

Medidas de presión bajo una sección de traviesa sometida a cargas verticales

Pressure Measurements Under a Sleeper Section Subjected to Vertical Loading

Sagrario Merino^{1*}, Karima Bendahman²

Resumen

Este artículo analiza las medidas de células de presión instaladas en la base de traviesas apoyadas sobre balasto. El contacto irregular y discontinuo bajo una traviesa apoyada en balasto, cuando sobre ella se aplican cargas verticales, compromete la fiabilidad de los resultados de las células de presión al medir la presión en la interfaz traviesa-balasto.

El artículo presenta los resultados de los ensayos realizados en un equipo de corte directo de grandes dimensiones, en los que se midió la presión en la base de una sección de traviesa apoyada sobre balasto y gravilla, cuando se aplicaban sobre la traviesa cargas verticales conocidas.

El principal objetivo de los ensayos era comparar las medidas de presión obtenidas con ambos materiales y determinar un factor de corrección que ajuste las medidas de presión sobre balasto, para acercarse más al valor de presión existente en la interfaz traviesa-balasto. En la comparación, se han considerado las medidas en gravilla como referencia, al tratarse de un material compuesto por partículas más pequeñas, que permite un mejor reparto de la carga y, por tanto, da lugar a unas medidas de presión más fiables.

Palabras clave: presión, célula de presión, interfaz traviesa-balasto, gravilla, factor de corrección.

Abstract

This paper deals with the measurements of pressure cells installed at the base of sleepers placed over ballast. The non-uniform and discontinuous contact beneath the sleeper, as some vertical loads are applied, cause non reliable pressure measurements at the sleeper-ballast interface.

The article presents the results of some tests performed in a very large direct shear box, in which the pressure beneath a sleeper section was measured when it was placed on ballast and gravel, and some vertical known forces were applied on the sleeper.

The main objective of the tests was to compare the pressure measurements with both materials and find a correction factor that adjusts the measurements on ballast to get closer to the existent value of pressure at the sleeper-ballast interface. In the comparison, the measurements on gravel are taken as the reference, as for gravel is composed of smaller particles, which allows for a better load distribution, thus more reliable pressure measurements may be obtained.

Keywords: Pressure, pressure cell, sleeper-ballast interface, gravel, correction factor.

1. INTRODUCCIÓN

En vías en balasto, es importante determinar las cargas transmitidas por los trenes a las capas internas del terreno mediante la medición de presiones con células de presión total. Sin embargo, estas mediciones no son sencillas, especialmente en la interfaz traviesa-balasto. La irregularidad del balasto, con partículas de tamaño variable, dificulta una distribución uniforme de la carga y compromete la fiabilidad de las mediciones de presión. Se considera que una capa más uniforme, sobre la cual se realice la medición de presión,

mejorará el contacto con la célula de presión y la transmisión de la carga, lo que resultaría en mediciones más fiables. Por esta razón, en algunos ensayos se ha empleado, como medio granular, una gravilla, caracterizada por partículas de menor tamaño en comparación con el balasto.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo principal de los ensayos es comparar las mediciones de presión utilizando gravilla y balasto, identificar las diferencias entre ellas, y establecer un factor de corrección aplicable a las mediciones de presión en vías sobre balasto. La aplicación de este factor de corrección permitirá ajustar las mediciones de presión sobre balasto para aproximarse al valor de la presión que efectivamente existe bajo una traviesa en vías en balasto.

2. MATERIALES

2.1. Traviesas

Las traviesas son estructuras alargadas colocadas transversalmente sobre el balasto, sobre las que apoyan los

* Autora de contacto: m.sagrario.merino@cedex.es

¹ Licenciada en Ciencias Físicas. Laboratorio de Geotecnia, Área de Infraestructura Tecnológica (Cajón Ferroviario), del CEDEX.

² Ciclo Formativo Grado Superior (CFGS) de Mantenimiento Electrónico y Ciclo Formativo Grado Medio (CFGM) en Instalaciones de Telecomunicaciones. Laboratorio de Geotecnia, Área de Infraestructura Tecnológica (Cajón Ferroviario), del CEDEX.

carriles, que son fabricadas generalmente con hormigón, madera o nuevos materiales como el plástico reciclado (Belkon, 2015). Las funciones principales de las traviesas incluyen distribuir las cargas del carril a la capa de balasto, mantener la posición y el nivel del carril, y proporcionar estabilidad horizontal a la vía. Las traviesas se colocan a intervalos regulares a lo largo de la vía para cumplir con estas funciones estructurales y de estabilidad. En el caso de las vías españolas, ese intervalo es de 60 cm entre ejes de traviesas contiguas.

