

## I. DISPOSICIONES GENERALES

### MINISTERIO DE FOMENTO

**8766** *Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal.*

La evolución tecnológica en la construcción de infraestructuras para el transporte ferroviario, materializada en parte en los trazados de alta velocidad, junto con las nuevas exigencias de seguridad, calidad, confort, normalización de los criterios de diseño y de interoperabilidad aconsejan la redacción de la presente Instrucción para el cálculo de los espesores de las capas de la sección transversal de la vía. Todo ello en concordancia con la Directiva 2004/49/CE, de 24 de abril de 2004, sobre la seguridad de los ferrocarriles comunitarios, incorporada al derecho interno español en el Real Decreto 810/2007, de 22 de junio.

El objeto de la presente Instrucción es establecer los elementos constitutivos de la sección transversal, la clasificación de los suelos, las clases de capacidad portante de la plataforma y los criterios para el cálculo de los espesores de las capas de asiento de la vía sobre balasto (balasto, subbase, capa de forma y otros), que constituyen parte de dicha sección transversal ferroviaria. La instrucción que figura en el Anexo se ha redactado en coherencia con las Fichas UIC 719R y 714R.

La competencia para aprobar mediante la presente orden la «Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal» viene dada por el artículo 15 del Real Decreto 2387/2004, de 30 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento del Sector Ferroviario.

Esta orden ha sido sometida a los trámites establecidos en el Real Decreto 1337/1999, de 31 de julio, por el que se regula la remisión de información en materia de normas y reglamentaciones técnicas y de reglamentos relativos a los servicios de la sociedad de la información, y en la Directiva 98/34/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 22 de junio, modificada por la Directiva 98/48/CE de 20 de julio, por la que se establece un procedimiento de información en materia de las normas y reglamentaciones técnicas.

La Orden se ha tramitado de conformidad con lo dispuesto en el artículo 15 del Reglamento del Sector Ferroviario, aprobado por el Real Decreto 2387/2004, de 30 de diciembre, que autoriza al Ministro de Fomento a aprobar las normas e instrucciones que rijan los proyectos básicos o de construcción de las infraestructuras ferroviarias y aquellas a las cuales deban sujetarse los trabajos y obras de construcción de las mismas.

En su virtud, a iniciativa de la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, a propuesta del Secretario General de Infraestructuras y con la conformidad del Secretario de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, dispongo:

Artículo único.

Aprobación de la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal.

Se aprueba mediante esta Orden la «Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal», que se inserta a continuación.

Disposición transitoria única. *Aplicación a proyectos y obras.*

No son objeto de esta Orden:

a) Los proyectos de nueva construcción de infraestructuras ferroviarias o de acondicionamiento de las existentes en la Red Ferroviaria de Interés General, cuya correspondiente orden de estudio se hubiese dictado con anterioridad a la entrada en vigor de esta Orden.

b) Las obras que se realicen en desarrollo de los proyectos a los que se refiere el punto anterior.

Disposición final primera. *Facultad de desarrollo.*

Se faculta a la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria para que mediante resolución que se publicará en el «Boletín Oficial del Estado», pueda actualizar la relación de normas referenciadas en el Anejo 6 de la «Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias. IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal». Asimismo, se le faculta dictar las instrucciones que sean necesarias para la aplicación e interpretación de esta Orden.

Disposición final segunda. *Entrada en vigor.*

La presente Orden entrará en vigor el día siguiente al de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Madrid, 14 de julio de 2015.–La Ministra de Fomento, Ana María Pastor Julián.

## ÍNDICE

### APARTADOS

1. Objeto.
  2. Ámbito de aplicación.
  3. Elementos constitutivos de la sección transversal.
  4. Materiales de la plataforma.
    - 4.1. Clasificación.
    - 4.2. Aptitud de los materiales para capa de forma.
  5. Capacidad portante de la plataforma. Clasificación.
  6. Dimensionado del espesor de la capa de forma.
  7. Dimensionado del espesor de la base o banqueta de balasto.
  8. Dimensionado del espesor de la subbase.
    - 8.1. Determinación del tráfico.
    - 8.2. Cálculo del espesor de la subbase en obra nueva.
    - 8.3. Cálculo del espesor de subbase en obras sobre trazado existente.
      - 8.3.1. Precauciones a tener en cuenta con las capas existentes.
      - 8.3.2. Estudios e investigaciones sobre capas existentes.
    - 8.4. Sensibilidad a la helada.
- Anejo 1. Definiciones.
- Anejo 2. Determinación del tráfico.
- Anejo 3. Otros materiales de subbase.
- Anejo 4. Espesor de protección frente a la helada.
- Anejo 5. Metodología para los estudios e investigaciones sobre las capas existentes.
  1. Estudios estadísticos de operaciones de mantenimiento.
  2. Investigación sistemática de carácter geotécnico.
- Anejo 6. Normas relacionadas.

