

EL ENSAYO DE PENETRACIÓN DINÁMICA DE ENERGÍA VARIABLE PARA ESTIMAR LA CALIDAD DE LA BANQUETA DE BALASTO

Variable energy dynamic penetration test to estimate quality of ballast bed

Natalia Montero-Cubillo^a, José Estaire^a

^a Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Madrid, España.

RESUMEN – Este artículo estudia el ensayo de penetración dinámica de energía variable tipo Panda, para determinar el estado de compacidad de la banqueta de balasto en vías ferroviarias. Una baja compactación de la banqueta de balasto puede derivar en movimientos excesivos en elementos como la traviesa y los carriles. Se realizaron en laboratorio quince ensayos Panda en balasto limpio con el objetivo de calibrar los valores de resistencia del ensayo a distintos pesos específicos conocidos. Posteriormente, se recopilieron ensayos Panda realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX y en vías ferroviarias reales españolas que permitieron comprobar la utilidad de dicha calibración. Merced a estos resultados propios y a las relaciones peso específico-resistencia de diferentes autores, se establece una propuesta de valores admisibles de la resistencia medida con el ensayo Panda para varios estados de compacidad de la banqueta de balasto.

ABSTRACT – This article examines the Panda variable energy dynamic penetration test to assess ballast bed compactness on railway tracks. Low ballast compaction can cause excessive movement in sleepers and rails. Fifteen Panda tests were carried out in laboratory on clean ballast with the aim of calibrating the test resistance values at different known specific weights. Subsequently, Panda tests performed in the CEDEX Track Box and on actual Spanish railway tracks were compiled, which made it possible to verify the usefulness of this calibration. Thanks to their own results and the specific weight-resistance relationships of different authors, a proposal for acceptable values of the resistance measured with the Panda test for various states of ballast bed compactness is established.

Palabras Clave – balasto ferroviario, resistencia dinámica por punta, Panda, compacidad, peso específico.

Keywords – railway ballast, cone penetration, Panda, compactness, specific weight.

1 – INTRODUCCIÓN

1.1 – Antecedentes y objeto

El balasto ferroviario es un material granular y uniforme, formado principalmente por partículas angulosas de entre 30 y 50 mm de diámetro. Procede de rocas con una elevada resistencia, peso específico y durabilidad. La renovación de la banqueta de balasto es una de las operaciones de mantenimiento más importantes en términos de costes. A este respecto, la caracterización del estado

E-mails: natalia.montero@cedex.es (N. Montero-Cubillo), jose.estaire@cedex.es (J. Estaire)

ORCID: orcid.org/0000-0003-0278-1931 (N. Montero-Cubillo), orcid.org/0000-0002-9606-6180 (J. Estaire)

mecánico del balasto ferroviario es un trabajo fundamental para optimizar la toma de decisiones en dichas operaciones de mantenimiento (Saussine et al. 2017). El problema es que resulta complejo encontrar técnicas que estimen el grado de desgaste de las partículas, dadas sus características granulométricas, o del estado de compacidad in situ de la banqueta de balasto, dadas sus dimensiones.

Por otra parte, los ensayos de penetración dinámica son técnicas utilizadas mundialmente para la caracterización de una gran cantidad de terrenos por su rápida implementación y facilidad de ejecución (Benz-Navarrete et al. 2019). Entre los ensayos dinámicos se encuentran los de energía variable que permiten su adaptación a diferentes tipos de terreno, posibilitando el ensayo de terrenos de mayor granulometría, como es el caso del balasto. Uno de los ensayos de penetración dinámica más empleados en Francia para la gestión del mantenimiento del balasto ferroviario es el ensayo de penetración dinámica de energía variable, comúnmente conocido como ensayo Panda (Haddani et al. 2016), cuyas siglas significan “*Pénétrement Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur*”. Se trata de un equipo único en el mercado ya que aplica una energía variable que es registrada en cada golpe mediante la instrumentación de la que dispone. Los resultados tienden a mostrar que la energía de penetración registrada está relacionada con el estado mecánico del balasto en el emplazamiento y con el estado de compacidad de la banqueta en su conjunto.

El objetivo del artículo es establecer unos valores admisibles de la resistencia dinámica por punta medida con el ensayo Panda para varios estados de compacidad de la banqueta de balasto. Para ello, el trabajo ha consistido en el análisis de numerosas referencias bibliográficas y de 73 ensayos realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (LG-CEDEX, de ahora en adelante) en diferentes situaciones: en laboratorio con probetas de balasto a peso específico controlado, y en la banqueta de balasto de vías reales y de los modelos a escala real del Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC de ahora en adelante, Estaire et al. 2017).

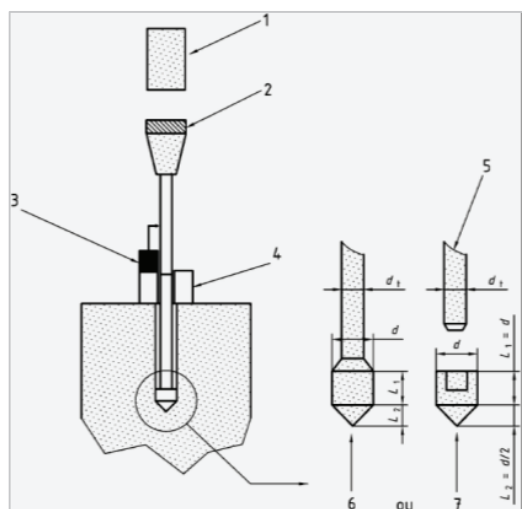
1.2 – Descripción del ensayo de penetración dinámica de energía variable

El ensayo de penetración dinámica de energía variable o ensayo Panda fue creado en 1989 por R. Gourvès (Gourvès, 1991). Consiste en hincar manualmente en el terreno, una sarta de varillas que va unida a una punta cónica, para medir la resistencia dinámica por punta de dicho terreno hasta la profundidad deseada. El campo de utilización cubre terrenos que tengan hasta 80 mm de diámetro máximo de partículas.

Un esquema de los distintos componentes del equipo se puede ver en la Figura 1a y en la Figura 1b a punta con cada golpe y de la profundidad alcanzada por la punta, varilla porta-punta, guía de las varillas, puntas de 2 y 4 cm², unidad central de adquisición y terminal de diálogo. El LG-CEDEX dispone del equipo Panda 2.0. del que se puede apreciar una fotografía en la Figura 1b. Todos los ensayos presentados en este trabajo se realizaron con la punta cónica de 2 cm² de sección, adecuada para suelos granulares gruesos, como el balasto.

En el cabezal del tren de varillas, la energía de hincado se obtiene del golpe de un martillo. Esa energía se transmite en parte a la punta que, con cada golpe, va a penetrar una determinada profundidad en el terreno, variable según la resistencia del terreno a la penetración dinámica. En cada golpe de martillo, la energía se mide en el cabezal del tren de varillas a través de bandas extensiométricas. Otros sensores miden la penetración de la punta por golpe. El sistema de adquisición recibe ambas lecturas y calcula la resistencia dinámica por punta, q_d , mediante la siguiente expresión [fórmula holandesa modificada o fórmula de Engineering News (Sanglerat, 1972)]:

$$q_d = E \frac{M}{Ae'(M + P)} \quad (1)$$



1	Dispositivo de hincia (martillo)	4	Gula de las varillas
2	Dispositivo de medición de la energía proporcionada en cada impacto	5	Varilla porta-punta
3	Dispositivo de medición:	6	Punta fija
—	hundimiento de la punta con cada golpe	7	Punta perdida
—	profundidad alcanzada por la punta		

a) Esquemas del equipo (NF P 94-105 [6])



b) Fotografías del equipo Panda 2.0 del LG-CEDEX

Fig. 1 – Partes del equipo de ensayo Panda.

donde:

E – energía aportada al sistema (expresada en julios);

e' – penetración de la punta por golpe (expresado en metros);

M – masa de golpeo (expresada en kilogramos);

A – sección de la punta (expresada en metros cuadrados);

P – masa del cabezal de golpeo + varillas + punta (expresada en kilogramos).