En los ensayos, se utilizó la sección central de una traviesa Tipo AI-04 EA, homologada por ADIF. La figura 1 muestra el tipo de traviesas empleadas en los ensayos y, en concreto, la sección central de traviesa utilizada.



Figura 1. Sección de traviesa utilizada en los ensayos.

2.2. Balasto

El balasto es un árido formado por piedra partida heteroangular que se dispone en una capa bajo el emparrillado de la vía férrea. El balasto amortigua y reparte las cargas transmitidas al paso de los trenes, asegurando la estabilidad del conjunto traviesa-carril. Además, la capa de balasto posibilita el drenaje de las aguas de lluvia y facilita las operaciones de nivelación y alineamiento de la vía. El tamaño del balasto está normalizado, estando comprendido entre 25 mm y 60 mm.

En estos ensayos, el balasto empleado como capa de apoyo de la sección de traviesa, y que sirvió de contacto entre la célula de presión y dicha traviesa, era material homologado por ADIF como balasto de líneas de alta velocidad. En la figura 2 se puede apreciar una fotografía de la superficie de la capa de balasto utilizada en los ensayos, con un espesor que alcanzaba 16 cm aproximadamente, una vez colocada en la caja de corte utilizada en el ensayo.



Figura 2. Balasto utilizado en los ensayos.

2.3. Gravilla

En los ensayos, la gravilla fue seleccionada como segundo material granular para la capa de apoyo de la traviesa,

debido a su uniformidad. Al estar constituida por partículas más pequeñas que el balasto, facilita la medición de presión, porque mejora el contacto con la célula de presión y optimiza la distribución de la carga, dando como resultado medidas más fiables.

La gravilla utilizada en los ensayos era una caliza de machaqueo, con una granulometría comprendida entre 6 mm y 12 mm, comúnmente empleada en la fabricación de hormigón estructural. En la figura 3, se puede apreciar la superficie de la capa de gravilla para llevar a cabo los ensayos, con un espesor aproximado de 16 cm, una vez colocada en la caja de corte utilizada en el ensayo.



Figura 3. Gravilla utilizada en los ensayos.

2.4. Accesorios de montaje: elementos elásticos y lámina metálica

En el montaje de la célula de presión bajo la traviesa se hizo uso de algunos accesorios de montaje: dos elementos elásticos y una lámina metálica. Los elementos elásticos fueron utilizados para proteger la célula de presión contra daños mecánicos. La lámina metálica tuvo la función de optimizar el contacto entre la traviesa y la célula de presión, permitiendo una distribución más uniforme de la carga sobre el material de apoyo, ya fuera balasto o gravilla.

Se consideró que mediante el uso de los elementos elásticos y la lámina metálica se podría lograr un mejor contacto de la célula de presión con la traviesa y el balasto o la gravilla, resultando en una distribución más efectiva de la carga y una medición de presión más confiable.

Las dimensiones de los elementos elásticos y la lámina metálica son: 18 cm x 28 cm, como se muestra en la figura 4.

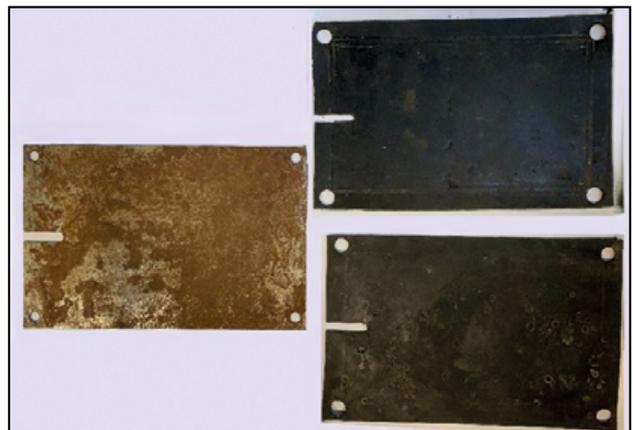


Figura 4. Aspecto y dimensiones de la lámina metálica y los dos elementos elásticos.

3. EQUIPOS

3.1. Célula de presión

Para la medida de la presión, se utilizó una célula de presión total eléctrica. Generalmente, este tipo de células se emplean para medir la presión en el terreno, en revestimientos, en hormigón y en juntas. Las células de presión se suelen colocar en la interfaz de dos capas de diferente naturaleza (Cámara, 2011; IIC, 2004; Eptisa, 2009).

El cuerpo de la célula de presión está conectado a un transductor eléctrico y relleno de un fluido hidráulico en un sistema cerrado. Al aplicar carga sobre el cuerpo de la célula, la presión hidráulica resultante se transmite al transductor eléctrico, transformándose en una señal eléctrica, en forma de voltaje, proporcional a la presión aplicada.