## 1.- OBJETO

El objeto de la presente Instrucción es establecer los criterios para el cálculo de los espesores de las capas de asiento de la vía sobre balasto (balasto, subbase, capa de forma y otros), que constituyen parte de la sección transversal ferroviaria. El resto de las características geométricas necesarias para la definición de estas capas no son objeto de esta Instrucción.

## 2.- ÁMBITO DE APLICACIÓN

La presente Instrucción será de total aplicación al proyecto y construcción de toda obra nueva ferroviaria, a su mantenimiento (conservación, renovación) y a la adaptación a nuevas condiciones de explotación que no supongan cambio de trazado, en vía sobre balasto, de ancho estándar europeo (1435 mm) o ibérico (1668mm) y para velocidades de circulación de hasta 350 km/h. En el caso de anchos inferiores a los indicados la Instrucción no tendrá un carácter obligatorio, pudiéndose adoptar otros criterios diferentes a los aquí expuestos.

En el concepto de obra nueva se incluyen tanto las líneas de nueva construcción, como las modificaciones de las existentes que supongan nuevo trazado.

En las obras de mantenimiento (conservación y renovación) y en las de adaptación a nuevas condiciones de explotación que no supongan cambio de trazado, el criterio de proyecto estará a lo indicado en la presente Instrucción, tratando en general, de aprovechar al máximo las capas de soporte de la vía existentes. En este caso, para el proyecto de la nueva sección transversal, será admisible, si resulta justificado, el mantener alguna de las capas existentes cuyas características no coincidan con las recogidas en esta Instrucción, así como el no colocar la totalidad de las capas aquí definidas. No obstante, siempre que exista o se proyecte una capa de asiento o una sección como las que se incluyen en la presente Instrucción, su dimensionamiento se realizará de acuerdo con la misma.

### 3.- ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

La sección transversal ferroviaria está constituida, de arriba abajo, por los siguientes elementos:

- Carril.
- Elementos de sujeción y apoyo entre carril y traviesas.
- Traviesas.
- Elementos de sujeción y apoyo bajo traviesas (opcionalmente).
- Base o banqueta de balasto: está constituida por piedra machacada de gran resistencia al desgaste, con granulometría uniforme y tamaños que oscilan aproximadamente entre 20 y 60 mm, según *Pliego PF-6* del Ministerio de Fomento.
- Subbase. Constituida por una o varias capas, con la misión de contribuir al reparto de cargas y a dotar a la vía de la rigidez vertical adecuada, absorber vibraciones, evitar la contaminación del balasto por ascenso de finos, proteger la plataforma contra las heladas y evacuar las aguas de lluvia.

En el caso más general estará compuesta, de arriba a abajo, por las capas siguientes:

Subbalasto: constituido por grava arenosa de granulometría continua, compactada al 100 % del PM, no deformable al paso de maquinaria de obra y de baja permeabilidad, con el fin de proteger a la plataforma del agua de lluvia, todo ello según *Pliego PF-7* del Ministerio de Fomento.

Capa de cimentación: constituida por grava o zahorra bien graduadas de granulometría continua, compactada al 100 % del PN y no deformable al paso de la maquinaria de obra. Se suele utilizar sobre explanadas o superficies del terraplén o excavación de capacidad portante media, no siendo necesaria, en general, sobre suelos QS3.

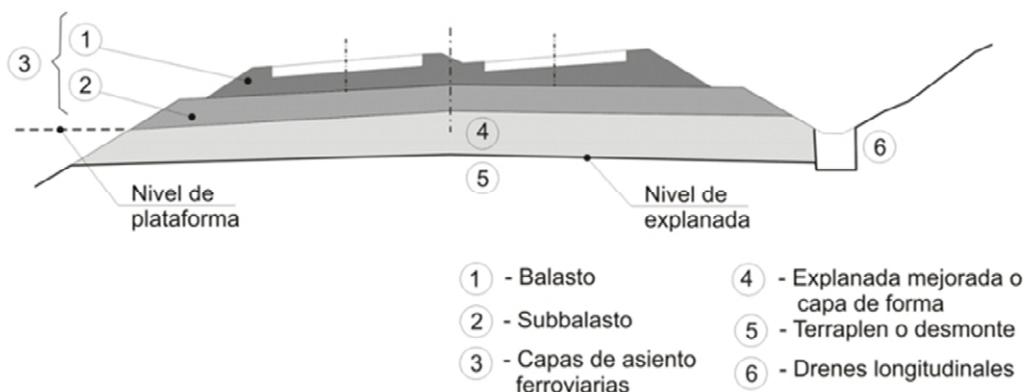
Capa anticontaminante: constituida por arena de granulometría continua. Se suele utilizar sobre explanadas de baja capacidad portante. A veces se sustituye por otra capa de granulometría uniforme con función drenante.

Filtro anticontaminante (geotextil): reduce el ascenso de los finos de la explanada a las capas superiores, facilitando la puesta en obra de éstas. Además, reduce la formación de roderas sobre la plataforma al paso de la maquinaria de obra.

