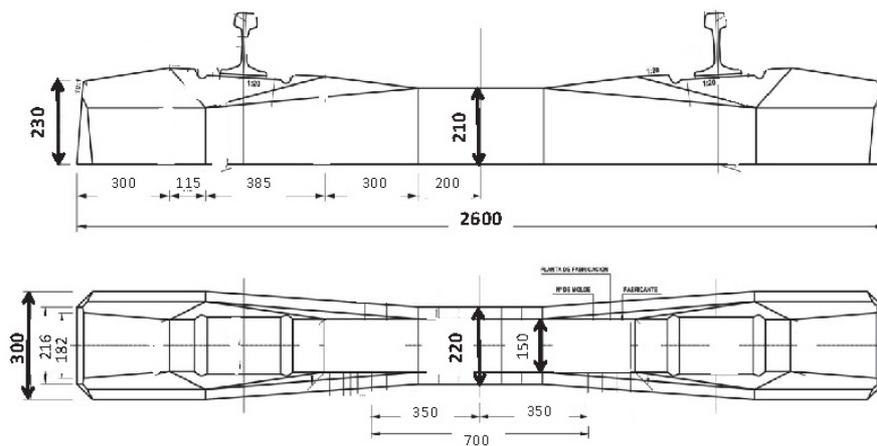


Fig. 14 – Variación del ángulo de rozamiento secante instantáneo con la tensión vertical, de acuerdo al modelo parabólico.

4.2 – Traviesas

4.2.1 – Travesía española

La travesía utilizada en dos de los ensayos es la que se ha colocado profusamente en España por ADIF en las líneas de alta velocidad; así, por ejemplo, en la línea Madrid-Barcelona se han utilizado 1,7 millones de este tipo de traviesas. Es una travesía monobloque pretensada del tipo AI-99. Su peso medio es 3,185 kN y tiene una longitud de 2,60 m, una anchura en la base de 0,22 m en el centro y de 0,30 m en los extremos, y una altura de 0,21 m en el centro y de 0,23 m en los extremos. La Figura 15 muestra la planta y alzado de la travesía utilizada.



(Cotas en mm)

Fig. 15 – Planta y alzado de la travesía española utilizada en los ensayos.

4.2.2 – Travesía alemana con suela bajo travesía (USP)

La travesía utilizada en uno de los ensayos es un prototipo procedente de Alemania que se ensayó, con otros objetivos, en el Cajón Ferroviario durante el programa de investigación RIVAS del 7º Programa Marco Europeo (RIVAS, 2013). Es una travesía monobloque pretensada del tipo AB90.2. Su peso medio es 6,10 kN y tiene una longitud de 2,80 m, una anchura en la base de 0,245 m en el centro y de 0,32 m en los extremos, y una altura de 0,230 m en el centro y de 0,274 m en los extremos. Las traviesas llevan incorporado, en toda la base, una suela bajo travesía (USP) del tipo G04 (SLN 1010) con un módulo estático de 0,1 N/mm³., como puede verse en la Figura 16.



Fig. 16 – Fotografía de la suela bajo travesía de la travesía alemana.

Por su parte, la Figura 17 muestra la planta y alzado de este tipo de travesía, mientras que la Figura 18 muestra una fotografía con los dos tipos de traviesas utilizadas en los ensayos, donde puede apreciarse la diferencia entre ellas.

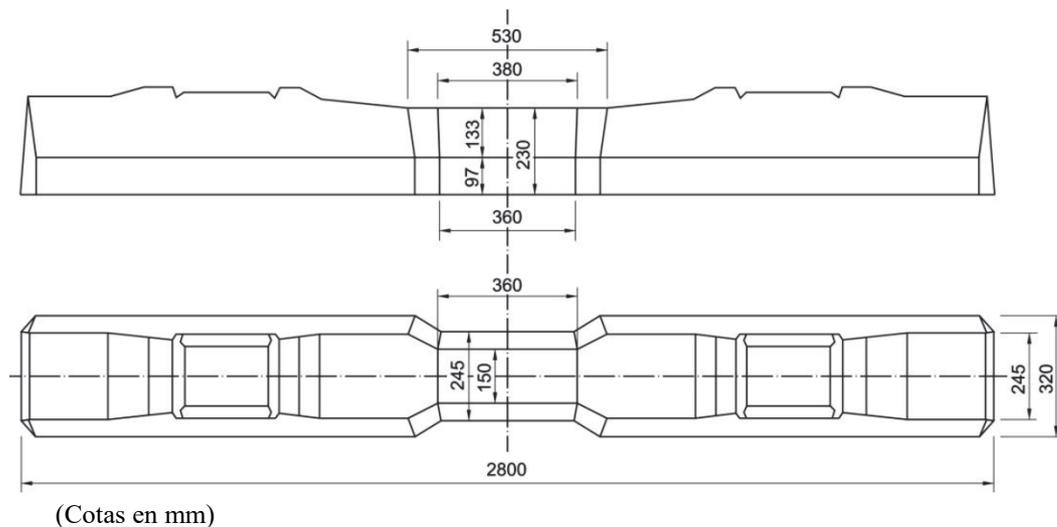


Fig. 17 – Planta y alzado de la travesía alemana utilizada en los ensayos.



Fig. 18 – Fotografía de las dos traviesas utilizadas en los ensayos (arriba, la traviesa española y abajo la alemana).

5 – ENSAYOS DE ESTABILIDAD LATERAL DE VÍA

5.1 – Ensayos realizados

Se han realizado tres ensayos para analizar la estabilidad lateral de la vía en tres condiciones diferentes de vía, tal como se recoge en la Tabla 2. Estos ensayos se realizaron después de haber llevado a cabo ensayos de fatiga en los que se aplicaron el número de ejes de carga indicados.