La célula de presión utilizada en los ensayos era una célula de presión total eléctrica, de fabricante Glötzl y modelo EEKE 15/25 K10 A Z4 (GLÖTZL Gesellschaft für Baumesstechnik mbH, n.d.). Las dimensiones externas de la célula de presión eran 15 cm x 25 cm, y el área que realmente intervino en la transmisión de la fuerza aplicada, o superficie efectiva de la célula de presión, era 13,5 cm x 23,5 cm, siendo la diferencia debida a que el reborde metálico que rodea el perímetro de la célula de presión no debe tenerse en cuenta, al tratarse de la soldadura de las dos placas metálicas con las que se construye la célula de presión. En la fotografía de la Figura 5 se puede observar la célula de presión utilizada en los ensayos



Figura 5. Célula de presión que interviene en los ensayos.

Para obtener las medidas de la célula de presión, es necesario contar con la cadena de medida indicada en la figura 6.

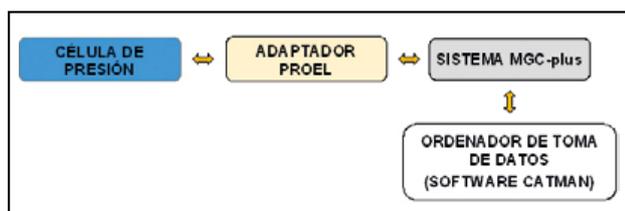


Figura 6. Cadena de medida de la célula de presión en los ensayos.

3.2. Adaptador Proel de células de presión

Es un equipo diseñado y fabricado por la empresa Proel, que permite hacer insertables las células de presión en su cadena de medida, como muestra la figura 6. Este equipo permite ajustar el voltaje de salida de cada célula de presión, para poderlo medir con el sistema MGCplus.

3.3. Sistema MGCplus

El sistema MGCplus, fabricado por Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), fue el equipo de acondicionamiento y adquisición de datos utilizado en los ensayos. Este equipo, con diseño de arquitectura modular, consta de tarjetas con capacidad de conexión de hasta ocho sensores por tarjeta (HBM, n.d.-a).

3.4. Software Catman y ordenador de toma de datos

En los ensayos se hizo uso del software de adquisición de datos Catman (HBM, n.d.-b), instalado en un ordenador destinado a la toma de datos. El software Catman ha sido desarrollado por la empresa HBM, y es compatible con el sistema MGCplus. Este software tiene varias funcionalidades, entre las que cabe citar: el ajuste del calibrado de los sensores, la realización de las distintas medidas definidas en un ensayo, el almacenamiento a muy alta velocidad de grandes cantidades de datos, y el análisis inicial de estos datos.

La comunicación entre el sistema MGCplus y el ordenador de toma de datos se realiza mediante conexión Ethernet.

3.5. Equipo de corte directo de grandes dimensiones

Todos los ensayos se llevaron a cabo en el equipo de corte directo de grandes dimensiones del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (CEDEX, n.d.-b), que tiene una caja de corte de 1 x 1 m (Muñiz y Estaire, 2021) y cuyo aspecto se puede observar en la fotografía de la figura 7.

Este equipo permite ensayar materiales granulares de hasta 20 cm, manteniendo constante la sobrecarga vertical hasta un valor de 100 t gracias a un sistema de realimentación electrónica que acciona una servoválvula para regular el sentido y caudal del aceite al cilindro de carga.

Este equipo ha sido utilizado ampliamente con el fin de estudiar enrocados, para su uso en puertos y presas (Estaire y Olalla, 2006). En los últimos años, las investigaciones con este dispositivo se han centrado en balasto ferroviario (Estaire y Santana, 2018).



Figura 7. Equipo de corte directo con caja de 1 x 1 m, donde se efectuaron los ensayos.

4. MÉTODOS DE ENSAYO

4.1. Características

Los ensayos realizados para este trabajo consistieron en la aplicación de cargas verticales (kN) de valores: 0, 2, 5, 10, 20, 50, 75, 85, 100, 110, 125, sobre una sección de traviesa, y en la medida de la presión transmitida a través de ella, cuando se utilizaban dos configuraciones de ensayo distintas, que se diferenciaban entre sí por el medio granular, gravilla o balasto, que servía de apoyo a la sección de traviesa.

En definitiva, las configuraciones de ensayo empleadas fueron:

- Configuración 1: sección de traviesa sobre gravilla.
- Configuración 2: sección de traviesa sobre balasto.