Lo habitual es que la subbase esté constituida por una única capa de subbalasto.

- Capa de forma de la plataforma: es la capa superior de remate y coronación de la explanada o superficie del terraplén o excavación. Su función principal es mejorar la capacidad portante de ésta. Ha de ser compactable y de mejores características que las de la explanada.

En la siguiente figura 1 se representa la sección transversal ferroviaria.



La explanada ferroviaria bajo la capa de forma, está constituida generalmente por el terreno natural (secciones en desmante) o por material de aportación (secciones en terraplén). En el caso de sección a media ladera la composición será mixta. El material de aportación procederá, en general, de la traza o de préstamos cercanos.

Las características geotécnicas de la plataforma dependerán, en principio, de la calidad del material y de sus condiciones de puesta en obra (grado de compactación, módulo de deformación  $E_{v2}$ , etc.). No obstante, la inclusión de una capa de forma, con los requisitos de calidad y espesor indicados en esta Instrucción y con las condiciones de puesta en obra recogidas en el correspondiente Pliego, permitirá aumentar la capacidad portante de la explanada de partida.

Además, la plataforma deberá estar dotada de una red de drenaje superficial y de otra profunda, en su caso, para recoger y evacuar las aguas procedentes de escorrentía, de filtraciones o subterráneas que puedan alterar las condiciones de ésta.

La base de balasto y la subbase constituyen las denominadas capas de asiento o de soporte de la vía, que son las responsables de su comportamiento en cuanto a rigidez, alineación, nivelación y drenaje.

## 4.- MATERIALES DE LA PLATAFORMA.

## 4.1.-CLASIFICACIÓN.

Los materiales, del terreno natural o de aportación, que constituyen la plataforma ferroviaria, se clasificarán según lo indicado en la Tabla 1 siguiente.

Tabla 1: Clases de calidad de suelos.

TIPO DE SUELO (clasificación geotécnica)	Clase de calidad de suelo
0.1. Suelos con alto contenido de materia orgánica. 0.2. Suelos blandos, con contenidos de más del 15 % de finos <sup>a</sup> , con alto contenido de humedad, inapropiados para compactar. 0.3. Suelos tixotrópicos (p.e.: arcillas de gran susceptibilidad). 0.4. Suelos conteniendo material soluble (p.e.: rocas salinas o yeso). 0.5. Terreno contaminado (p.e.: residuos industriales). 0.6. Suelos con un contenido medio de materia orgánica. 0.7. Suelos de alta plasticidad, con más del 15% de finos, suelos colapsables <sup>c</sup> o suelos expansivos <sup>d</sup> .	QS0
1.1. Suelos conteniendo más del 40 % de finos <sup>a</sup> (excepto los suelos clasificados como 0.2 o 0.7). 1.2. Rocas muy susceptibles a la meteorización. P.e.: - Cretas con $\rho_d < 1,7 \text{ t/m}^3$ y alta friabilidad. - Margas. - Esquistos meteorizados.	QS1
1.3. Suelos conteniendo entre el 15 y el 40 % de finos <sup>a</sup> (excepto los clasificados como 0.2 o 0.7). 1.4. Rocas moderadamente susceptibles a la meteorización. P.e.: - Cretas con $\rho_d < 1,7 \text{ t/m}^3$ y baja friabilidad. - Esquistos no meteorizados. 1.5. Rocas blandas. P.e.: Con Microdeval húmedo (MDH) > 40 y Los Ángeles (LA) > 40.	QS1 <sup>e</sup>
2.1. Suelos conteniendo entre el 5 y el 15 % de finos <sup>a</sup> , excepto los suelos colapsables <sup>c</sup> . 2.2. Suelos uniformes ( $CU \leq 6$ ), conteniendo menos del 5 % de finos <sup>a</sup> , excepto los suelos colapsables <sup>c</sup> .	QS2 <sup>f</sup>

TIPO DE SUELO (clasificación geotécnica)	Clase de calidad de suelo
2.3. Rocas moderadamente duras.  P.e.:  Con $25 < MDH \leq 40$ y $30 < LA \leq 40$ .	
3.1. Suelos bien graduados, conteniendo menos del 5 % de finos <sup>a</sup> . 3.2. Rocas duras.  P.e.:  Con $MDH \leq 25$ y $LA \leq 30$	QS3

- a. Estos porcentajes están obtenidos del análisis granulométrico realizado al material que pasa por el tamiz de 63 mm.; estos porcentajes pueden ser incrementados hasta un 5 % si se toma un número suficientemente representativo de muestras.
- c. El asiento en el ensayo de colapso es superior al 1 % para muestras inalteradas o remoldeadas con la densidad del ensayo Proctor Normal y una presión normal de 0,2 MPa.
- d. El hinchamiento libre es superior al 3 % para muestras inalteradas o remoldeadas con la densidad del ensayo Proctor Normal.
- e. Estos suelos pueden entrar en la clase QS2 si las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas son buenas.
- f. Estos suelos pueden entrar en la clase QS3 si las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas son buenas.