Tabla 2 – Condiciones de realización de los ensayos

Ensayo	Traviesa	Condiciones del balasto	Número de ejes verticales aplicados antes de realizar el ensayo
1	Española	Compactado y limpio	0,5 millones
2	Española	Compactado y contaminado con arena	1,4 millones
3	Alemana	Compactado y limpio	2,0 millones

5.2 – Ensayo 1: traviesa española sobre balasto limpio

La Figura 19 muestra el resultado del Ensayo 1, como relación entre la carga horizontal aplicada sobre la traviesa y el desplazamiento horizontal medido en dicha traviesa.

Los principales aspectos que pueden resaltarse de este ensayo son:

- La carga horizontal tiene un crecimiento inicial bastante pronunciado, lineal respecto al desplazamiento. En esta etapa, la carga se incrementó hasta 5 kN mientras se medía un desplazamiento horizontal de 0,11 mm, de los que se dedujo un módulo de reacción de 45,5 kN/mm.
- La carga pico fue de 12,5 kN que se alcanzó para un desplazamiento de 2,5 mm.
- La forma asintótica de la curva, con un desplazamiento máximo de unos 14 mm, indica que, en el ensayo, se alcanzaron unas condiciones estacionarias, indicativo de haber llegado a una situación de estado límite último de deslizamiento por la base de la traviesa, por lo que se puede pensar que se han desarrollado completamente todos los factores contribuyentes a dicha resistencia.

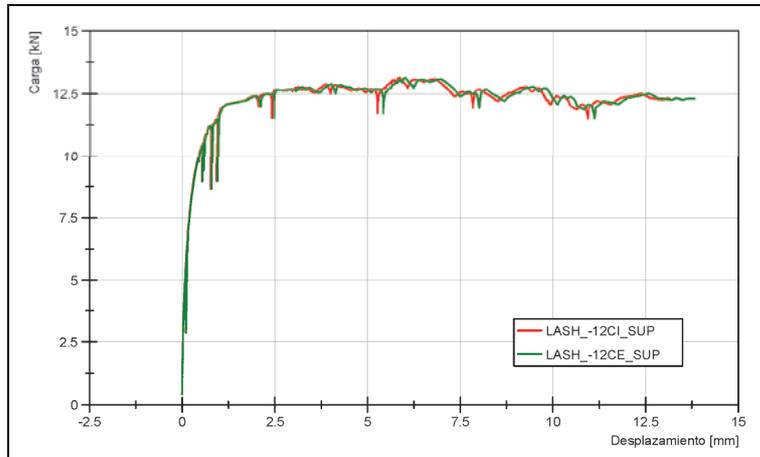


Fig. 19 – Resultado del Ensayo 1, realizado en una traviesa apoyada sobre balasto limpio.

5.3 – Ensayo 2: traviesa española sobre balasto contaminado con arena

El resultado del Ensayo 2 se recoge en la Figura 20. En este caso, el ensayo se detuvo cuando el desplazamiento total de la traviesa era de 2 mm para evitar algunos problemas que aparecieron en el Ensayo 1 durante las operaciones posteriores para devolver la traviesa a su posición original.

El análisis de la figura permite realizar los siguientes comentarios:

- Se puede apreciar una etapa inicial lineal en la que la carga llega hasta 5 kN para un desplazamiento horizontal de 0,043 mm, lo que implica un módulo de reacción de 116 kN/mm, 2,55 veces mayor que el deducido en el Ensayo 1.
- La carga pico fue de 16 kN (1,28 veces superior a la del Ensayo 1) alcanzado para un desplazamiento de 1,2 mm, después del cual se produjo un ligero descenso.

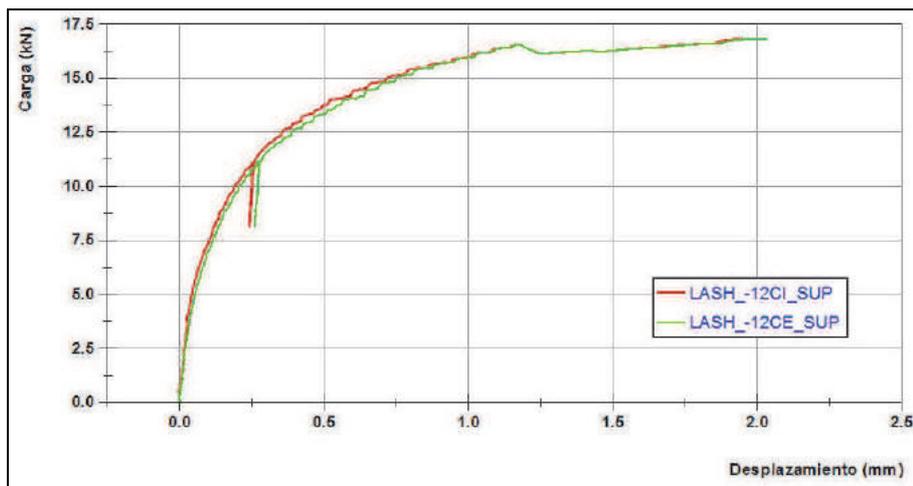


Fig. 20 – Resultado del Ensayo 2, realizado en una traviesa apoyada sobre balasto completamente contaminado con arena fina y uniforme.

- La curva tiene una forma asintótica lo que valida el ensayo, desde el punto de vista de las condiciones estacionarias alcanzadas, representativas de un estado límite último de deslizamiento por la base.

La Figura 21 muestra conjuntamente los resultados de los Ensayos 1 y 2 para facilitar su comparación. Puede verse, por un lado, el comportamiento más rígido de la traviesa sobre balasto contaminado y, por otro, la diferencia de resistencia lateral entre ambos ensayos.