Las hipótesis que se han utilizado para la obtención de la Ecuación 1 son:

- que el terreno tiene un comportamiento elasto-plástico perfecto durante la penetración;
- que el rozamiento lateral en el tren de varillas es despreciable;
- que la energía suministrada por el martillo durante el ensayo es totalmente transmitida a la punta mediante el dispositivo de hincia, por lo que se considera que en cada golpe no se produce ningún rozamiento; y
- que se debe poder despreciar el posible incremento de presión intersticial que se genere en el terreno debido a la hincia, por lo que el equipo no se debe utilizar en terrenos saturados, sensibles al agua.

Este ensayo se encuentra normalizado a través de la norma francesa NF P 94-105, en la que se indica que el ensayo es adecuado para:

- evaluar el espesor de las capas o tongadas de terreno (función A);
- verificar que se alcanza el objetivo de densificación buscado (función B). En tal caso, hay que clasificar los materiales empleados, conocer los objetivos de densificación y el estado de humedad de los materiales en el momento de las pruebas de control;
- verificar que la compactación se ajusta a lo obtenido en los ensayos de referencia específicos en el emplazamiento de la obra (función C).

El ensayo tiene ciertas limitaciones relativas a la profundidad a la que puede llegarse en los ensayos, en función de la naturaleza de los materiales atravesados y de los equipos utilizados. El ensayo debe detenerse cuando:

- no se haya obtenido una penetración por golpe de más de 1 mm, durante cinco golpes seguidos,
- el rozamiento lateral entre el material y el tren de varillas sea excesivo, aspecto que se puede determinar cuando no sea posible hacer girar la sarta de varillas con una sola mano.

Por otra parte, la norma NF P 94-105 recomienda que, durante la realización del ensayo, el valor de penetración por golpe se mantenga entre 2 y 20 mm, para que se verifiquen, sin errores apreciables, las hipótesis de aplicación de la Ecuación 1. Como se puede apreciar en la Figura 2, de acuerdo con Chaigneau (2001), el error relativo por debajo de 2 mm de hincia es muy alto, por lo que dicho valor de 2 mm se configura como el límite inferior admisible en estos ensayos.

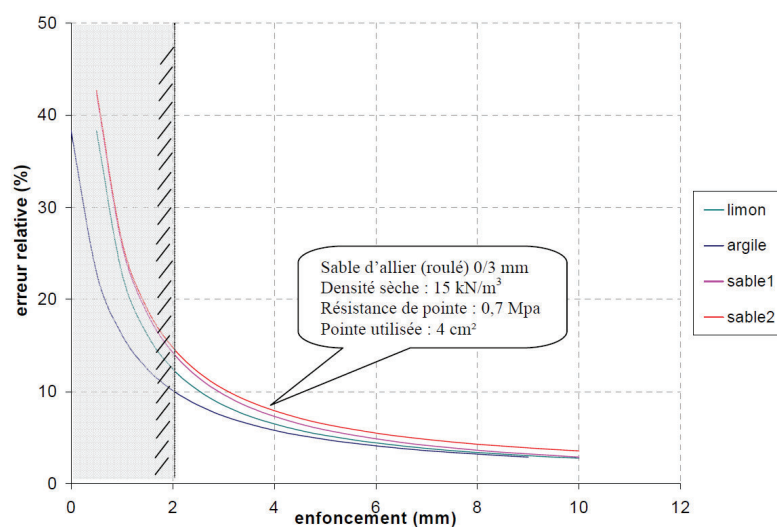


Fig. 2 – Error relativo en la resistencia dinámica por punta en función de la hincia (Chaigneau, 2001).

Por último, la resistencia dinámica por punta, medida con el ensayo Panda en banquetas de balasto, presenta variaciones significativas, en función del lugar donde se lleve a cabo el ensayo en la vía: en el eje de vía, debajo del carril, próximo a ambos lados del carril o en el hombro. Sin embargo, cuando las pruebas se realizan en el mismo lugar de la vía y en condiciones semejantes se observa una buena repetitividad de los resultados obtenidos en términos de resistencia dinámica por punta. Los resultados tienden a mostrar que la resistencia dinámica por punta está relacionada con

el estado mecánico y la compacidad de la banqueta de balasto en el emplazamiento (Breul e Saussine, 2011).

1.3 – Interpretación de los resultados de los ensayos

Los resultados de resistencia dinámica por punta (q_d) de los ensayos Panda se suelen representar en un gráfico en función de la profundidad alcanzada (z), denominado “penetrograma”. Como se puede observar en la Figura 3a, un penetrograma se puede esquematizar, en coordenadas semi-logarítmicas, en una relación bilineal con tres parámetros: resistencia en superficie (q_0); profundidad crítica (z_c) y resistencia dinámica representativa por punta (q_1). De esta manera, en un terreno homogéneo, con la misma humedad y peso específico (γ_d), y suponiendo que no hay rozamiento lateral, la resistencia a la penetración dinámica aumenta desde un valor q_0 en la superficie hasta un valor considerado constante en profundidad (q_1) obtenido a partir de una profundidad crítica (z_c). La profundidad crítica depende del estado de compacidad del terreno, del tamaño de sus partículas y del diámetro de la punta utilizada en el ensayo.

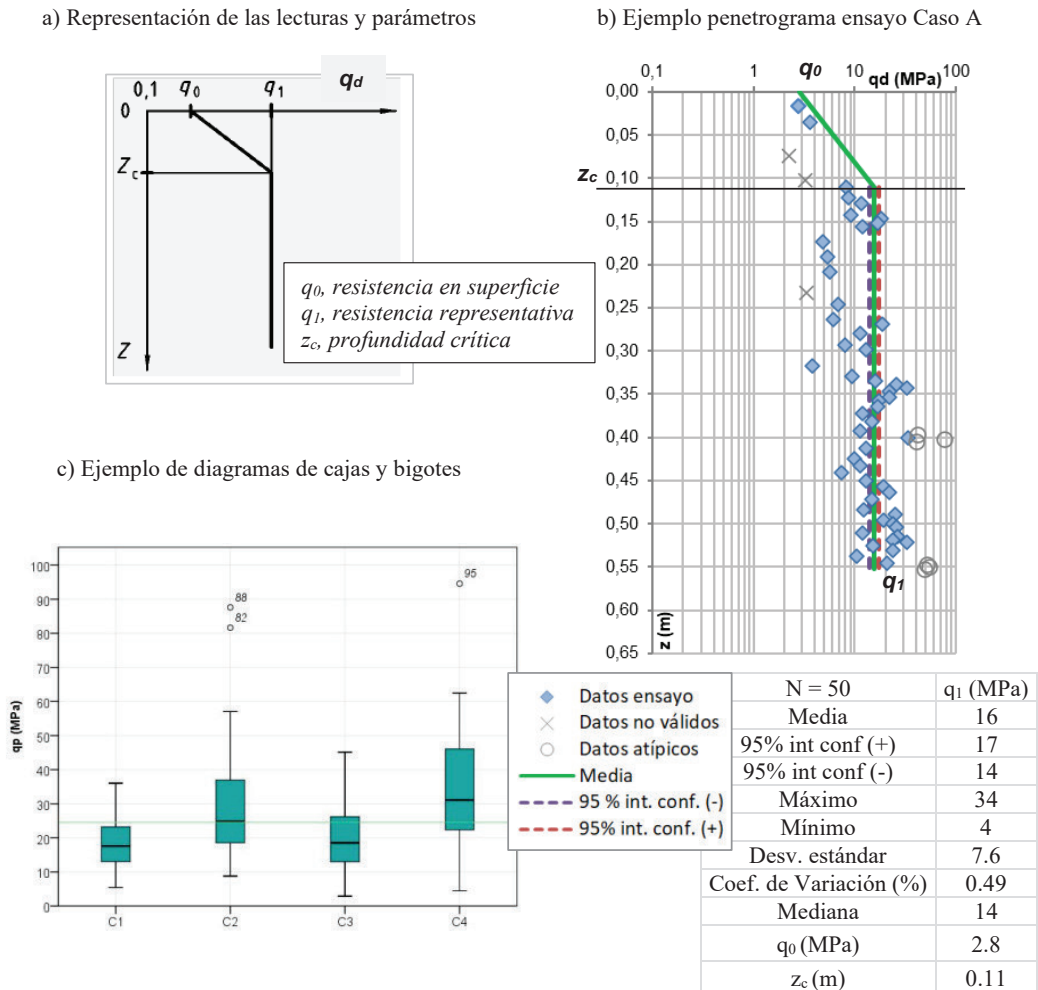


Fig. 3 – a) Representación esquemática de las lecturas del ensayo Panda, b) representación de un ensayo Panda real y c) ejemplo de diagramas de cajas y bigotes para filtrado de resultados.