Las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas locales, en tanto que afectan a la capacidad portante del suelo, se consideran buenas si:

- la capa más elevada del suelo queda por encima del nivel más alto que alcanza el agua en el terreno, siempre que esa agua pueda afectarle negativamente, (Este nivel debería estimarse suponiendo unas condiciones climatológicas desfavorables y ausencia de drenaje),
- no hay flujo de agua natural perjudiciales ni transversal, ni longitudinal o vertical, en la plataforma,
- el agua de la lluvia se drena adecuadamente de la plataforma, y el sistema de drenaje, longitudinal o transversal, se encuentra en buen estado de funcionamiento.

Si alguno de estos tres criterios no se cumple, las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas deben considerarse como malas.

## 4.2.- APTITUD DE LOS MATERIALES PARA CAPA DE FORMA

En cuanto a la aptitud para la utilización en capa de forma de los materiales descritos en la Tabla 1, se seguirán los criterios estipulados en la Tabla 2:

Tabla 2.

APTITUD DE LOS MATERIALES PARA CAPA DE FORMA	MATERIAL
SIEMPRE UTILIZABLES	QS 2.3 QS 3.1 QS 3.2
UTILIZABLES CON CONDICIONES (se justificará adecuadamente su uso teniendo en cuenta el contenido de agua, condiciones climáticas, altura limitada de terraplén, revestimiento con protección de mejor calidad, capa sándwich, etc.)	QS 1.1 con LL < 35 QS 1.3 QS 1.4 QS 1.5 QS 2.1 QS 2.2
NO UTILIZABLES	El resto

## 5.- CAPACIDAD PORTANTE DE LA PLATAFORMA. CLASIFICACIÓN.

La capacidad portante de una plataforma depende de la calidad de su material constituyente. Así pues, se distinguen tres tipos de plataformas:

PLATAFORMA	CAPACIDAD PORTANTE
P 1	Baja
P 2	Media
P 3	Alta

Como criterio general, en el caso de obra nueva, se deberá disponer siempre de una plataforma con capacidad portante alta, clase P3, con objeto de minimizar los espesores necesarios de balasto y subbalasto y de mejorar el comportamiento a largo plazo. Para ello será necesario colocar, en general, una capa de forma, con las características recogidas en el apartado siguiente. En casos excepcionales (disponibilidad de materiales, bajo tráfico, etc.) y tras los adecuados estudios justificativos, se podrán admitir plataformas de capacidad portante P1 y P2, lo que supondrá colocar mayores espesores de subbalasto que en el caso de plataformas P3 (el espesor de balasto en una línea es normalmente uniforme en toda su longitud por lo que si se usan plataformas de capacidad portante menor en unas secciones que en otras ello conllevará mayores espesores de subbalasto).

## 6. DIMENSIONADO DEL ESPESOR DE LA CAPA DE FORMA

El espesor necesario de la capa de forma se obtendrá de la Tabla 3, a partir de los datos de entrada siguientes:

- Capacidad portante de la plataforma, que se fija como objetivo.
- Calidad del material de la explanada existente.
- Calidad del material disponible para la capa de forma. (en general, se utilizará material de mejor calidad que el de la explanada existente).

Tabla 3. Determinación de la capacidad portante de la plataforma

Explanada (superficie del terraplén o excavación)		Clase de plataforma por su capacidad portante	Requisitos de la capa de forma		
Clase de calidad de suelos	CBR <sup>a</sup> (min) <sup>(1)</sup>		Clase de calidad de suelos	CBR <sup>b</sup> (min)	Mínimo espesor: "e <sub>f</sub> " (m)
QS 1	2	P 1	QS 1	2	<sup>(2)</sup>
		P 2	QS 2	5	0,50
		P 2	QS 3	17	0,35
		P 3	QS 3	17	0,50
QS 2	5	P 2	QS 2	5	<sup>(3)</sup>
		P 3	QS 3	17	0,35
QS 3	17	P 3	QS 3	17	<sup>(4)</sup>

a. CBR correspondiente a las condiciones "in situ" de compactación y densidad del material (las muestras se saturarán para el ensayo).

b. CBR correspondiente a una muestra remoldeada compactada en las condiciones de proyecto para el material (las muestras se saturarán para el ensayo).