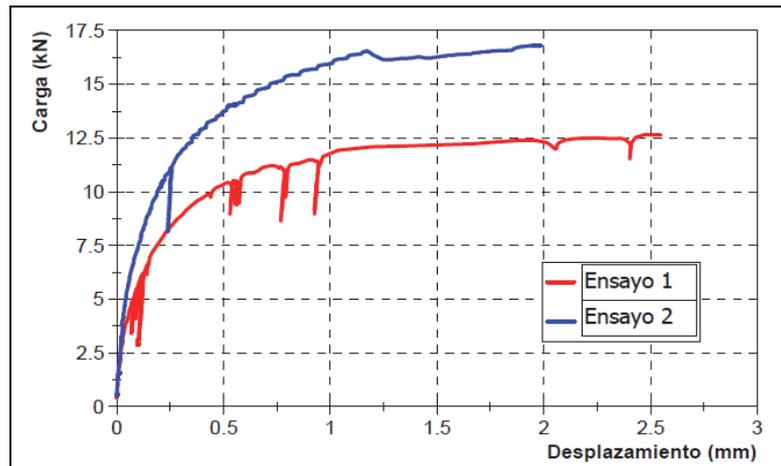


Fig. 21 – Comparación de los resultados de los Ensayos 1 y 2: traviesa española sobre balasto limpio y contaminado con arena, respectivamente

5.4 – Ensayo 3: traviesa alemana con USP sobre balasto limpio

La Figura 22 muestra el resultado del Ensayo 3, como relación entre la carga horizontal aplicada sobre la traviesa y el desplazamiento horizontal medido en dicha traviesa.

Los principales aspectos que pueden resaltarse de este resultado son:

- La carga horizontal tiene un crecimiento inicial lineal respecto al desplazamiento hasta que se alcanza una carga de unos 7,5 kN, correspondiente a un desplazamiento horizontal de 0,20 mm. Estos valores implican un módulo de reacción de 37,5 kN/mm, parecido al deducido en el Ensayo 1.
- La resistencia de pico fue de 17,1 kN (1,37 veces superior al obtenido en el Ensayo 1), realizado con una traviesa sin suela bajo traviesa (12,5 kN), debido muy posiblemente al mayor peso de esta traviesa ensayada (6,1 frente a 3,1 kN)
- El desplazamiento para el que se obtuvo el pico de carga fue de unos 5 mm, bastante superior al obtenido en el Ensayo 1 con la traviesa sin suela, muy posiblemente debido a la influencia de la deformación del material elastomérico que constituye la suela bajo traviesa.
- Una vez pasado el pico de carga, la carga disminuyó hasta unos 16,3 kN para unos 10 mm de desplazamiento para después comenzar otra vez a aumentar hasta llegar a 18,5 kN cuando el desplazamiento era de unos 16,5 mm y el ensayo se dio por finalizado.

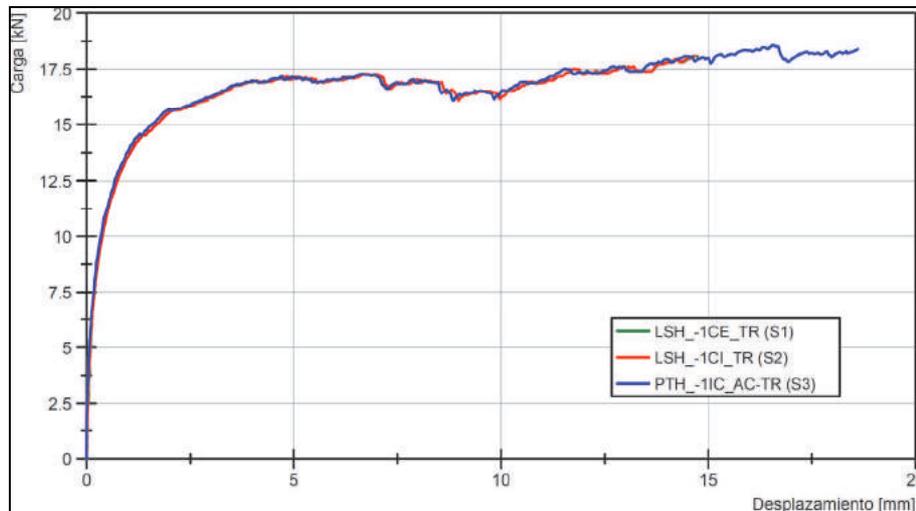


Fig. 22 – Resultado del Ensayo 3, realizado en una traviesa equipada con suela bajo balasto (USP) apoyada sobre balasto limpio.

De forma general se puede afirmar que durante los tres ensayos, se midió el desplazamiento relativo entre la traviesa y el carril lo que permitió comprobar que no hubo contacto entre esos elementos en ningún momento. El rozamiento que se hubiera podido producir en ese contacto habría invalidado los resultados ya que dicha fricción habría incrementado artificialmente la carga necesaria para desplazar horizontalmente la traviesa.

6 – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 – Comparación con ensayos en vía real

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados en condiciones de laboratorio en el CTB se pueden comparar con los ensayos de resistencia lateral denominados STPT (por sus siglas en inglés: Single Tie Push Test) realizados en vía real para analizar la resistencia lateral de las vías. El equipo normalmente utilizado en los ensayos STPT puede verse en la Figura 23, (Sussmann et al, 2014).

Los resultados obtenidos en los ensayos STPT son curvas con el aspecto que se ve en la Figura 24. Esas curvas son generalmente asintóticas aunque, en algunos casos, presentan un pico de carga no muy marcado, que se alcanza para un desplazamiento de 2,5 mm (0,1 pulgadas). La forma de las curvas y el desplazamiento para alcanzar la carga máxima son bastante parecidos a las curvas obtenidas en los ensayos realizados en el CTB, presentados anteriormente.

Por otra parte, la Tabla 3 recoge los valores obtenidos en 124 ensayos STPT, tal como los resume Sussmann et al, 2014. En los 35 ensayos realizados en vías después de haberlas estabilizado, por tanto en condiciones similares a las existentes en los ensayos del CTB, el valor medio es de 11,2 kN. Este valor es un poco menor (90%) que el obtenido en el Ensayo 1, realizado con balasto limpio (12,5 kN).