Estas configuraciones presentaban las siguientes características comunes:

- La carga fue aplicada en el centro de la sección de la traviesa.
- En cada configuración, las medidas se repitieron un número de veces, comprendido entre 3 y 10, generándose varias series de medidas.
- Las medidas se tomaron alternando el sentido creciente y decreciente de la aplicación de la carga, para tener en cuenta el efecto de histéresis, en caso de existir.
- Los resultados finales de presión medida se calcularon a partir de la media aritmética de las distintas series de medidas, desde la segunda serie en adelante, para descartar el efecto de asentamiento, que podría estar presente en la primera serie.
- En cuanto al montaje de la célula de presión, ésta se instaló siguiendo estos pasos: primero se colocó un elemento elástico, luego la célula de presión, después el segundo elemento elástico, y finalmente la lámina metálica, que hace contacto con la gravilla o el balasto.

Este montaje se configuró como una disposición tipo sándwich entre los elementos elásticos y la lámina metálica, asegurando así la correcta distribución de la carga y la protección adecuada de la célula de presión contra daños mecánicos. En la figura 8 se puede apreciar el montaje de la célula de presión, y en la figura 9, una fotografía de la base de la traviesa con la célula de presión instalada, junto a las dimensiones más interesantes.

A continuación, se detallan las características específicas de cada configuración.



Figura 8. Detalle del montaje de la célula de presión bajo traviesa.

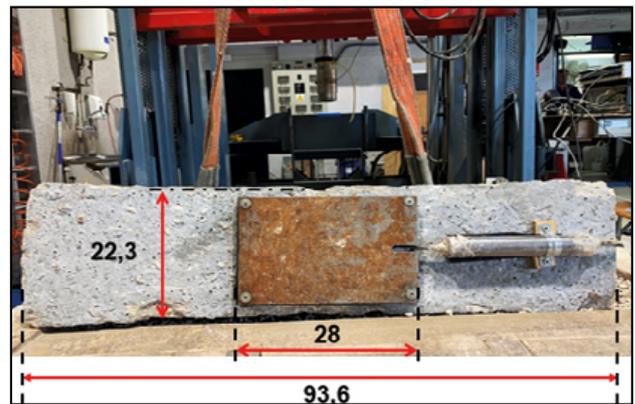


Figura 9. Detalle de la base de la traviesa con la célula de presión instalada.

4.2. Configuración 1

En los ensayos realizados con esta configuración, se utilizó gravilla como medio granular para el soporte de la traviesa. El esquema del montaje se muestra en la figura 10, mientras que la figura 11 presenta una fotografía del montaje real, donde se pueden observar algunos de los equipos y materiales empleados en los ensayos.

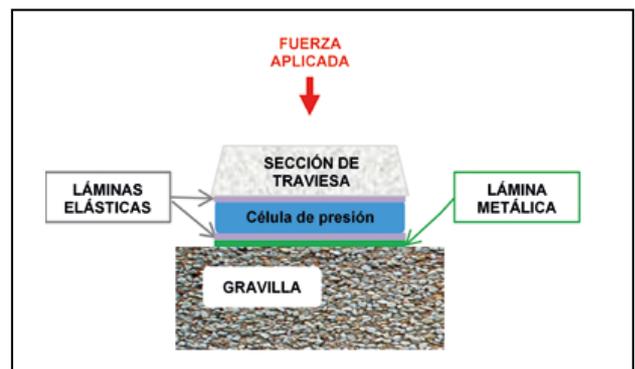


Figura 10. Esquema del montaje en la configuración 1.



Figura 11. Montaje empleado en la configuración 1.

Con la configuración 1 se llevó a cabo un ensayo de seis series de medidas. Los resultados de estas medidas se incluyen posteriormente en la tabla 1.

4.3. Configuración 2

En los ensayos correspondientes a la configuración 2, se reemplazó la gravilla por balasto, manteniendo el mismo procedimiento de montaje para la célula de presión que en la configuración 1. La figura 12 presenta el esquema del montaje utilizado en los ensayos, mientras en la figura 13 se muestra una fotografía del montaje real.

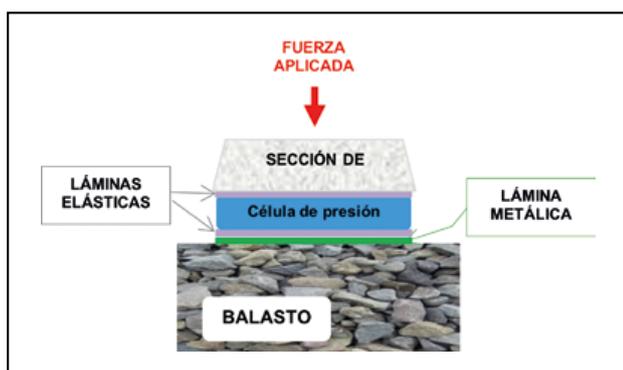


Figura 12. Esquema de montaje de la configuración 2.



Figura 13. Montaje real de la configuración 2.