El procedimiento de interpretación de los resultados del ensayo se ha llevado a cabo según los siguientes pasos, basados en la norma NF P 94-105 y en un procedimiento propio creado por el LG-CEDEX que tiene en cuenta la elevada variabilidad de los resultados cuando se ensayan materiales con partículas de gran tamaño como el balasto.

1. Representación, en escala logarítmica, de los valores de resistencia dinámica por punta (q_d) en función de la profundidad z , en escala natural, (Figura 3b).
2. Cálculo de la penetración de la punta en cada golpe. Se eliminan todos aquellos valores de penetración por golpe mayores a 20 mm e inferiores a 2 mm (Chaigneau, 2001) considerados como “No válidos”, como se indica en la Figura 3.
3. Detección preliminar, a simple vista, de si hay uno o varios niveles de balasto diferenciados, para llevar a cabo los pasos 6 a 9, para cada nivel por separado.
4. Cálculo de q_0 como el valor promedio de q_d en los primeros 5 mm de profundidad. En el caso del balasto es habitual que el primer golpe supere una penetración de 5 mm, por lo que se suele usar el primer valor de q_d como q_0 . Es el único caso en el que se considera válido un valor de penetración por golpe superior a 20 mm.
5. Elección de la profundidad crítica (z_c), observando el aspecto del penetrograma. Esta profundidad se considera como la profundidad a partir de la cual se alcanza un valor de la resistencia por punta bastante constante en profundidad, denominado como “ q_1 ” (Figura 3a y Figura 3b).

Los resultados obtenidos cuando se ensayan materiales como el balasto, con grandes diámetros de partículas, suelen presentar bastante variabilidad debido, por un lado, al paso de las varillas por zonas huecas, con valores de q_d muy bajos o incluso nulos y, por otro lado, a la rotura de partículas con valores de q_d de hasta 100 MPa. Teniendo en cuenta este hecho, en LG-CEDEX se ha optado por realizar una interpretación estadística de los resultados que incluye la eliminación previa de valores atípicos y singulares, cuyos pasos son los siguientes:

6. Realización de un diagrama de cajas y bigotes únicamente con los valores de q_d obtenidos a profundidades superiores a z_c , (Figura 3c) que permite, además de visualizar la variabilidad de los resultados, determinar los valores atípicos y singulares. Se consideran atípicos los valores inferiores a $Q_1 - 1,5 \cdot \text{RIC}$ o superiores a $Q_3 + 1,5 \cdot \text{RIC}$, siendo Q_1 el primer cuartil (límite inferior de la caja por debajo del cual se encuentran el 25 % de los datos); Q_3 el tercer cuartil (límite superior de la caja por encima del cual se encuentran el 25 % de los datos) y; RIC el rango intercuartílico (rango de valores que comprenden el 50 % de los datos). Se consideran valores singulares aquellos superiores a $Q_1 + 3 \cdot \text{RIC}$.
7. Eliminación de los valores atípicos y singulares encontrados. Estos valores eliminados engloban los datos que se consideran debidos a la rotura de partículas de balasto durante la ejecución del ensayo (usualmente con valores superiores a 100 MPa).
8. Determinación de q_1 (Figura 3b), que se calcula, tras el proceso del punto anterior, como el valor medio de q_d desde la profundidad crítica (z_c) hasta la profundidad final alcanzada con el ensayo o hasta la profundidad a la que se considere que acaba el nivel que se esté interpretando.
9. Indicación de los resultados estadísticos del ensayo, relativos a los valores q_d a partir de z_c : el número de datos considerados (N), la media, el intervalo de confianza del 95 % respecto a la media calculada, los valores máximos y mínimos, la desviación estándar, la mediana y el coeficiente de variación (COV) (Figura 3b). Se debe tener en cuenta que, en ciertos registros, la mediana puede ser más representativa del ensayo que la media. Por otra parte, también hay que considerar que un COV habitual en un ensayo en una capa de terraplén, compuesta por material térreo fino, suele ser inferior a 0,3, mientras que, en los ensayos en

una banqueta de balasto, el COV suele ser superior a 0,4, hecho que refleja la mayor variabilidad de los resultados en los ensayos con balasto.

2 – ENSAYOS REALIZADOS

La Tabla 1 recoge los trabajos efectuados por LG-CEDEX en los que se realizaron ensayos Panda en balasto, incluyendo información sobre la localización del trabajo, su denominación, el número de ensayos realizados, el tipo de balasto ensayado y algunas observaciones explicativas. En estos trabajos se realizaron 73 ensayos que son los analizados en este artículo.

Tabla 1 – Resumen de ensayos Panda realizados en balasto por LG-CEDEX.

Localización	Caso - Denominación	Número	Observaciones
Laboratorio	A – Molde cilíndrico	3	<i>Vertido (para obtención de γ_d mínima)</i>
		2	<i>Compactado en capas de 5 cm de espesor (para obtención de γ_d máxima)</i>
		1	<i>Compactado en capas de 20 cm de espesor (para obtención de γ_d intermedia)</i>
	B – Molde paralelepípedo	6	<i>Vertido (para obtención de γ_d mínima)</i>
		3	<i>Compactado en capas de 5 cm de espesor (para obtención de γ_d máxima)</i>
Vía real (LAVs, España)	C – Alhama de Aragón	4	<i>Sección LAV. Banqueta de balasto entre 1 y 1,7 m de espesor</i>
	D – Brihuega 2021	4	<i>Sección LAV. Banqueta de balasto de 50 cm de espesor</i>
	M – Brihuega 2022	8	<i>Sección LAV. Banqueta de balasto de 50 cm de espesor</i>
	N – Quintana del Puente	6	<i>Sección LAV recién puesta en servicio</i>
Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC)	E – Haramain 2015	2	<i>Sección de balasto contaminado con arena</i>
	F – junio 2019	5	<i>Sección LAV. Tras primer bateo</i>
	G – julio 2020	5	<i>Sección LAV. Sin actuaciones en el balasto</i>
	H – febrero 2021	6	<i>Sección LAV. Estabilización (500000 Tn)</i>
	I – julio 2021	11	<i>Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)</i>
	J – octubre 2021	7	<i>Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)</i>

Notas: Todos los ensayos se llevan a cabo en balasto ferroviario empleado en LAVs españolas.

Los ensayos realizados en laboratorio se hicieron para obtener una relación entre los resultados de la resistencia dinámica por punta y el peso específico de la banqueta de balasto, lo que se ha denominado como “calibración” en el Anexo C de la norma NF P 94-105 “Método de calibrado del penetrómetro dinámico de energía variable en laboratorio”. Para ello, se llevaron a cabo 15 ensayos en condiciones controladas: en el Caso A (Tabla 1), se realizaron seis ensayos en un molde cilíndrico metálico de 40,5 cm de diámetro y 62 cm de altura (Figura 4a) con tres pesos específicos diferentes (14,5, 15,2 y 16,5 kN/m³) y; en el Caso B, se realizaron nueve ensayos en un molde paralelepípedo de 120 × 80 × 76 cm (largo × ancho × alto) (Figura 4b) con dos pesos específicos diferentes (14,9 y 16,2 kN/m³). Los ensayos del Caso B se llevaron a cabo para estudiar si existía una sobrestimación de la resistencia en el Caso A ya que en el Anexo C de la norma NF P 94-105 se establece que el molde de pruebas debe tener dimensiones suficientes como para que la prueba de penetración se pueda considerar efectuada en un medio semi-infinito. La relación entre el diámetro del molde y el de la punta del Caso A es de 25, valor que para algunos autores podría ser insuficiente; Breul & Saussine (2011) y Zhou (1997) recomiendan una relación superior a 30, siendo 48 para los ensayos realizados en el molde paralelepípedo (Caso B).