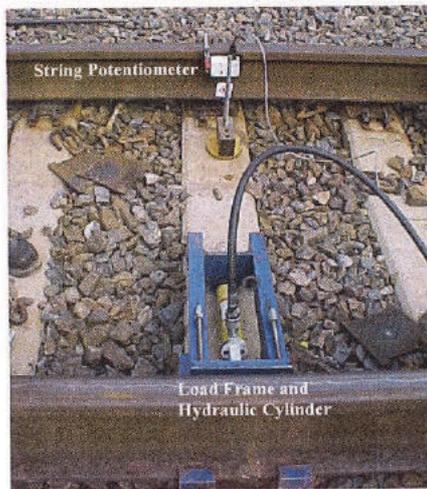


Fig. 23 – Equipo para la realización de ensayo de resistencia lateral STPT (Single Tie Push Test) en una vía real (Sussmann et al, 2014).

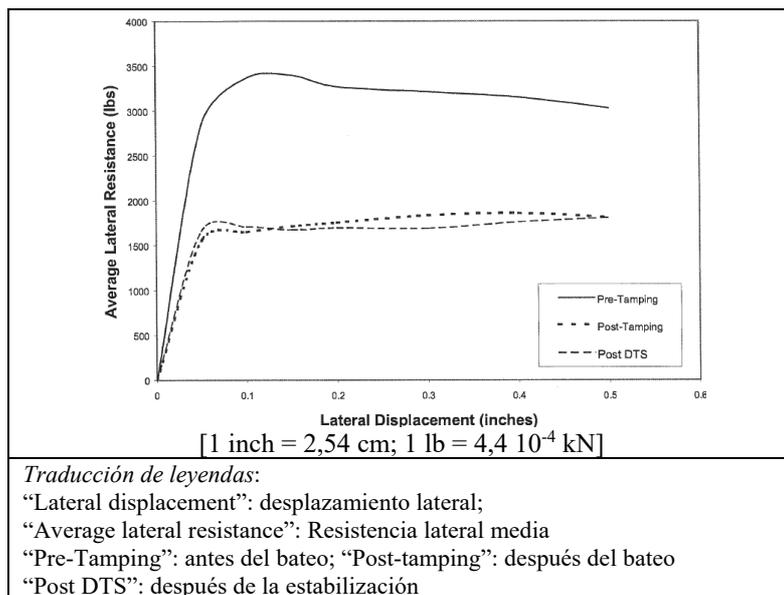


Fig. 24 – Resultados obtenidos en ensayos de resistencia lateral STPT realizados en diferentes momentos de la vida de la vía: antes del bateo , después del bateo y después de la estabilización (Samavedam, 1999).

Tabla 3 – Estadísticas de resultados de ensayos de resistencia lateral STPT (Sussmann et al, 2014)

Estado de la vía antes del ensayo	Valor medio (kN)	Desviación Standard (%)	Número de ensayos
Antes de regularización superficial	15,1	9,7	37
Después de regularización superficial	8,6	7,1	42
Después de estabilización	11,2	9,5	35
Después de tráfico	9,6	7,6	10

6.2 – Modelización analítica de los ensayos

La modelización analítica de los ensayos se ha realizado, basándose en los principios de la Mecánica del Suelo con dos objetivos básicos: validar los valores del ángulo de rozamiento del balasto obtenido en los ensayos de corte directo anteriormente descritos y determinar el peso relativo de los factores de los que depende la resistencia lateral de una vía férrea que son los siguientes:

- Rozamiento entre la base de la traviesa y el balasto subyacente (F_{bas}) que depende de:
 - el peso de la traviesa (W_{trav}), dado que no se ha aplicado carga vertical sobre la traviesa, y
 - el ángulo de rozamiento del contacto hormigón-balasto ($\delta_{t,b}$) que puede estimarse en un porcentaje (denominado como “ $c_{t,b}$ ” en este documento) del ángulo de rozamiento del propio balasto ($\phi_{balasto}$).

Este rozamiento por la base (F_{bas}) puede cuantificarse mediante la siguiente expresión:

$$F_{bas} = W_{trav} \tan(\delta_{t,b}) ; \text{siendo } \delta_{t,b} = c_{t,b} \cdot \phi_{balasto} \quad (1)$$

- Rozamiento entre las caras laterales de la traviesa y el balasto situado en esa zona (F_{lat}) que depende de:
 - la longitud de la traviesa ($Long_{trav}$),
 - el ángulo de rozamiento del contacto hormigón-balasto ($\delta_{t,b}$) en las caras laterales de la traviesa y
 - la presión horizontal sobre dichas caras que, a su vez, es función de:
 - el espesor de la capa de balasto por encima del plano de la base de la traviesa ($t_{balasto}$)
 - el peso específico del balasto ($\gamma_{balasto}$) y
 - el coeficiente de empuje horizontal del balasto (K_h).

Este rozamiento lateral (F_{lat}) puede cuantificarse mediante la siguiente expresión:

$$F_{lat} = 2 Long_{trav} \tan(\delta_{t,b}) [1/2 K_h (t_{balasto})^2 \gamma_{balasto}] \quad (2)$$

- Empujes en los hombros frontal y dorsal de la traviesa (F_{hmb}) que son debidos a los empujes pasivo y activo que se desarrollan en los hombros frontal y dorsal de la traviesa, respectivamente. El valor de los empujes depende de:
 - la anchura de la cuña de terreno afectada ($Anch_{cuña}$), cuyo valor se determinado de acuerdo al esquema de la Figura 25,
 - la altura de la traviesa en la zona del hombro (Alt_{trav}),
 - los coeficientes de empuje de tierras pasivo (K_p) y activo (K_a) del balasto que, a su vez, dependen del ángulo de rozamiento del propio balasto ($\varphi_{balasto}$), que se han calculado con la teoría de Rankine, como indica la Ecuación 5.
 - el grado de desarrollo de dichos empujes en función de los desplazamientos sufridos por la traviesa (d_{pas} y d_{act}).