Se llevaron a cabo dos ensayos en la configuración 2, cada uno con cuatro series de medidas. Los resultados de estas medidas son recogidos posteriormente en la tabla 1.

5. RESULTADOS DE ENSAYO. ESTUDIO COMPARATIVO

Este apartado tiene dos objetivos: en primer lugar, presentar los resultados de presión medida en las dos configuraciones de ensayo, y, en segundo lugar, comparar estos

resultados para encontrar un parámetro aplicable a las medidas de presión en la interfaz traviesa-balasto, utilizando como referencia las presiones medidas en la interfaz traviesa-gravilla.

Los resultados de las presiones medidas en las configuraciones 1 y 2 se presentan en las columnas segunda y tercera de la tabla 1.

5.1. Comparación directa de los resultados de ensayo

Con el fin de realizar el estudio comparativo de las medidas de presión en las dos configuraciones, se calcula el porcentaje de variación entre ellas, definido a partir de la expresión [1], donde se ha tomado como referencia la configuración con gravilla.

$$\frac{\Delta P}{P_1} (\%) = 100 \frac{(P_2 - P_1)}{P_1} \quad [1]$$

Los valores del porcentaje de variación, calculado a partir de la ecuación 1, se han incluido en la cuarta columna de la tabla 1, pudiéndose observar a partir de ellos que la presión medida en los ensayos sobre balasto llega a ser aproximadamente un 10 % inferior a la presión medida en los ensayos sobre gravilla.

Adicionalmente, se define el factor de corrección, FC, como la relación entre las presiones medidas con gravilla y con balasto, según expresa la ecuación [2].

$$FC = \frac{P_1}{P_2} \quad [2]$$

El factor de corrección permite ajustar las medidas de presión con balasto a las medidas de presión con gravilla. En la quinta columna de la tabla 1, se muestran los valores del factor de corrección, calculados a partir de una carga de 50 kN, ya que la magnitud de la carga por eje que puede aplicar un tren convencional de pasajeros, a su paso por la vía, es superior a este valor.

Tabla 1. Presiones medidas en las configuraciones de ensayo, porcentaje de variación y factor de corrección

Carga aplicada (kN)	P_1 (kPa)	P_2 (kPa)	$\Delta P/P_1$ (%)	Factor de corrección (FC)
2	28,00	41,95	50	-
5	67,10	97,23	45	-
10	123,82	163,12	32	-
20	237,10	277,12	17	-
50	545,42	538,84	-1	1,01
75	763,06	701,94	-8	1,09
85	835,56	758,15	-9	1,10
100	954,28	841,92	-12	1,13
110	1023,80	895,94	-12	1,14
125	1122,20	974,89	-13	1,15

P_1 : presiones medidas en la configuración 1 con gravilla.

P_2 : presiones medidas en la configuración 2 con balasto.

5.2. Ajuste de los resultados de ensayo con funciones matemáticas

Asimismo, profundizando más en este estudio comparativo, el siguiente paso ha sido tratar de encontrar una

función matemática que mejor represente la dependencia de la presión medida con la carga aplicada, tanto en la primera como en la segunda configuración.

A la vista de los resultados medidos de presión, representados gráficamente en la figura 14, se ha seleccionado una regresión potencial, escrita de manera genérica como $P = aQ^b$, donde P es la presión medida expresada en kPa, y Q es la carga aplicada expresada en kN. El exponente b indica el grado de linealidad. Los cálculos conducen a las siguientes igualdades:

$$P_1 = 15,71 Q^{0,89} \text{ para gravilla} \quad [3]$$

$$P_2 = 27,83 Q^{0,75} \text{ para balasto} \quad [4]$$

Donde P_1 y P_2 son las presiones medidas en las configuraciones con gravilla y balasto, respectivamente, para los mismos valores de carga aplicada, Q . Además, los coeficientes de determinación, R^2 , son:

$$R_1^2 = 0,99798 \cong 1,00 \text{ para gravilla}$$

$$R_2^2 = 0,99804 \cong 1,00 \text{ para balasto}$$

Estos valores de R^2 , muy próximos a la unidad, indican que el modelo potencial elegido se ajusta bien al conjunto de las medidas en las dos configuraciones de ensayo.

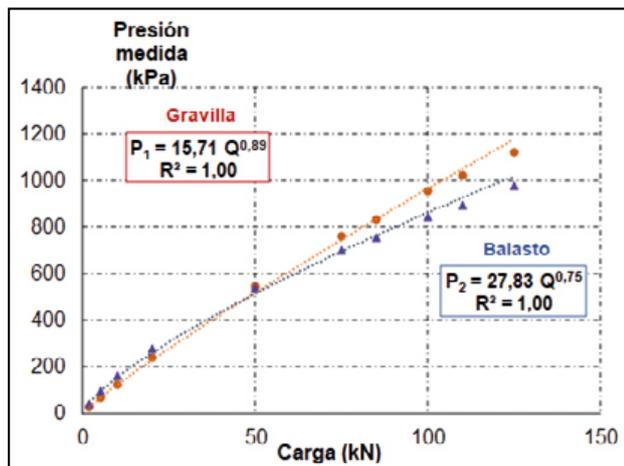


Figura 14. Presiones medidas con gravilla y balasto (regresión potencial).