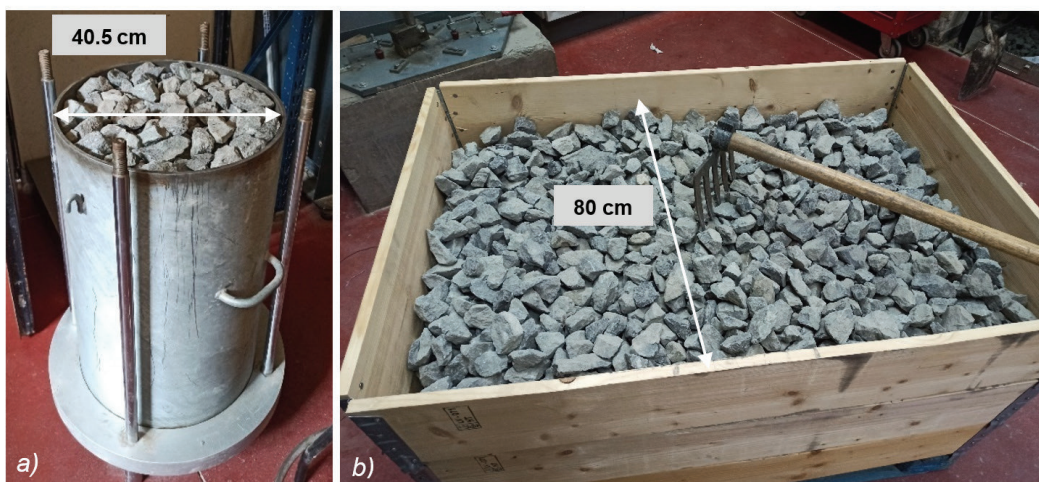


Fig. 4 – a) Representación esquemática de las lecturas del ensayo Panda, b) representación de un ensayo Panda real y c) ejemplo de diagramas de cajas y bigotes para filtrado de resultados.

Por otra parte, la recopilación y el análisis de los ensayos llevados a cabo en vías ferroviarias reales por el LG-CEDEX permiten establecer algunas conclusiones sobre la resistencia habitual en vía real y su evolución en profundidad. En este estudio se cuenta con cuatro campañas:

- la primera campaña (Caso C – Alhama de Aragón, Tabla 2), realizada en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Alhama de Aragón, consta de cuatro ensayos Panda ejecutados en una banqueta de balasto de unos 40 cm, que se colocó para recrecer una banqueta de balasto existente que ya tenía entre 60 cm y 130 cm de espesor;
- la segunda campaña (Caso D – Brihuega 2021, Tabla 1) efectuada también en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Brihuega, consta de cuatro ensayos Panda ejecutados en una banqueta de balasto de unos 50 cm de espesor total;
- la tercera campaña (Caso M – Brihuega 2022, Tabla 1) realizada también cerca de la localidad de Brihuega en la LAV Madrid-Barcelona, en un PK próximo al del punto anterior pero no en el mismo, consta de ocho ensayos Panda ejecutados en una banqueta de balasto de unos 50 cm de espesor total y
- la cuarta campaña, llevada a cabo en la LAV Madrid-Burgos, cerca de la localidad de Quintana del Puente, consta de seis ensayos Panda efectuados en una vía recién puesta en servicio, por lo tanto, sin apenas uso, con espesores totales de hasta 80 cm de balasto.

Por último, se analizan los ensayos realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC), que es una instalación en la que se pueden ensayar modelos de una vía ferroviaria, a escala 1:1 y que permite la simulación del paso de trenes en unas condiciones muy similares a las de la vía real. Hay que tener en cuenta que la experiencia acumulada permite indicar que en el CFC la banqueta de balasto se encuentra generalmente en un estado de compacidad inferior al de la vía real por la imposibilidad de utilizar una estabilizadora y llegar con la bateadora a ciertas zonas de la banqueta. Por esta razón es esperable que el peso específico y, por tanto, la resistencia dinámica por punta de la banqueta de balasto obtenida con el ensayo Panda sea algo inferior a la obtenida en vías reales. Sin embargo, el análisis de los ensayos Panda realizados en esta instalación permite obtener mayor cantidad de resultados próximos a las condiciones en vía real, conocer el estado de la capa en la instalación, partiendo de las premisas mencionadas y, por ejemplo, establecer algunas conclusiones respecto a la variación en el estado de compacidad con la contaminación con arena. Los ensayos en

el CFC se realizaron en el periodo 2008-2021 en distintas ubicaciones dentro de la banqueta de balasto de los distintos modelos de ensayo construidos en la instalación (Casos E- I de la Tabla 1).

3 – RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

3.1 – Ensayos en laboratorio

En la Figura 5a se representan los valores de resistencia dinámica representativa por punta (q_1) en función del peso específico (γ_d) de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio, tanto en el caso del molde cilíndrico como en el caso del molde paralelepédico.

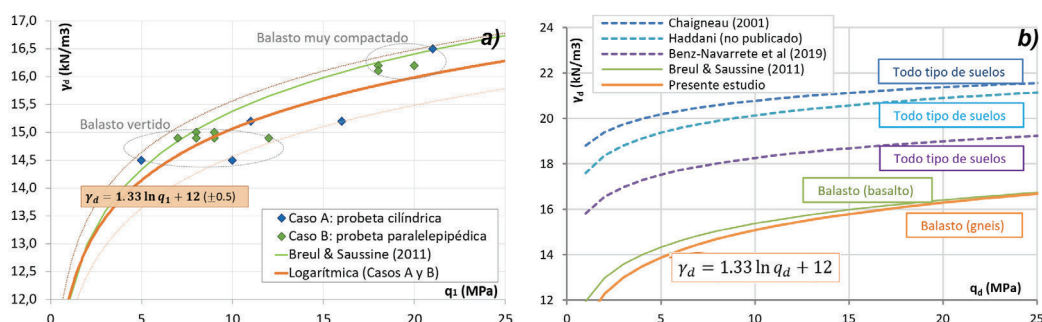


Fig. 5 – a) Resultados de q_1 y γ_d en los Casos A y B, junto con la curva de mejor ajuste a los datos y; b) Curvas de calibración según distintos autores y tipos de suelo.

Las probetas realizadas en este trabajo con ambos moldes (cilíndrico y paralelepédico), cuando el balasto se colocó directamente vertido, tuvieron pesos específicos (γ_d) entre 14,5 y 14,9 kN/m³ y presentaron resistencias (q_1) entre 5 y 12 MPa, estando el valor medio, para ambos casos, en unos 8-9 MPa. Por el contrario, en los ensayos realizados en ambos tipos de moldes, cuando el balasto se colocó en capas de muy poco espesor, se alcanzaron pesos específicos entre 16,2 y 16,5 kN/m³ y valores de q_1 entre 18 y 21 MPa, respectivamente. Los resultados demuestran que la resistencia que se obtiene mediante el ensayo Panda es claramente dependiente del peso específico del balasto, de tal manera que, entre una muestra directamente vertida y una muy compactada en capas de poco espesor, la resistencia por punta llega a duplicarse.

Respecto a las diferentes dimensiones de los moldes empleados en los Casos A y B, no se han apreciado diferencias destacables, razón por la que se han empleado los datos de ambos casos para calcular la curva de calibración de la Figura 5a. Chaigneau (2001) y Breul & Saussine (2011) establecieron que para una clase de terreno y una humedad fija existe una relación entre γ_d y q_d , dada por una expresión logarítmica, $[\gamma_d = A \ln(q_d) + B]$. Así, Benz-Navarrete (2009) determinó, para un balasto procedente de un basalto, la curva de calibración en laboratorio de una manera semejante a la que se presenta en este trabajo. Algunas de las curvas citadas se representan en la Figura 5b, junto con la ecuación $\gamma_d - q_d$, obtenida a partir de los resultados de los ensayos en laboratorio presentados en este artículo. Para el caso del balasto, se puede apreciar que los resultados mostrados en este artículo son prácticamente coincidentes con la curva propuesta por Benz-Navarrete (2009) para un balasto de origen basáltico. Esta semejanza permite pensar que existe una única relación entre γ_d y q_d para balastos de alta calidad, como los empleados en este estudio y en el llevado a cabo por Benz-Navarrete (2009). La ecuación de calibración obtenida en el presente estudio, junto con su rango de incertidumbre, es:

$$\gamma_d = 1.33 \ln(q_1) + 12 (\pm 0.5) \quad (2)$$

3.2 – Ensayos en vías ferroviarias reales

En este apartado se lleva a cabo un análisis de las diferentes campañas de ensayos Panda realizados por el LG-CEDEX en vía real, descritas anteriormente en el Capítulo 2, cuyos resultados representativos se muestran en la Figura 6.