Los empujes (F_e) pueden cuantificarse mediante las siguientes expresiones:

$$F_{hmb,pas} = Anch_{cuña} [1/2 K_p (Alt_{trav})^2 \gamma_{balasto}] d_{pas} \quad (3)$$

$$F_{hmb,act} = Anch_{cuña} [1/2 K_a (Alt_{trav})^2 \gamma_{balasto}] d_{act} \quad (4)$$

$$K_a = [\tan(45-\varphi/2)]^2 ; K_p = [\tan(45+\varphi/2)]^2 \quad (5)$$

Como puede verse, las expresiones anteriores dependen de una serie de parámetros relativos a las traviesas y al balasto, cuyos valores se recogen en la Tabla 4.

El resto de parámetros cuyos valores no son conocidos son los siguientes:

- El coeficiente reductor (denominado “ $c_{t,b}$ ”) del ángulo de rozamiento del contacto hormigón-balasto ($\delta_{t,b}$) con respecto al ángulo de rozamiento del propio balasto ($\varphi_{balasto}$), cuyo valor se estima normalmente entre 2/3 y 1,0.
- El coeficiente de empuje horizontal del balasto (K_h), cuyo valor debe ser elevado dado que el balasto se compacta inicialmente en obra y posteriormente se va compactando por la vibración producida por los trenes circulantes. Se pueden considerar valores comprendidos entre 0,75 y 1,0.

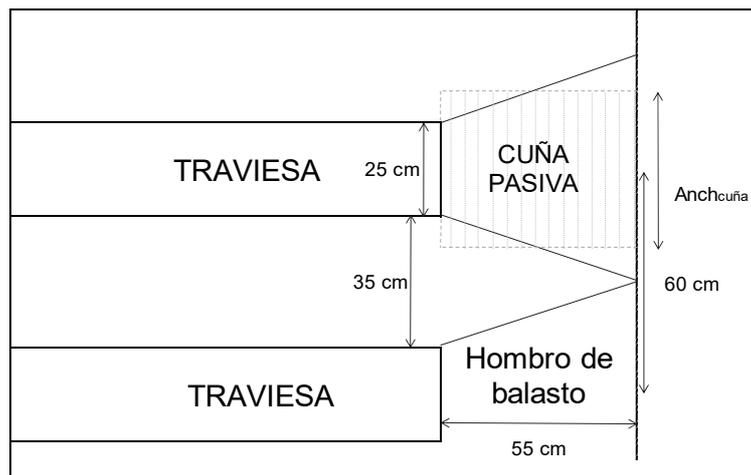


Fig. 25 – Determinación de las dimensiones de la cuña pasiva desarrollada en el hombro de la traviesa.

Tabla 4 – Valores de los parámetros utilizados en la modelización de los ensayos

Material	Parámetro	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Traviesa	Peso [W_{trav}] (kN)	3,185	3,185	6,10
	Longitud [$Long_{trav}$] (m)	2,60	2,60	2,80
	Anchura de las cuñas pasiva y activa [$Anch_{cuña}$] (m) ⁽¹⁾	0,43	0,43	0,44
	Altura en la zona del hombro [Alt_{trav}] (m)	0,23	0,23	0,25
Balasto	Espesor por encima del plano de la base de la traviesa [$t_{balasto}$] (m) ⁽²⁾	0,21	0,21	0,23
	Peso específico [$\gamma_{balasto}$] (kN/m ³)	15,5	19,5	15,5
Notas: ⁽¹⁾ : se ha considerado la media de la anchura de la traviesa en la base y en su plano horizontal superior ⁽²⁾ : se ha considerado igual a la altura de la traviesa en la zona central				

- El porcentaje de desarrollo del empuje pasivo que aparece en el hombro frontal de la traviesa, respecto al empuje pasivo total determinado por la teoría de Rankine (d_{pas}), cuyo valor puede estimarse normalmente entre 2/3 y 1,0. El correspondiente al empuje activo (d_{act}) se puede considerar 1,0, dado que es sabido que es necesario un pequeño desplazamiento para que este empuje se desarrolle completamente.
- El ángulo de rozamiento del balasto ($\varphi_{balasto}$) que es uno de los parámetros a determinar. Su determinación se ha realizado con la condición de que el valor deducido con las expresiones anteriores coincida con los resultados obtenidos en los tres ensayos realizados.

Con objeto de tener en cuenta la posible variabilidad de los factores anteriormente indicados ($c_{t,b}$, K_h y d_{pas}) se han analizado tres casos posibles:

- Caso I: es uno de los casos extremos caracterizado por el hecho de que todos los factores anteriores ($c_{t,b}$, K_h y d_{pas}) toman su valor máximo razonable (1,0).
- Caso II: es el caso en el que los factores toman su valor más razonable:
 - $c_{t,b}=0,80$; este valor se ha obtenido como valor medio en ensayos de corte directo realizados en la caja de corte, indicada en el apartado 4.1.2.1, en los que se ha analizado el contacto entre traviesa y balasto (Estaire y Santana, 2017).
 - $K_h=1,00$; dado que el balasto se va compactando por la vibración producida por los trenes circulantes, el valor del coeficiente de empuje horizontal del balasto debería ser elevado, cercano a 1,0.
 - $d_{pas}=1,00$; Se considera que el empuje pasivo se ha desarrollado en su totalidad, dada la estabilización de la carga, en función del desplazamiento, que se ha detectado en los ensayos realizados.
- Caso III: es el otro de los casos extremos caracterizado por el hecho de que todos los factores anteriores toman su valor mínimo razonable ($c_{t,b}=0,65$; $K_h=0,75$ y $d_{pas}=0,65$).

Los resultados obtenidos en los tres casos analizados se recogen en la Tabla 5. En los cálculos se ha considerado que el ángulo de rozamiento que interviene en los tres factores de resistencia lateral tiene el mismo valor.