En la figura 14, los puntos de color naranja corresponden a la configuración con gravilla, y los puntos de color azul están asociados a la configuración con balasto.

Más aún, operando matemáticamente, e intentando conseguir una forma más práctica de contrastar las dos configuraciones, se igualan los exponentes de sus ecuaciones de regresión, [3] y [4], al valor 0,75 obtenido para el balasto. Se comprueba que es posible hallar otras dos ecuaciones de regresión potencial, [5] y [6], con el mismo exponente, b , pero distintos coeficientes a , que pueden también modelizar la dependencia de la presión medida con la carga aplicada.

$$P_1 = 30,00 Q^{0,75} \text{ para gravilla} \quad [5]$$

$$P_1 = 27,83 Q^{0,75} \text{ para balasto} \quad [6]$$

La representación gráfica de las expresiones 5 y 6 es recogida en la figura 15.

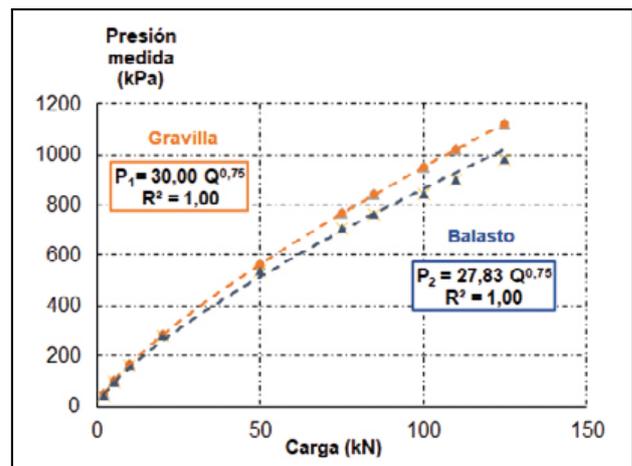


Figura 15. Presiones medidas con gravilla y balasto (regresión potencial con exponente igual a 0,75).

Pero si los dos exponentes se igualan a 0,89, valor asociado a la configuración con gravilla, los cálculos conducen a otras dos ecuaciones, [7] y [8], cuya representación gráfica se refleja en la figura 16.

$$P_1 = 15,71 Q^{0,89} \text{ para gravilla} \quad [7]$$

$$P_2 = 14,10 Q^{0,89} \text{ para balasto} \quad [8]$$

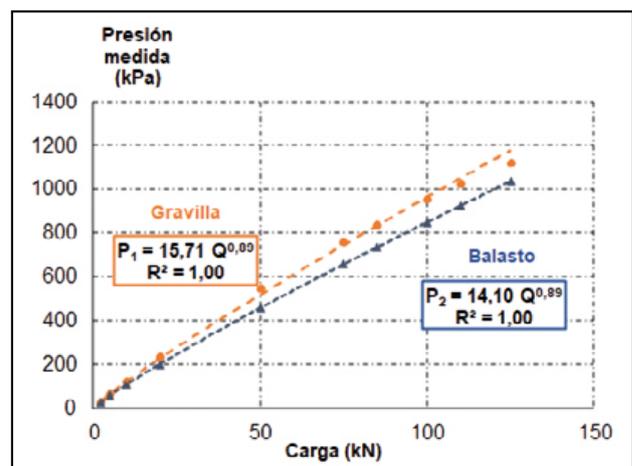


Figura 16. Presiones medidas con gravilla y balasto, (regresión potencial con exponente igual a 0,89).

Si se vuelve a operar matemáticamente, igualando los exponentes de ambas ecuaciones de regresión a un valor intermedio entre ellos; por ejemplo, su valor medio: 0,82, se llega a las expresiones [9] y [10].

$$P_1 = 21,70 Q^{0,82} \text{ para gravilla} \quad [9]$$

$$P_2 = 19,70 Q^{0,82} \text{ para balasto} \quad [10]$$

Porque podrían ser también un modelo representativo de los resultados de ambas configuraciones, y cuya representación gráfica se encuentra en la figura 17.