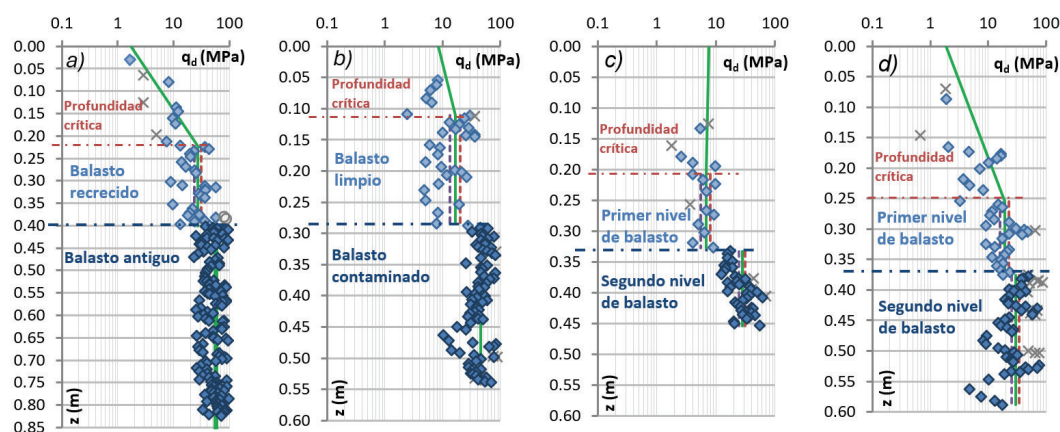


Fig. 6 – Ejemplos de penetrogramas obtenidos en vías reales: a) Alhama de Aragón (Caso C), b) Brihuega 2021, Caso D, c) Brihuega 2022 (Caso M) y, d) Quintana del Puente (Caso N).

- Los resultados obtenidos en los cuatro ensayos Panda llevados a cabo en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Alhama de Aragón (Caso C, Tabla 1) permiten establecer que el valor de resistencia dinámica representativa por punta (q_1) para la banqueta de balasto, en un tramo comprendido entre la superficie y 40 cm de profundidad, es de 25 MPa. En algunos ensayos, a partir de esos 40 cm hasta 1 m de profundidad, que se corresponden con la antigua banqueta de balasto sobre la que se recrecieron los 40 cm, se observaron aumentos de la resistencia (como el que se aprecia en la Figura 6a mientras que en otros ensayos la resistencia disminuía, lo que impidió sacar conclusiones claras sobre el estado de la banqueta de balasto existente.
- Por su parte, los resultados obtenidos en los cuatro ensayos Panda llevados a cabo en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Brihuega en 2021 (Caso D, Tabla 1), de los cuales en la Figura 6b se muestra el penetrograma de uno de ellos, permiten establecer que el valor de q_1 para una banqueta de balasto limpio o no contaminado, en condiciones de compactación normales en vía, es de unos 23 MPa. Además, a partir de los 25-30 cm de profundidad se detectó un nivel de mayor resistencia, con un valor de q_1 de unos 40-45 MPa que se asoció, en este caso, a la contaminación del balasto a partir de esa profundidad, tal y como se indica en la Figura 6b.
- Así mismo, los resultados obtenidos en los ocho ensayos Panda llevados a cabo también en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Brihuega, pero en 2022 (Caso M, Tabla 1), se ejemplifican en el penetrograma de uno de ellos mostrado en la Figura 6c. A partir de estos resultados, se puede indicar un valor medio representativo de q_1 de unos 20 MPa, aunque se detectó una primera zona hasta los 30 cm, con un valor de 14 MPa que aumentó a 26 MPa, para profundidades de 35-40 cm.
- Por último, en la Figura 6d, se muestra el penetrograma de uno de los seis ensayos Panda llevados a cabo en la LAV Madrid-Burgos, cerca de la localidad de Quintana del Puente (Caso N, Tabla 1). Los resultados obtenidos, muy semejantes a los anteriores, permiten

establecer un valor medio de q_1 de unos 21 MPa, con variaciones entre 17 MPa, en un primer tramo, y 26 MPa, a partir de los 30-40 cm de profundidad. Estos valores se obtuvieron en una LAV recién puesta en servicio y, por lo tanto, sin apenas degradación acumulada, por lo que se pueden considerar de referencia para banquetas de balasto recién construidas.

A modo de resumen y basado en el análisis conjunto de todos los resultados obtenidos en las LAVs, se puede establecer una relación entre un penetrograma tipo y la sección transversal de dichas LAVs, tal como se recoge en la Figura 7. Se aprecia que se puede asociar la profundidad crítica con la profundidad de la base de la traviesa y las zonas de mayor penetración por punta con posibles capas contaminadas de balasto. Además, con esta figura se pretende señalar que el ensayo no comienza en la superficie de la capa de balasto si no generalmente a unos 5 cm de profundidad donde la punta cónica, de 2 cm² y por tanto de tamaño inferior a una partícula de balasto, se acomoda a través de los huecos que dejan las partículas. Esta profundidad es denominada profundidad pre-sondeo y se incorpora como dato de entrada durante la ejecución del ensayo con el fin de llevar a cabo una adecuada correlación posterior entre sondeos.

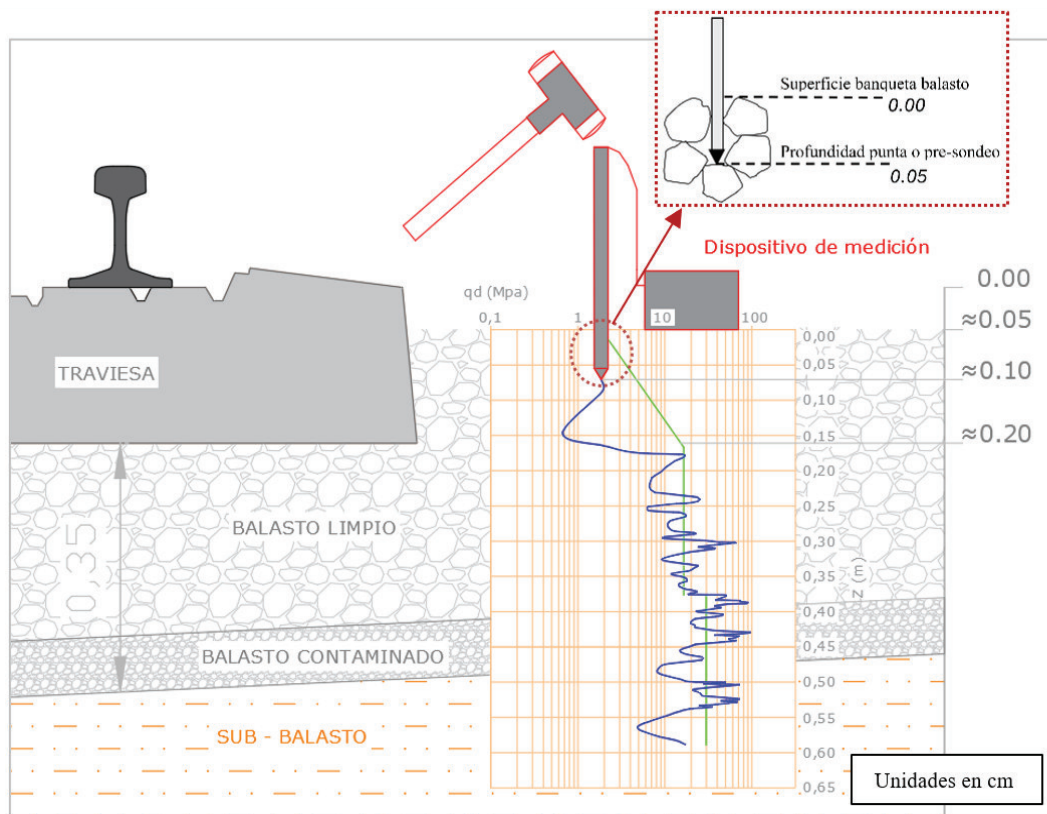


Fig. 7 – Correspondencia entre un penetrograma tipo del ensayo Panda y las capas y elementos de la infraestructura ferroviaria de una LAV.