Tabla 5 – Resultados de la modelización analítica de los ensayos realizados

Caso	$c_{t,b}$	K_h	d_{pas}	Ensayo	$\Phi_{balasto}$ ($^\circ$)	Contribución de los factores (%)		
						Base (F_{bas})	Lateral (F_{lat})	Frontal y dorsal (F_{hmb})
I	1,00	1,00	1,00	1	62,5	49	27	24
				2	64,9	42	30	28
				3	59,4	60	23	17
II	0,80	1,00	1,00	1	69,3	37	21	42
				2	70,8	30	21	49
				3	67,6	49	19	32
III	0,65	0,75	0,65	1	75,7	30	12	58
				2	76,5	24	12	64
				3	75,1	41	12	47

El análisis de los datos contenidos en la tabla anterior permite realizar los siguientes comentarios:

- Los ángulos de rozamiento del balasto, utilizados en la modelización analítica, están comprendidos entre 59,5 y 76,5 $^\circ$, los cuales pueden considerarse bastante elevados pero en total consonancia con los resultados de los ensayos de corte directo de grandes dimensiones recogidos en el Apartado 4.1.2.4. A este respecto, la Figura 14 muestra, para tensiones verticales bajas, entre 0 y 25 kPa como corresponde a las tensiones verticales derivadas del peso de la columna de balasto y del peso de las traviesas, valores del ángulo de rozamiento instantáneo del balasto entre 60 $^\circ$ y 80 $^\circ$.
- Esta similitud entre los ángulos de rozamiento obtenidos en ensayos de corte directo en laboratorio con los ángulos deducidos de los ensayos de resistencia lateral permiten dar cierta consistencia y verosimilitud a ambos grupos de ensayos realizados.
- Por otro lado, los rangos de variación de los valores de las contribuciones a la resistencia lateral deducidas de los cálculos, para traviesas de peso normal como la española utilizada en los Ensayos 1 y 2, son los siguientes: F_{bas} =25-45%; F_{lat} =15-30% y F_{hmb} =25-60%. Puede apreciarse que el mayor valor de la contribución del empuje pasivo (alrededor del 60%) se ha producido para el caso en el que los parámetros de cálculo ($c_{t,b}$, K_h y d_{pas}) toman los valores mínimos que se han considerado en el cálculo.
- Por su parte, para la traviesa alemana (Ensayo 3), con un peso casi doble de la española, la contribución de la resistencia por la base aumenta lógicamente, hasta valores comprendidos entre 40 y 60%, a costa principalmente de la contribución del empuje pasivo de la cara frontal (F_{hmb} =15-45%) mientras que el rozamiento lateral se mantiene en valores similares (F_{lat} =15-25%).
- En todos los casos, la contribución del empuje activo es inferior al 1% por lo que, a efectos prácticos, se considera despreciable.

- Es importante destacar que todos estos valores son algo diferentes de los propuestos por Kish (2011): $F_{bas}=35-40\%$; $F_{lat}=30-35\%$ y $F_{hmb}=20-25\%$, aunque del mismo orden de magnitud. Este autor preconiza una mayor contribución del rozamiento lateral y una menor contribución del empuje pasivo, respecto a los valores indicados en este estudio.

6.3 – Extrapolación de los ensayos

6.3.1 – Introducción

Una vez comprobado que el modelo analítico definido anteriormente reproduce relativamente bien los resultados de los ensayos de resistencia lateral realizados, se puede utilizar para determinar la resistencia lateral en función de alguno de los parámetros de influencia, como por ejemplo, el ángulo de rozamiento del balasto o en otras condiciones distintas a las del ensayo, como por ejemplo, con cargas verticales superiores que reproduzcan situaciones en las que la vía está cargada.

6.3.2 – Variación de la resistencia lateral con el ángulo de rozamiento balasto-travesía

En este apartado se determina la variación que presenta la resistencia lateral de vía en función del ángulo de rozamiento balasto-travesía, de acuerdo al modelo analítico desarrollado. A este respecto, en la Figura 26 se muestra el resultado de los cálculos realizados para valores del ángulo de rozamiento del contacto balasto-travesía entre 30 y 80°, considerando las situaciones de balasto y traviesas definidas en los Ensayos 1, 2 y 3, cuyas características se recogen en la anterior Tabla 2 y las condiciones de cálculo del Caso II ($c_{t,b}=0,8$; $K_h=1,0$ y $d_{pas}=1,0$).

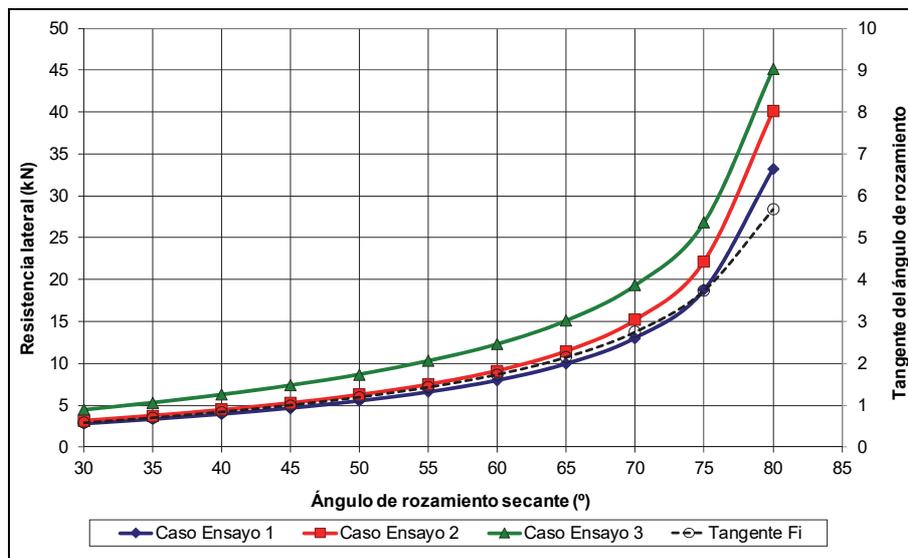


Fig. 26 – Variación de la resistencia lateral con el ángulo de rozamiento de pico del balasto de acuerdo al modelo analítico desarrollado.