Finalmente, si se decidiera considerar una regresión lineal en las dos configuraciones, se obtendrían las

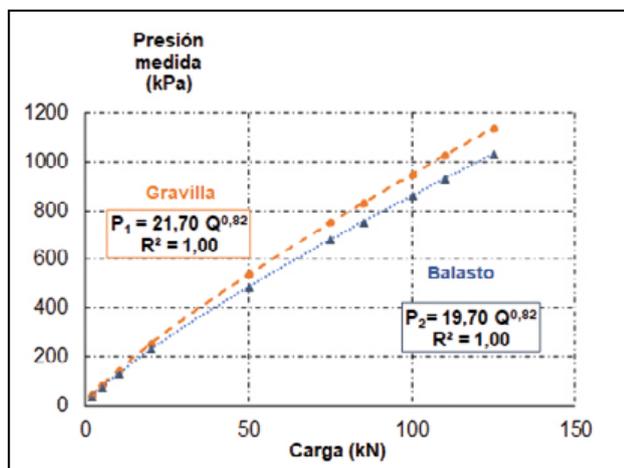


Figura 17. Presiones medidas con gravilla y balasto, (regresión potencial con exponente igual a 0,82).

expresiones [11] y [12], cuya representación gráfica se muestra en la figura 18.

$$P_1 = 9,52 Q \text{ para gravilla} \quad [11]$$

$$P_2 = 8,51 Q \text{ para balasto} \quad [12]$$

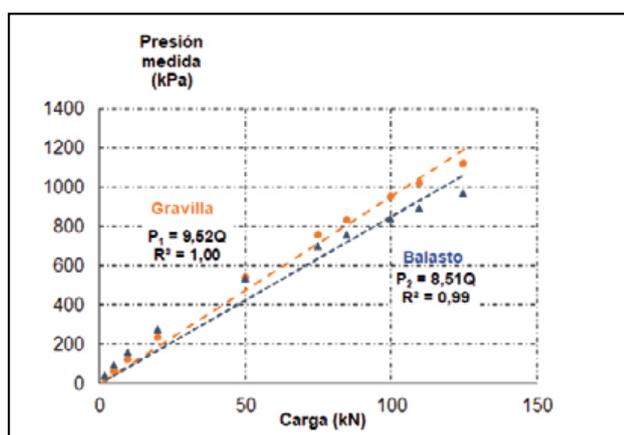


Figura 18. Presiones medidas con gravilla y balasto (aproximación lineal).

5.3. Determinación del factor de corrección a partir de las funciones matemáticas

Si se consideran las opciones de regresión potencial representadas por las ecuaciones que van de la 5 a la 12, el factor de corrección podría tener los valores indicados en la tabla 2. Aunque el valor real de la presión medida en la interfaz traviesa-balasto no puede llegar a conocerse, los resultados de estos ensayos permiten obtener un factor de corrección comprendido entre 1,08 y 1,12, aplicable a las medidas de presión sobre balasto, para aproximarse al valor de presión que realmente se transmite a través de la traviesa, si se aplican sobre ella cargas superiores a 50 kN.

Como conclusión, teniendo en cuenta que la magnitud de la carga que puede aplicar un tren convencional de pasajeros, a su paso por la vía, es superior a 50 kN, el factor de corrección se encuentra comprendido entre los valores indicados en la expresión [13], con un valor medio representativo igual a 1,10.

$$1,08 < FC < 1,12 \quad [13]$$

Tabla 2. Valores del Factor de Corrección (FC) a partir de las funciones matemáticas

Función de aproximación	Factor de corrección FC
Potencial con $b=0,75$	$FC = \frac{30,00}{27,83} = 1,08$
Potencial con $b=0,89$	$FC = \frac{15,71}{14,10} = 1,11$
Potencial con $b=0,82$	$FC = \frac{21,70}{19,70} = 1,10$
Lineal	$FC = \frac{9,52}{8,51} = 1,12$

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El artículo se centra en los ensayos realizados en el equipo de corte de grandes dimensiones del Laboratorio de Geotecnia con caja de 1 x 1 m, con objeto de medir la presión transmitida por una sección de traviesa cuando se aplican sobre ella cargas verticales de distinto valor. El objetivo de estos ensayos fue obtener un factor de corrección aplicable a las medidas de presión con la traviesa sobre balasto, tomando como referencia las medidas de presión cuando esta traviesa se coloca sobre gravilla.

Los aspectos más relevantes reflejados en este artículo son los siguientes:

- En los ensayos se ha medido la presión con una célula de presión total eléctrica instalada en la base de la traviesa.
- Se ha considerado que el montaje óptimo para la célula de presión en la base de la traviesa ocurre cuando ésta se coloca entre dos elementos elásticos, y una lámina metálica colocada en la cara que apoya directamente sobre el material granular subyacente a la traviesa.
- En el desarrollo de los ensayos, se han probado dos configuraciones distintas, en las que se ha modificado el medio granular sobre el que se apoya la traviesa, gravilla o balasto.
- En los ensayos se ha utilizado el criterio basado en suponer que la carga aplicada a la traviesa se transmite de manera más eficaz con gravilla que con balasto, debido a que la gravilla es un medio granular con partículas más pequeñas y hace posible un mejor reparto de la carga.