De forma complementaria, en la Tabla 2, se han reunido las referencias bibliográficas encontradas sobre ensayos Panda en balasto llevados a cabo en vías ferroviarias francesas, donde el uso del ensayo Panda es muy habitual.

Tabla 2 – Resultados de campañas de ensayos Panda en balasto en vías reales según diferentes autores.

Referencia	Localización	Resistencia dinámica por punta (MPa)		Estado del balasto	Ubicación en vía	Observaciones	
Escobar et al. (2014)	Francia	Qd,medio	15	Limpio	En el eje de vía y a ambos lados del carril	31 ensayos	
		Qd,medio	38	Contaminado			
Lamas-López et al. (2016)	Francia	Qd,medio	26	45 cm balasto limpio, unos 9 cm balasto contaminado con finos de 2mm	En el eje de vía, a ambos lados del carril y en el hombro	Velocidad servicio: 200-220 km/h; <10 años en uso, vía convencional	
Saussine et al. (2017)	Francia	Qd,50%datos	12-32	Limpio	En el eje de vía y bajo el carril	19000 ensayos	
		Qd,medio	20		En el eje de vía		
		Qd,50%datos	16-42	Contaminado			En el eje de vía
		Qd,medio	26	Bajo el carril			
		Qd,50%datos	24-51				Contaminado
		Qd,medio	35				
LG-CEDEX	España	qI	14-25	Limpio	A ambos lados del carril	22 ensayos LAVs españolas	
		qI	26-43	Contaminado			

Notas:

La resistencia dinámica por punta se expresa en términos de q_d cuando se refiere a los datos procedentes de Escobar et al. (2014), Lamas-López et al (2016) y Saussine et al. (2017) ya que así aparece en dichas referencias, y en términos de q_1 , cuando se trata de valores obtenidos en este estudio.

El artículo de Saussine et al. 2017 se ha considerado, en este trabajo, una referencia clave por estar basado en un estudio estadístico con 19.000 ensayos Panda. Debido a la elevada variabilidad de los valores de resistencia por punta en el balasto resulta aún más adecuado que en cualquier otro material extraer conclusiones a través de un gran número de ensayos. Además, Saussine et al. 2017 tienen en cuenta la localización del ensayo (en el eje de vía o bajo el carril) y el estado del balasto (limpio o contaminado), como se puede apreciar en la Tabla 2. Obtienen resultados de resistencia notablemente superiores, del orden de 35 MPa, en el caso del balasto contaminado bajo el carril, frente a los 26 MPa, en el caso del balasto contaminado en el eje de vía. Este resultado es esperable debido a que la banqueta de balasto situada en la zona inmediatamente inferior al carril recibe mayor carga debida al paso de los trenes, lo que genera una mayor contaminación por degradación de las partículas de balasto, que la zona en el eje de vía.

Como se aprecia en la Tabla 2, los resultados obtenidos en este estudio están en concordancia con las referencias encontradas sobre ensayos Panda en balasto llevados a cabo en vías francesas por otros autores:

- **Balasto limpio:** según los ensayos realizados por el LG-CEDEX en vías reales, se puede establecer un valor de q_1 de la banqueta de balasto limpio, entre 14 y 25 MPa. Estos valores se encuentran en el rango de los indicados por Saussine et al. 2017 de 12-32 MPa y muy próximos al publicado por Lamas-López et al (2016) de 26 MPa. Por tanto, parece adecuado establecer, como valor recomendado de q_1 en la banqueta de balasto limpio en vías reales de buena calidad, un rango entre 20 y 25 MPa, siendo válidos también los valores de entre 15 y 30 MPa.

- **Balasto contaminado:** El rango de valores de q_1 de la banqueta de balasto contaminado estimado en este estudio, es de 26 a 43 MPa. Estos valores cubren el rango indicado en las demás referencias (26-38 MPa). De este modo, parece certero concluir que el valor de q_1 para un balasto contaminado está en el entorno de los 30 MPa en adelante.

El término de contaminación se refiere al relleno de los huecos del balasto por materiales más finos que éste, generados principalmente por su propia degradación. Cuando además interfieren el agua, arrastrando los finos al fondo de la banqueta, y otros materiales, que puede ascender desde la capa sobre la que se apoya la banqueta de balasto, se suele formar un nivel de gran competencia en la parte inferior de la banqueta. Un balasto parcialmente contaminado, por el relleno de parte de sus huecos por finos, proporciona valores de resistencia dinámica por punta mayores de los que se obtendrían en un balasto limpio o no contaminado, como se puede apreciar en la Tabla 2, siendo este hecho fácilmente identificable en los ensayos Panda.

3.3 – Ensayos en el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC)

En este apartado se lleva a cabo un análisis de los resultados de los ensayos Panda realizados en el CFC entre los años 2019 y 2021. En la Figura 8 se puede ver el resultado y la localización de los 36 ensayos efectuados durante las distintas campañas F- J, cuyos detalles se recogen en la Tabla 1.

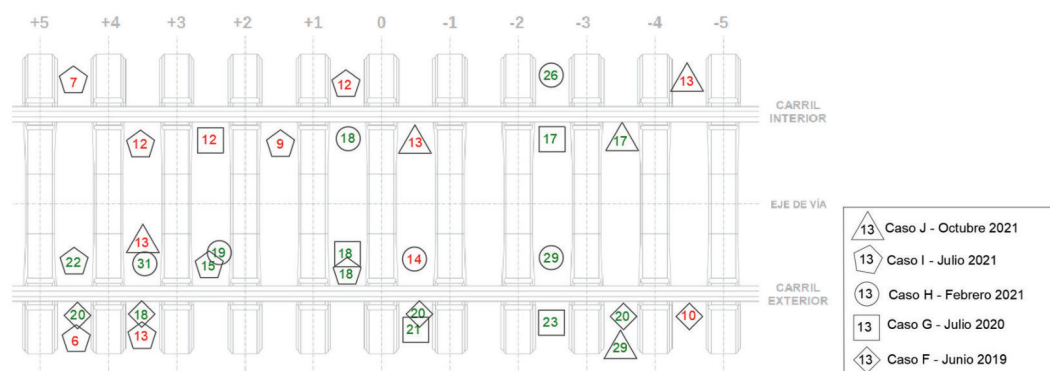


Fig. 8 – Resultados de resistencia representativa por punta (q_1) y ubicación de los ensayos Panda realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX.