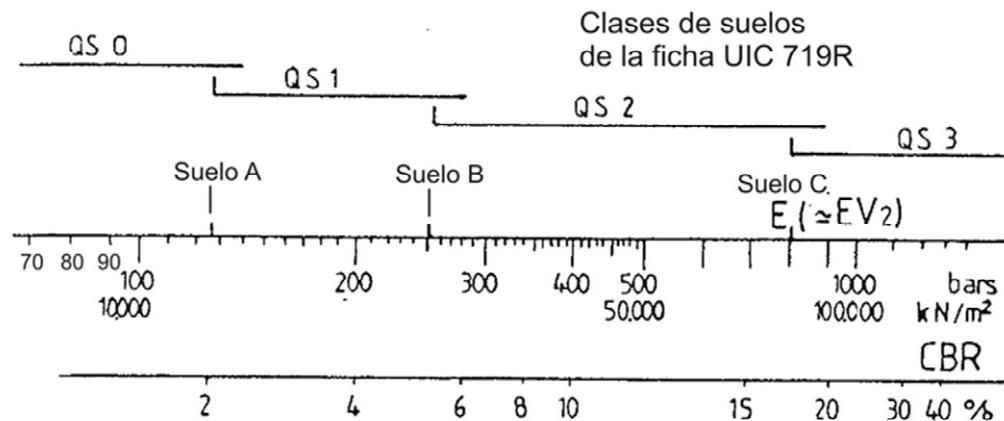
<sup>(1)</sup> Ver Figura 2.

<sup>(2)</sup> Aunque no sea necesario poner capa de forma, el terreno de la plataforma existente deberá tener una densidad seca  $\rho_d \geq 95\%$  PN en una profundidad mínima de 50 cm y un  $E_{v2} \geq 45$  MN/m<sup>2</sup> en su superficie, con  $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,2$ .

<sup>(3)</sup> Idem, con  $E_{v2} \geq 60$  MN/m<sup>2</sup>.

<sup>(4)</sup> Idem, con densidad seca  $\rho_d \geq 100\%$  PN y  $E_{v2} \geq 80$  MN/m<sup>2</sup>.

FIGURA 2: ESCALAS COMPARATIVAS DE CRITERIOS USUALES DE CLASIFICACIÓN DE PLATAFORMAS (CUESTIÓN D 117 – ORE. INFORME Nº 28)



#### 7.-DIMENSIONADO DEL ESPESOR DE LA BASE O BANQUETA DE BALASTO

El espesor mínimo de la capa de balasto bajo traviesa  $e_b$ , en función de la velocidad máxima de circulación en la línea ferroviaria, será el siguiente:

V (km/h)	$e_b$ (cm)
$V < 120$	25
$V \geq 120$	30

## 8. DIMENSIONADO DEL ESPESOR DE LA SUBBASE

El espesor conjunto de las capas de asiento de la vía (balasto + subbase) depende de los siguientes factores:

- Características de la plataforma, tanto de las intrínsecas de los suelos que la constituyen (naturaleza, capacidad portante y sensibilidad al agua y a las heladas), como de las condiciones hidrogeológicas del lugar.
- Condiciones climáticas del lugar.
- Características del tráfico ferroviario (cargas totales acumuladas, cargas por eje, velocidades, etc.).
- Características de la superestructura o armamento de la vía (tipo de carril, naturaleza e intervalo entre traviesas, etc.).

## 8.1.- Determinación del tráfico.

En el cálculo del espesor de la subbase influyen la magnitud y el número de cargas generadas por la rodadura de las circulaciones ferroviarias sobre la vía. Estas cargas inducen unas tensiones dinámicas, variables con la velocidad, que a partir de un cierto umbral, terminan produciendo asientos permanentes, con la consiguiente degradación de la plataforma. Por tanto, y como primer paso, es necesario definir un "Tráfico medio diario equivalente" en cada sección de vía a proyectar, el cual se determina de acuerdo con el Anejo 2 de la presente Instrucción.

Las líneas se clasifican, según el valor de su "Tráfico medio diario equivalente",  $T_e$ , en los seis grupos siguientes:

Tabla 4

GRUPO	TRÁFICO MEDIO EQUIVALENTE
1	$130.000 \text{ t/día} < T_e$
2	$80.000 \text{ t/día} < T_e \leq 130.000 \text{ t/día}$
3	$40.000 \text{ t/día} < T_e \leq 80.000 \text{ t/día}$
4	$20.000 \text{ t/día} < T_e \leq 40.000 \text{ t/día}$
5	$5.000 \text{ t/día} < T_e \leq 20.000 \text{ t/día}$
6	$T_e \leq 5.000 \text{ t/día}$

## 8.2.- Cálculo del espesor de la subbase en obra nueva.

En el caso más habitual de que la subbase esté constituida por una única capa de subbalasto el espesor de la misma se obtendrá de la fórmula:

$$e_{sb} = E + a + b + c + d + f - e_b$$

donde:

$e_{sb}$  = espesor de la capa de subbase, en m.

$e_b$  = espesor de la base o banquetta de de balasto bajo traviesa, en m, según lo establecido en el punto 7.

Los valores de los diferentes parámetros se sacarán de la Tabla 5.

Además, el espesor mínimo de material insensible a la helada cumplirá lo indicado en el Anejo 4 de la presente Instrucción.