Las principales conclusiones que estos ensayos permiten extraer son:

- Se ha obtenido un factor de corrección con un valor comprendido entre 1,08 y 1,12, con un valor medio representativo de 1,10 que debe aplicarse como ajuste a las medidas de presión sobre balasto para acercarse al valor "real" de presión transmitida a través de la traviesa.
- Se ha podido comprobar que la presión medida en la interfaz traviesa-balasto es aproximadamente un 10 % menor que la presión medida sobre gravilla.

7. AGRADECIMIENTOS

Las autoras de este artículo desean expresar su agradecimiento a todos los compañeros del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX que han colaborado en el desarrollo de los ensayos: Juan Luis Cámara Garrido, Felipe García Mata, Mauro Muñoz Menéndez, Fernando Pesquera González y María Santana Ruiz de Arbulo. En particular, cabe mencionar al jefe del Área de Infraestructuras Tecnológicas, José Estaire Gepp, por su excepcional apoyo y orientación en la elaboración de este artículo.

8. REFERENCIAS

Belkon, A. (2015). Traviesas de ferrocarril de plástico reciclado. Análisis y comparación de parámetros de traviesas y su influencia en la rigidez y el rendimiento de la vía. *Ingeniería Ferroviaria. 13ª Conferencia Internacional y Exposición, Edimburgo, 30 junio - 1 julio*.

Cámara Garrido, J.L. (2011). Instrumentación de la instalación de ensayos ferroviarios. Subbalasto bituminoso, zona 2. Instalación de ensayos ferroviarios. Laboratorio de Geotecnia / Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, del CEDEX. Madrid: CEDEX.

CEDEX (n.d.-a). Equipamientos del Laboratorio de Geotecnia. Células de presión total. <https://www.cedex.es/centros-laboratorios/laboratorio-geotecnia-lg/equipamientos/celulas-presion-total>

CEDEX (n.d.-b). Laboratorio de Geotecnia (LG). <https://www.cedex.es/centros-laboratorios/laboratorio-de-geotecnia-lg>

Eptisa Ingeniería, Instrumentación y Control (2009). Documento final de suministro e instalación de equipamiento para instrumentación de los prototipos de infraestructura ferroviaria en la célula de ensayos del CEDEX (NEC808018, CLAVE 80-406-4-010).

Estaire, J., y Olalla, C. (2006). Análisis de resistencia de enrocados basado en ensayos de corte directo realizados en caja de 1 m³. *XXII Congreso Internacional ICOLD*, Q.86-R.36, pp. 529-540.

Estaire, J., y Santana, M. (2018). Ensayos de corte directo a gran escala realizados con balasto. En T.D. Stark, R. Szecsy y R.H. Swan Jr. (eds.), *Ensayos y propiedades del balasto ferroviario* (ASTM STP1605). ASTM International.

GEOKON (2021). Modelo 4800. *Celdas de presión de suelos. Manual de instrucciones*.

GLÖTZL Gesellschaft für Baumesstechnik mbH (2014). P_068.00 *Spannungsaufnehmer neu* http://www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/1%20Messwertaufnehmer/1%20Druck%20und%20Spannung/Spanisch/P_068.00_Spannungsaufnehmer_neu_es.pdf

Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) (n.d.-a) MGCplus. El sistema de adquisición de datos (DAQ). https://www.hbm.com/es/2261/mgcplus-sistema-de-adquisicion-de-datos-daq/?product_type_no=MGCplus

Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) (n.d.-b). Software DAQ. Software de adquisición de datos catman: conectar, medir, visualizar y analizar. https://www.hbm.com/es/2290/software-adquisicion-de-datos-catman/?product_type_no=Software%20DAQ

Ingeniería de Instrumentación y Control, S.A. (IIC) (2004). Documento final de suministro e instalación de equipamiento para instrumentación del Ensayo Europeo SUPERTRACK (NEC 803052, CLAVE 80-190-1-103).

Merino Domínguez, S. (2023). Medidas de presión bajo una sección de traviesa sometida a cargas verticales. Informe parcial nº 9. Clave CEDEX: 89-422-5-001. Trabajos internos realizados en el cajón ferroviario del CEDEX. Madrid: CEDEX.

Muñoz Menéndez, M., y Estaire, J. (2021). Experimental study on the shear strength of medium-coarse rockfill. En *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE 2022) Sydney, 1-5 May 2022*.