El análisis de los resultados de las diferentes campañas y actuaciones llevadas a cabo en el CFC (Figura 8) permiten realizar los siguientes comentarios:

- Entre las campañas realizadas en junio de 2019 (Caso F) y en julio de 2020 (Caso G) no se realizaron operaciones de bateo o estabilización de la banqueta de balasto. Los resultados de los ensayos Panda de ambas campañas son muy similares, con resistencias q_1 de 17-18 MPa de media de todos los puntos ensayados, lo que demuestra la buena repetibilidad del ensayo.
- Los valores más bajos de resistencia se presentan en los extremos de la zona de ensayo, es decir, entre las traviesas -4/-5 (10 MPa) y +4/+5 (6 y 7 MPa), donde la bateadora no puede situarse. Esto impide el bateo del área comprendida entre dichas traviesas y una mejora en la compactación de la banqueta de balasto, afectando, por tanto, a su resistencia.
- Tal y como se ha indicado en el capítulo 3.3 (Ensayos en vías ferroviarias reales) y en base a los resultados obtenidos en este estudio y en otras referencias (Tabla 2), parece adecuado establecer, como valor recomendado de q_1 en la banqueta de balasto limpio en vías reales

de buena calidad, un rango entre 20 y 25 MPa, siendo válidos también los valores de entre 15 y 30 MPa. En julio de 2021, durante la ejecución de ensayos dinámicos, se detectaron desplazamientos verticales elevados en la vía lo que llevó a pensar en una pérdida de compacidad de la banqueta de balasto. Como se puede ver en la Figura 9, casi todos los ensayos anteriores a julio de 2021 (Casos F-G-H), dieron un resultado superior a 15 MPa, mientras que, a partir de julio de 2021 (Casos I-J), todos los ensayos excepto tres, dieron un resultado inferior a 15 MPa. Además, el valor medio de todos los ensayos realizados antes de julio de 2021 es igual a 20 MPa, mientras que el valor medio de todos los ensayos realizados después de julio de 2021 es igual a 13 MPa. Es decir, se aprecia una pérdida de resistencia, que podría estar asociada a la pérdida de compacidad de la banqueta de balasto, anteriormente indicada.

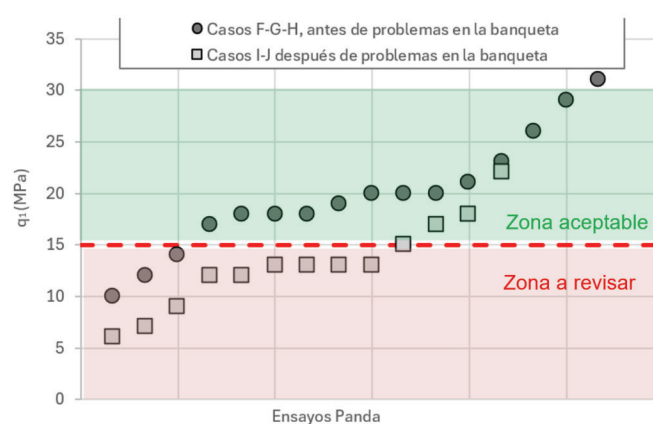


Fig. 9 – Resultados de resistencia representativa por punta (q_1) y ubicación de los ensayos Panda realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX.

En base a los resultados de los ensayos Panda realizados en el CFC entre 2019 y 2021, se puede establecer que la banqueta de balasto en el CFC presenta una resistencia q_1 del orden de 17 MPa de media, teniendo en cuenta los 30 ensayos efectuados. Este valor se encuentra algo por debajo de los valores obtenidos en vías reales (en el entorno de 20-25 MPa) y es acorde con la idea que se tiene de que la banqueta de balasto en el CFC posiblemente se compacte con menos energía que la que se utiliza en vías reales, como se ha mencionado anteriormente.

Por otra parte, la campaña de ensayos Panda sobre balasto contaminado con arena (Caso E, Tabla 1) no se ha incluido en la Figura 8, por no representar un balasto limpio, como el resto de los casos analizados en este trabajo. Sin embargo, resulta interesante destacar los resultados obtenidos con diferentes porcentajes de contaminación, para su uso en estudios en LAVs que atraviesen zonas desérticas en los cuales esta situación pueda producirse. En los ensayos con balasto contaminado con arena al 50% y al 100% se obtuvieron, respectivamente, valores de q_1 de 31 y de 37 MPa. Un 100 % de contaminación con arena de un balasto supone un aumento en el valor de la resistencia ($q_1=37$ MPa) de casi el doble respecto a su valor sin contaminación (suponiendo un valor medio de referencia de 20 MPa).

3.4 – Resumen de resultados

La Tabla 3 presenta un resumen de los resultados de resistencia dinámica representativa por punta (q_1) obtenidos en los 73 ensayos realizados en balasto en diferentes localizaciones y estados de compacidad. Además, se incluyen los pesos específicos (γ_d) correspondientes a esos valores de q_1 , calculados mediante la Ecuación (1).

Tabla 3 – Resultados medios de q_1 de los ensayos Panda, en laboratorio, en vías reales y en el CFC.

Localización	Caso - Denominación	N	q_1 (MPa)	γ_d (kN/m ³)	Observaciones
Laboratorio	A – Molde cilíndrico	3	8	14,5	Vertido (para obtención de γ_d mínima)
		2	13	15,2	Compactado en capas de 5 cm de espesor (para obtención de γ_d máxima)
		1	21	16,5	Compactado en capas de 20 cm de espesor (para obtención de γ_d intermedia)
	B – Molde paralelepípedo	6	9	14,9	Vertido (para obtención de γ_d mínima)
		3	19	16,2	Compactado en capas de 5 cm de espesor (para obtención de γ_d máxima)
Vía real (LAVs, España)	C – Alhama de Aragón	4	25	16,3 ^a (15,8-16,8) ^b	Sección LAV. Balasto recrecido
	D – Brihuega 2021	4	23	16,2 ^a (15,7-16,7) ^b	Sección LAV.
	M- Brihuega 2022	8	20	16,0 ^a (15,5-16,5) ^b	Sección LAV.
	N- Quintana	6	21	16,0 ^a (15,5-16,5) ^b	Sección LAV. Recién puesta en servicio.
Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC)	F - junio 2019	5	18	15,8 ^a (15,4-16,3) ^b	Sección LAV. Tras primer bateo
	G - julio 2020	5	18	15,8 ^a (15,4-16,3) ^b	Sección LAV. Sin actuaciones en el balasto
	H - febrero 2021	6	23	16,2 ^a (15,7-16,7) ^b	Sección LAV. Estabilización (500000 Tn)
	I - julio 2021	9	13	15,4 ^a (15,0-15,9) ^b	Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)
	J - octubre 2021	5	17	15,8 ^a (15,3-16,3) ^b	Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)

Notas:

^a xx.x: valor central obtenido de la ecuación de ajuste principal (Ecuación 1 y Figura 5a.)

^b (yy.y-zz.z): intervalo de valores obtenido del rango de la ecuación de correlación [$\pm 0,5$] (Figura 5a)

N, número de ensayos

3.5 – Propuesta de valores admisibles de resistencia dinámica por punta

Después de evaluar el conjunto de los resultados obtenidos en los ensayos Panda realizados (Tabla 3) y de las diferentes referencias recopiladas (Tabla 2), la Tabla 4 y la Figura 10 presentan, como síntesis, una propuesta de valores admisibles de resistencia dinámica por punta (en términos de q_1) y su relación con el peso específico (γ_d) de una banqueta de balasto limpio. Cabe destacar que la extrapolación de estos resultados y conclusiones, a vías distintas de una LAV y a balasto contaminado en vez de limpio, debe hacerse con precaución y evaluando las características específicas de cada caso.

Tabla 4 – Propuesta de valores admisibles de q_1 para una banqueta de balasto limpio, en función de los resultados del ensayo Panda.

q_1 (MPa)	γ_d (kN/m ³)	Estado de compacidad	Validez	Observaciones
< 10	< 15,1	Muy bajo	No	Balasto limpio vertido
10-15	15,1-15,6	Bajo	(1)	Balasto limpio ligeramente compactado
15-20	15,6-16,0	Medio	Sí	Balasto limpio, bateado y estabilizado con paso de trenes
20-25	16,0-16,3	Medio – alto	Sí	Valores recomendados para balasto limpio, bateado y estabilizado con estabilizadora
25-30	16,3-16,5	Alto	Sí	Valores superiores para balasto limpio, bateado y estabilizado con estabilizadora
> 30	> 16,5	Muy alto	(1)	Balasto muy compactado o con comienzo de contaminación

Nota (1): su validez debe evaluarse en cada caso, en función especialmente del tipo de vía (distinta de una LAV) y de balasto (contaminado en vez de limpio) en estudio.