Lo mismo será perfectamente aplicable al caso multicapa, sin más que distribuir el espesor total necesario entre las distintas capas de la subbase.

Tabla 5.

FACTOR CORRECTOR	VALOR DEL FACTOR	CONDICIONES DE APLICACIÓN
E (por clase de plataforma)	0,70 m 0,55 m 0,45 m	para plataformas P1. Para plataformas P2. Para plataformas P3.
a (por grupo de tráfico)	0 - 0,10 m	para los grupos 1 a 4 (según Tabla 4) para los grupos 5 y 6 (según Tabla 4)
b (por tipo de traviesa)	0 (2,5-L)/2	para traviesas de madera de longitud $L \geq 2,60$ m. para traviesas de hormigón de longitud L. (b y L en m; $b < 0$ si $L > 2,50$ m).
c (por dificultad de ejecución)	0 - 0,10 m	para situación normal. Para condiciones de trabajo difíciles en líneas existentes
d (por cargas máx. por eje)	0 0,05 m 0,12 m	con carga máxima por eje de los vehículos remolcados $\leq 200$ kN. Con carga máxima por eje de los vehículos remolcados $\leq 225$ kN. Con carga máxima por eje de los vehículos remolcados $\leq 250$ kN.
f (por capa de forma)	0 geotextil	(sin geotextil) cuando la capa de forma es de QS3. Con geotextil cuando la capa de forma es QS1 ó QS2.

En cualquier caso, el espesor de la capa de subbase será siempre mayor o igual a 15 cm, por exigencias de puesta en obra.

En caso de utilizar materiales diferentes al subbalasto se estará a lo indicado en el Anejo 3 de la presente Instrucción.

### 8.3.- Cálculo del espesor de la subbase en obras sobre trazado existente.

En las obras de mantenimiento (conservación y renovación) y en las de adaptación a nuevas condiciones de explotación que no supongan cambio de trazado se tratará de aprovechar al máximo las capas de soporte de la vía existentes.

Como lo habitual es que la subbase esté constituida por una única capa de subbalasto, todo lo que sigue, se refiere al cálculo del espesor de éste último, aunque será perfectamente aplicable al caso multicapa, sin más que distribuir el espesor total necesario entre las distintas capas de la subbase.

Las diferencias con respecto al caso de obra nueva son que:

1. Se dispone de información real sobre el comportamiento de la estructura de asiento de la vía (conjunto de carril, placa de asiento, traviesa, balasto, subbalasto, otras capas de asiento y la plataforma, incluida la capa de forma), ante unos tráficos conocidos. Dicho comportamiento se puede cuantificar por el número de intervenciones de conservación que se han realizado.
2. Se desconoce, en general, la constitución y grado de compactación de la plataforma, capa de forma y subbase. Si éstas se conocieran, (p.e. por medio de investigaciones y trabajos geotécnicos) y su composición, espesores y grado de compactación coincidieran, además, con las exigencias de los puntos 6 y 8.2 se podrían aplicar los cálculos de este último apartado.

Se tienen dos situaciones diferenciadas:

- Situación "0": Es la situación existente o de partida. Se dispone de los datos del tráfico, a partir de los cuales se puede obtener el tráfico medio diario equivalente en la situación existente " $T_{e0}$ ". También se tiene la información, proporcionada por los Servicios de Mantenimiento de la vía, sobre el número de intervenciones anuales de conservación en la situación existente " $I_0$ ".

Además, se puede realizar la caracterización geométrica y estructural de la vía existente, determinando los parámetros mecánicos (módulo de elasticidad  $E$ , coeficiente de Poisson " $\nu$ ", cohesión " $c$ ", ángulo de rozamiento interno " $\phi$ "), densidades y humedades, tanto del material constitutivo de la plataforma como del empleado para las capas de asiento, así como sus espesores. Estos datos se obtendrán mediante campañas de reconocimiento geotécnico, que se realizarán siguiendo las indicaciones recogidas en el Anejo 5.

Con esta información se divide la longitud de proyecto en tramos de características homogéneas. Para cada uno de ellos, se analizarán los efectos de las distintas cargas del tráfico sobre la plataforma, refiriendo todas ellas a la carga dinámica correspondiente a un eje de referencia de 200 kN de carga estática. Mediante cálculo (método de elementos finitos u otro), se obtendrán las tensiones dinámicas ( $\sigma_0$ ) y deformaciones sobre la plataforma en la vertical

del carril (o en la vertical pésima en caso de no coincidir con la del carril para vías de ancho inferior al estándar europeo de 1435 mm). En resumen se puede decir que se han obtenido los valores de " $\sigma_0$ ,  $Te_0$  e  $l_0$ ".

- Situación "1": Es la situación de proyecto o prevista, que se marca como objetivo futuro. Se dispone de una estimación de los tráficos previstos, a partir de los cuales se obtiene el tráfico medio diario equivalente en la situación de proyecto " $Te_1$ ".