Puede verse que la resistencia lateral crece muy rápidamente con el ángulo de rozamiento del balasto de forma muy similar a como lo hace la tangente de dicho ángulo (en línea punteada en la figura) como reflejo del hecho de que los factores más importantes de la resistencia lateral son el rozamiento por la base y el empuje pasivo en el hombro frontal que dependen ambos en gran medida de la tangente de dicho ángulo.

Hay que hacer notar que la diferencia entre los resultados de las situaciones semejantes a los Ensayos 1-2 y 3 es debida al peso de la traviesa en el Ensayo 3 (6,10 kN) frente a los 3,185 kN de la traviesa utilizada en los Ensayos 1-2.

El análisis de la figura anterior permite afirmar la importancia que tiene la calidad del balasto en la resistencia lateral, tanto en el momento de su puesta en obra, lo que obliga a la utilización de balastos de buena calidad, como durante su vida útil, a lo largo de la cual las partículas se redondean perdiendo resistencia al corte, lo que puede obligar a labores de sustitución del lecho de balasto.

A este respecto, Rujikiatkamjorn et al (2012) realizaron ensayos con balasto fresco y degradado en el que pudieron apreciar una pérdida de unos 10° de ángulo de resistencia al degradarse el balasto. Esta disminución del ángulo de rozamiento implicaría unas reducciones importantes en la resistencia lateral: de 19 a 10 kN, al pasar el ángulo de rozamiento de 75 a 65° ó de 10 a 7 kN al pasar de 65 a 55° , suponiendo una situación semejante a la del Ensayo 1, es decir, traviesa española sobre balasto limpio y compactado.

6.3.3 – Variación de la resistencia lateral con la carga vertical aplicada

En este apartado se determina la variación que presenta la resistencia lateral de vía en función de la carga vertical que se encuentra aplicada sobre la traviesa, de acuerdo al modelo analítico desarrollado y a los resultados de los ensayos de corte directo realizados con balasto. A este respecto, es importante resaltar, por una parte, que el ángulo de rozamiento de pico, secante e instantáneo del balasto depende de la tensión vertical aplicada, como se apreciaba en la Figura 14, y, por otra parte, que la resistencia lateral está muy influida por dicho ángulo de rozamiento, como se apreciaba en la Figura 25.

Los cálculos, cuyos resultados se muestran en la Figura 27, se han realizado para tensiones verticales comprendidas entre 5 y 225 kPa, considerando las situaciones de balasto y traviesas definidas en los Ensayos 1, 2 y 3, cuyas características se recogen en la anterior Tabla 2 y las condiciones de cálculo del Caso II ($c_{t,b}=0,8$; $K_h=1,0$ y $d_{pas}=1,0$).

Puede verse que los resultados para los tres casos semejantes a los Ensayos 1, 2 y 3 son muy

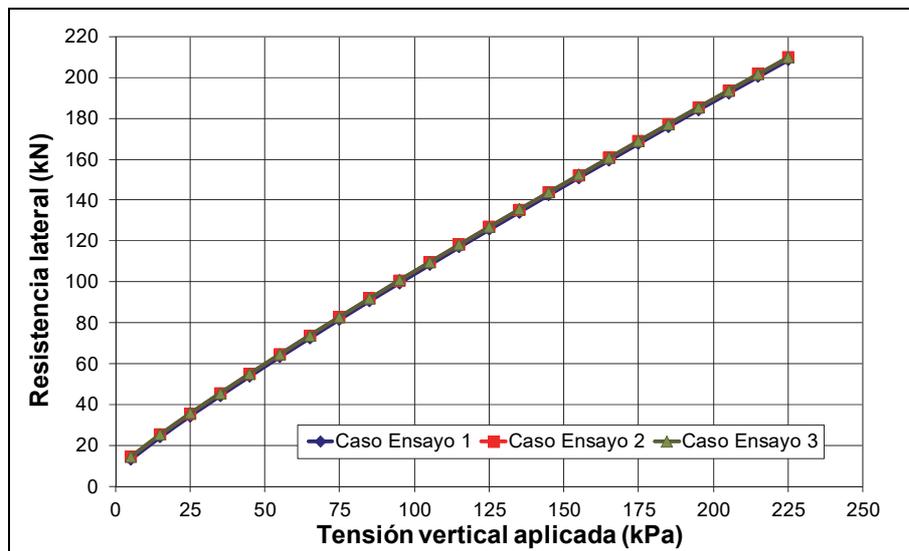


Fig. 27 – Variación de la resistencia lateral con la tensión vertical aplicada de acuerdo al modelo analítico desarrollado.

parecidas entre sí y bastante lineales. Este hecho es debido a que se ha comprobado que el factor que más contribuye a la resistencia lateral, para tensiones verticales aplicadas superiores a 25 kPa, es el rozamiento por la base, con valores superiores al 80% y crecientes con la tensión vertical hasta valores cercanos al 95%, siendo el restante compartido entre el empuje pasivo y el rozamiento lateral, en proporción 1,5:1.

A su vez, la resistencia lateral depende linealmente de la carga vertical y de la tangente del ángulo de rozamiento traviesa-balasto que es bastante constante para los ángulos de rozamiento del balasto movilizados en ese contacto, con valores comprendidos entre 50 y 60°.