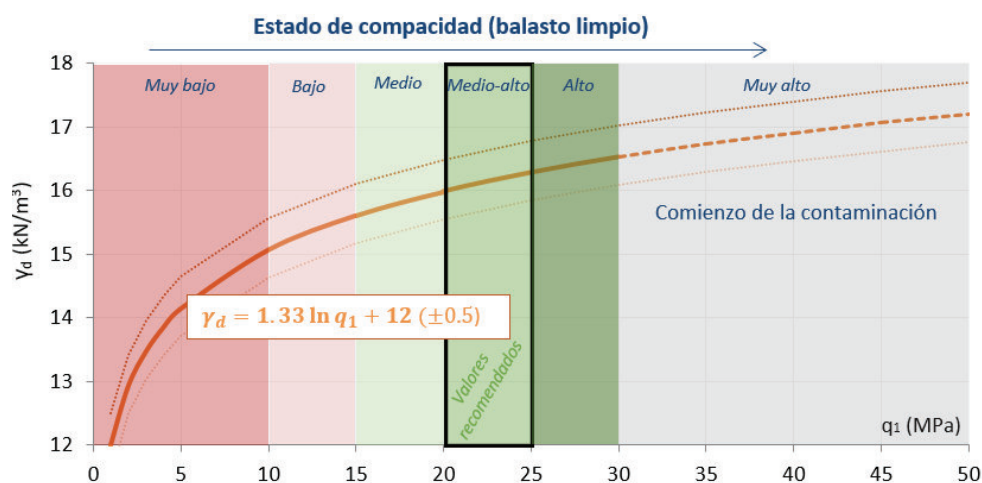


Fig. 10 – Propuesta de valores admisibles de q_1 para una banqueta de balasto limpio, en función de los resultados del ensayo Panda.

El análisis de la tabla y figura anteriores permite realizar los siguientes comentarios:

- Los pesos específicos se han calculado mediante la curva de correlación obtenida en los ensayos de laboratorio realizados para este trabajo [mostrada en la Ecuación (2)], válida para balastos de alta calidad como el empleado en este estudio y en las líneas de alta velocidad.
- El valor inferior límite aceptable de q_1 se podría establecer en el entorno de 15 MPa. Este valor se asocia a un peso específico (γ_d) de 15,5 kN/m³ con un rango de variación entre 15,2 y 16,1 kN/m³, asegurando un estado de compacidad adecuado mínimo de la banqueta de balasto.
- El valor superior límite aceptable de q_1 se podría establecer en 30 MPa, asociado a pesos específicos (γ_d) superiores a 16,5 kN/m³.

- Se considera que valores de q_1 superiores a 30 MPa podrían indicar el comienzo de la zona de balasto contaminado dentro de la banqueta de balasto. Este valor se corrobora con los ensayos realizados con una contaminación con arena del 50 % y del 100 %, en los que se obtuvieron valores de q_1 superiores a 30 MPa.
- Los límites de q_1 considerados como válidos se encuentran entre ambos límites: 15 y 30 MPa. Dentro de dicho rango, se puede considerar un estado de compacidad medio para valores de q_1 entre 15 y 20 MPa, y un estado de compacidad de medio a alto, para valores de q_1 entre 20 y 30 MPa.
- Por último, los valores de q_1 que se consideran recomendable para un balasto limpio deberían estar entre 20 y 25 MPa, asociados a γ_d de entre 16,0 y 16,3 kN/m³. Este rango de valores se encuentra comprendido entre los valores obtenidos en vías reales por el LG-CEDEX y por otros autores.

4 – CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del artículo se resumen en los siguientes puntos clave:

- La resistencia que se obtiene mediante el ensayo Panda es claramente dependiente del peso específico del balasto. La resistencia dinámica por punta de un balasto muy compactado en capas de poco espesor puede llegar a ser del doble de la resistencia de un balasto directamente vertido.
- La curva de calibración $\gamma_d - q_d$ obtenida en este trabajo es prácticamente coincidente con la curva propuesta por Benz-Navarrete (2009) para un balasto de origen basáltico, lo que permite pensar en una cierta validez general para balastos limpios de alta calidad. La ecuación de calibración obtenida es la indicada en la Ecuación 1.
- Los valores de resistencia dinámica por punta obtenidos con el Panda en banquetas de balasto limpio en vías reales suelen superar los 20 MPa. Este valor implicaría, según la ecuación de calibración, que el peso específico del balasto en vía es del orden de 16,0 kN/m³ o superior, cuando se encuentra en buenas condiciones de compacidad (por ejemplo, tras las tareas de bateo y estabilización).
- Los valores límites de q_1 considerados como válidos, para banquetas de balasto, son 15 y 30 MPa, correspondientes a pesos específicos usuales en vías ferroviarias de entre 15,5 y 16,5 kN/m³.
- Los valores de q_1 que se consideran recomendables para un balasto limpio deberían estar entre 20 y 25 MPa, asociados a γ_d de entre 16,0 y 16,3 kN/m³.

5 – AGRADECIMIENTOS

A todas las personas del LG del CEDEX que han colaborado en la realización de los ensayos: José Luis Fdez.-Rocha, Felipe García, Eva Marull, Fernando Pesquera, Mauro Muñiz, Rubén Ruíz, Miguel Martínez, Marcos Asperilla, Fermín Llamas y, María Santana.

6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benz-Navarrete M. A. (2009). *Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2*. PhD thesis. Blaise Pascal University, Clermont Ferrand, France.
- Benz-Navarrete, M. A.; Breul, P.; Arancibia, G.; Moustan, P. (2019). *Correlation between static (CPT) and dynamic variable energy (Panda) cone penetration tests*. Proceedings of the 6th Int. Conf. Geot. & Geophysical Site Characteriz, pp. 1-11. <https://doi.org/10.53243/ISC2020-421>

- Breul, P.; Saussine, G. (2011). *On-site mechanical characterization of the ballast state*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 55(1), pp. 31–38. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2011-1.04>
- Chaigneau, L. (2001). *Caractérisation des sols de surface a l'aide d'un pénétromètre*. PhD thesis. Blaise Pascal University, Clermont Ferrand, France.
- Escobar E.; Benz M. A.; Haddani, Y.; Lamas-López, F.; Calon, N.; Costa D'Aguiar, S. (2014). *Dynamic railway sites characterization using a Panda 3® Penetrometer*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8-10 juillet 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.099>
- Estaire, J.; Cuéllar, V.; Pardo de Santayana, F.; Santana, M. 2017. *Testing railway tracks at 1:1 scale at CEDEX Track Box*. International Congress on High-Speed Rail. Technologies and Long-Term Impacts. Ciudad Real, Spain.
- Gourvès, R. (1991). *Le PANDA – pénétromètre dynamique léger à énergie variable*. LERMES CUST, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand.
- Haddani, Y.; Breul, P.; Saussine, G.; Benz-Navarrete, M.A.; Ranvier, F.; Gourvès, R. (2016). *Trackbed mechanical and physical characterization using panda®/geoendoscopy coupling*. Procedia Eng., Vol 143, pp 1201-1209.
- Haddani, Y. (2020). Manuscrito no publicado. El Panda: Síntesis de correlación.
- Lamas-Lopez, F.; Cui, Y. J.; Costa d'Aguiar, S.; Calon, N. (2016). *Geotechnical auscultation of a French conventional railway track-bed for maintenance purposes*. Soils and Foundations, 56(2), pp. 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.007>
- NF P 94-105 (2012). *Suelos: Reconocimiento y pruebas. Control de calidad de compactación. Método del penetrómetro dinámico de energía variable: Principio y método de calibrado del penetrómetro*.
- Sanglerat, G. (1972). *The Penetrometer and Soil Exploration. Desarrollos en Ingeniería Geotécnica I*. Elsevier Publishing: Nueva York.
- Saussine, G.; Dhemaied, A.; Delforge, Q.; Benfeddoul S. (2017). *Statistical analysis of cone penetration resistance of railway ballast*. EPJ Web of Conferences 140, 16011 (2017). Powders & Grains 2017. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714016011>
- Zhou, S. (1997). *Caracterisation des sols de surface a l'aide du penetrometer dynamic léger a energie variable type Panda*. Formation Doctorale “Materiaux, structures, fiabilité en génie civil et génie mécanique” Laboratoire d'Accueil, LERMES/CUST, Université Blaise Pascal.