Por otro lado se fija como objetivo el realizar una intervención de conservación por cada  $100 \cdot 10^6$  toneladas de tráfico equivalente que circulen, o cada 20 años. De esta forma, el número de intervenciones anuales de conservación en la situación de proyecto " $I_1$ " será:

$$I_1 = (Te_1 \cdot 365) / 100 \cdot 10^6. \quad (\text{Si } I_1 < 0,05, \text{ se tomará } I_1 = 0,05)$$

Aplicando la ley de DORMON se obtiene el valor de la tensión dinámica  $\sigma_1$  correspondiente a la situación de proyecto que, manteniendo la estructura soporte de vía existente, produciría una degradación análoga a la correspondiente a  $\sigma_0$  en la situación existente. La expresión de esta ley es:

$$\lambda = \sigma_1 / \sigma_0 = [(Te_0 \cdot I_1) / (Te_1 \cdot I_0)]^{0,2}$$

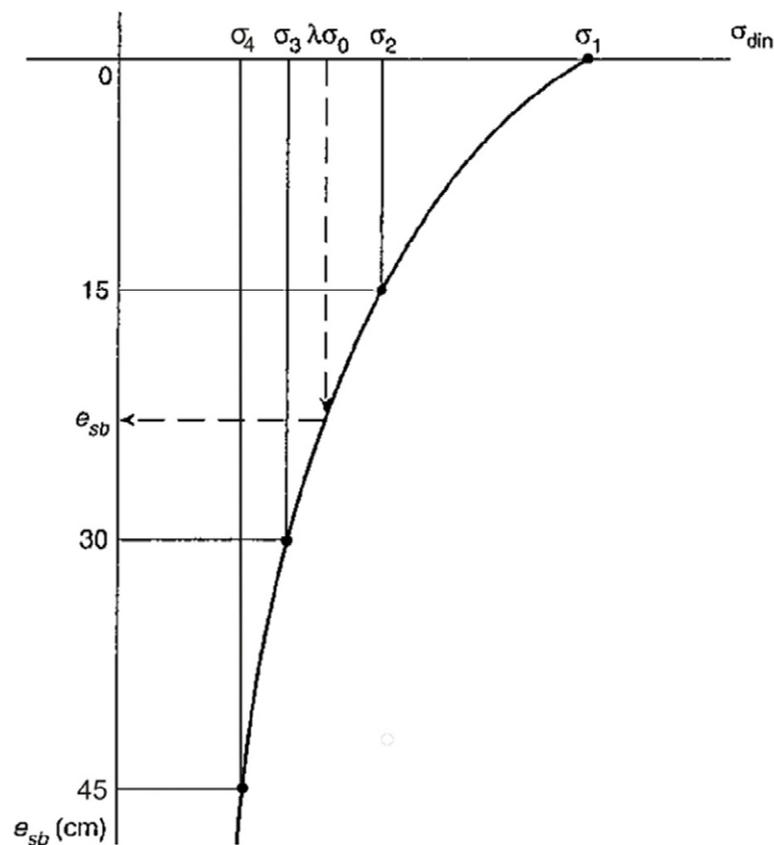
Del análisis de la ecuación anterior se observa que en el caso más normal, de que se incremente el tráfico previsto en la situación de proyecto con respecto a la situación 0 existente, y/o se pretenda reducir el número de actuaciones de conservación, el valor de  $\lambda$  será menor que 1. Por tanto, al ser una situación más exigente, las tensiones máximas en la situación de proyecto, generadas por el eje de referencia deberán ser menores que las producidas por ese mismo eje en la situación 0 existente, es decir, habría que mejorar la estructura de soporte de la vía.

En resumen, se presentan dos casos diferenciados:

- 1)  $\lambda \geq 1$ . No sería necesario mejorar la estructura de soporte, resultando válida la inicial, ya que se trata de pasar de una situación inicial más exigente a otra menos exigente, la de proyecto, en la que las tensiones máximas admisibles son superiores.
- 2)  $\lambda < 1$ . Habría que mejorar la estructura de soporte. En primer lugar se podría mejorar el armamento de la vía (cambio de tipo de carril, de tipo de traviesa, de placa de asiento) y/o aumentar el espesor del balasto hasta 35 cm. Si aún así se sigue produciendo esta condición habría que actuar sobre la capa

de subbalasto. Para el cálculo se considerarán cuatro hipótesis de espesor de subbalasto adicional, por ejemplo: 0 cm, 15 cm, 30 cm y 45 cm. Para cada una de ellas se obtiene por cálculo (método de elementos finitos u otro), las tensiones dinámicas para la situación de proyecto con esta nueva estructura. De esta manera se puede dibujar un gráfico como el de la fig. 3, en el que para cada espesor de subbalasto adicional, se representa la tensión dinámica correspondiente en la superficie de la plataforma para la situación de proyecto. Para ello, se dispone de cuatro puntos, debiendo interpolar una curva que relacione ambas variables. Finalmente entrando en esta curva con el valor  $\lambda \cdot \sigma_0$ , se obtiene el espesor de subbalasto adicional a disponer. El valor se redondea a múltiplos de 5 cm. Según la siguiente Figura 3.