7 – RESUMEN

- Este artículo describe los resultados de tres ensayos de resistencia lateral de vía realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX, con un modelo de vía férrea a escala 1:1, en condiciones de laboratorio.
- Para la realización de los ensayos fue necesario diseñar y construir un útil especial que, montado sobre la traviesa, era el responsable de desplazarla horizontalmente, en dirección perpendicular al eje de vía.
- El sistema de medición instalado consistió en una célula de carga (para medir la fuerza aplicada sobre la traviesa), dos sensores láser (para registrar el desplazamiento horizontal de la traviesa) y dos potenciómetros (para controlar el desplazamiento relativo entre la traviesa y el carril y asegurar que no se producía contacto entre ellos).
- Se realizaron tres ensayos de estabilidad lateral de vía:
 - Ensayo 1: traviesa normal sobre balasto limpio.
 - Ensayo 2: traviesa normal sobre balasto contaminado con una arena fina, uniforme, seca y cuarcítica.
 - Ensayo 3: traviesa de doble de peso del normal y equipada con suela bajo traviesa (USP) sobre balasto limpio.
- Los resultados de los ensayos indicaron unas resistencias horizontales de pico de 12,5; 16,0 y 17,1 kN, respectivamente para los Ensayos 1, 2 y 3.
- Los desplazamientos horizontales para los que se obtuvo la carga máxima fueron de 2,5; 1,2 y 5,0 mm, respectivamente para los Ensayos 1, 2 y 3.
- Por otra parte, se ejecutaron tres ensayos de corte directo de grandes dimensiones con balasto en diferentes condiciones (vertido, compactado y compactado con contaminación previa con arena) para determinar la resistencia al corte del balasto.
- Los ensayos de resistencia lateral se han modelizado numéricamente basándose en los principios de la Mecánica del Suelo y teniendo en cuenta que dicha resistencia depende de los siguientes factores: a) rozamiento entre la base de la traviesa y el balasto subyacente, b) rozamiento entre las caras laterales de la traviesa y el balasto situado en esa zona y c) empujes de tierras, pasivo y activo, en los hombros frontal y dorsal de la traviesa.

8 – CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes que se pueden obtener de los resultados obtenidos de los ensayos y de su posterior modelización son las siguientes:

- Los principales factores contribuyentes a la resistencia lateral, en ausencia de carga vertical significativa, son el rozamiento en la base (con una contribución entre 25 y 45%, según los casos analizados), el empuje pasivo en el hombro frontal de la traviesa, (con una contribución entre 25 y 60%) y el rozamiento lateral (con una contribución alrededor del 15-30%).
- Sin embargo, en los ensayos realizados con un prototipo de traviesa, con un peso casi doble de la normal, la contribución de la resistencia por la base aumenta lógicamente, hasta valores comprendidos entre 40 y 60%, a costa principalmente de la contribución del empuje pasivo de la cara frontal ($F_{hmb}=15-45\%$) mientras que el rozamiento lateral se mantiene en valores similares ($F_{lat}=15-25\%$).
- En los casos en los que la traviesa se encuentre cargada verticalmente, el factor que más contribuye es el rozamiento por la base, con porcentajes superiores al 80% y crecientes con la tensión vertical hasta valores cercanos al 95%, siendo el restante compartido entre el empuje pasivo y el rozamiento lateral, en proporción 1,5:1.
- Los ángulos de rozamiento del balasto utilizados en la modelización analítica están comprendidos entre 59,5 y 76,5° que se pueden considerarse bastante elevados, aunque concuerdan muy bien con los resultados de los ensayos de corte directo de grandes dimensiones realizados en el CEDEX con balasto en diferentes condiciones.
- Esta similitud entre los ángulos de rozamiento obtenidos en ensayos de corte directo en laboratorio con los ángulos deducidos de los ensayos de resistencia lateral permiten dar una gran consistencia y verosimilitud a ambos grupos de ensayos realizados.

9 – AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo desean agradecer la contribución de las siguientes personas: Raul Reinoso y Ángel Carballo por la ejecución de los ensayos de resistencia lateral; José L. Gómez y Manuel Fernández por la ejecución de los ensayos de corte directo; Francisco Sánchez y Ricardo Fernández por la elaboración de los resultados de los ensayos; Francisco Navarro y Miguel Ángel Andreu por la supervisión de los ensayos; y Andrés Vázquez y Eugenio Martín (ambos de la empresa VTI) por su ayuda en el diseño y construcción del útil de ensayo.

10 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D3080 (2011). *Standard for Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions*. Annual Book of ASTM Standards 2011, Volume 04.08.
- EN 13450 (2003). *Aggregates for railway ballast*. CEN, Brussels, Belgium.
- Estaire, J.; Olalla, C. (2005) *Analysis of shear strength of armourstone based on 1 m³ direct shear tests*. VII Coastal Engineering 2005. pp. 341-350. Algarve (Portugal).

- Estaire, J.; Olalla, C. (2006). *Analysis of the strength of rockfills based on direct shear tests made in 1 m³ box*. 22nd International Congress ICOLD. Q.86-R.36. pp (529-540). Barcelona (España).
- Estaire, J.; Pardo, F.; Cuéllar, V. (2017). *CEDEX Track Box as an experimental tool to test railway tracks at 1:1 scale*. Proceedings of 19th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul (to be published).
- Estaire J.; Santana M. (2017). *Large direct shear tests performed with fresh ballast*. Journal of Rail and Rapid transit (in revision).
- Estaire J.; Santana M. (2017). *Resistencia al corte en el contacto balasto-traviesa*. Ingeniería Civil (en revisión).
- Kish, A. (2011). *On the fundamentals of track lateral resistance*. AREMA.
- Lichtberger, B. (2011) *Manual de vía*. Eurail Press. ISBN 978-3-7771-0409-6.
- RIVAS (2013). *Results of laboratory tests for ballasted track mitigation measures. CEDEX Track Box Tests*. Deliverable D3.7 (Part A).
- Rujikiatkamjorn C; Indraratna B.; Ngo N. T. and Coop M. (2012). *A laboratory study of railway ballast behavior under various fouling degree*. 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics (pp. 507-514).
- Samavedam, G.; Sluz, A.; Kish, A. (1999). *The effect of realignment on track lateral stability*. AREMA.
- Sussmann, T.; Kish, A.; Trosino, M. (2014). *Investigation of the influence of track maintenance on the lateral resistance of concrete tie track*. Transportation Research Record, vol.1825, Paper no. 03-3694, 2014.