FIGURA 3: CURVA DE TENSIONES MÁXIMAS- ESPESORES ADICIONALES DEL SUBBALASTO.



Si el espesor del subbalasto necesario, deducido del cálculo, es excesivo, lo aconsejable es actuar sobre la plataforma.

En cualquier caso el espesor de la capa de subbalasto será mayor o igual a 15 cm, tal como se indicaba en el apartado anterior.

### 8.3.1.-Precauciones a tener en cuenta con las capas existentes

Bajo las vías existentes es habitual que aparezca, entre balasto y plataforma, una capa intermedia (designada según las zonas como costra, machaca, etc.) que actúa, por lo general, muy eficazmente en el comportamiento de la vía.

Es muy conveniente mantener esa capa en su integridad, es decir, no suprimirla ni reducir su espesor, salvo que sus condiciones geotécnicas sean deficientes. Por ello, si fuera preciso introducir subbalasto suplementario, éste se deberá asentar sobre ella, lo que supondrá una elevación de la rasante. Si esto no fuera posible, antes de suprimir esa capa, deberá comprobarse previamente la compactabilidad del terreno subyacente y su aptitud como soporte del subbalasto.

### 8.3.2.- Estudios e investigaciones sobre capas existentes

#### a) Datos de partida

La decisión de colocar o mejorar una capa de subbalasto en una vía existente, al igual que ocurre con otras capas de la sección transversal, se realizará en función del análisis de los siguientes parámetros:

- Naturaleza del tráfico (carga por eje, toneladas transportadas, velocidad, etc.).
- Calidad geométrica de la vía compatible con dicho tráfico.
- Coste de mantenimiento necesario para asegurar la calidad geométrica.

También hay que tener en cuenta los factores que intervienen en la degradación de la vía, que fundamentalmente son los siguientes:

- Las propiedades mecánicas de las capas de asiento.
- El funcionamiento hidráulico defectuoso.
- La fatiga de la plataforma.
- La rigidez de la plataforma.
- Los efectos de las heladas

#### b) Metodología.

Desde el punto de vista operativo, existen dos metodologías complementarias para los estudios e investigaciones sobre capas existentes:

- Investigación sistemática, basada en el estudio estadístico de las operaciones de conservación efectuadas.
- Investigación sistemática de carácter geotécnico

Ambos métodos se desarrollan en el Anejo 5.

#### 8.4.- Sensibilidad a la helada.

En determinadas circunstancias climatológicas, con permanencia de bajas temperaturas, la penetración de la helada a través de las capas de asiento de la vía puede alcanzar al subbalasto e incluso a la plataforma, produciendo variaciones de su volumen y las consiguientes deformaciones en la vía.

En estos casos el subbalasto deberá ser insensible a la helada, al menos en el espesor de penetración de ésta, determinado según lo indicado en el Anejo 4.

En general, la clasificación de materiales granulares según su sensibilidad a la helada es la siguiente:

- Insensibles a la helada. Grava y arena.
- Sensibles a la helada. Arcilla.
- Muy sensibles a la helada. Limo.

Un material insensible puede llegar a ser sensible si el porcentaje de arcilla o limo que contiene supera un valor crítico, lo cual queda reflejado en el siguiente criterio de Casagrande: Un material granular se considera insensible a la helada si cumple el siguiente criterio:

$$L_m \leq 3 \% , \text{ para } C_u \geq 15$$

$$L_m \leq ( 13,5 - 0,7 C_u ) \% , \text{ para } 5 < C_u < 15$$

$$L_m \leq 10 \% , \text{ para } C_u \leq 5$$

Donde :

$L_m$  = porcentaje en peso, referido a la fracción entre 0 y 63 mm, de elementos de diámetro inferior a 0,02 mm (obtenido por sedimentometría).

$C_u$  = coeficiente de uniformidad.

## ANEJO 1

## DEFINICIONES

Estructura de soporte de la vía.- Conjunto formado por el carril, la placa de asiento, la traviesa, el balasto, la subbase, la capa de forma (en su caso) y lo que subyace a la explanada.

Capas de asiento.- Conjunto de capas de material granular, que colocadas entre las traviesas y la plataforma, constituyen el apoyo o soporte de la vía, asegurando el buen comportamiento de ésta en cuanto a rigidez, alineación, nivelación y drenaje. Lo forman la banqueta de balasto y la subbase.

Base o banqueta de balasto.- Capa de material granular, procedente del machaqueo de piedra de gran resistencia al desgaste, con granulometría uniforme y tamaños comprendidos entre 22,4 y 63 mm (con un máximo del 3% de tamaños inferiores), sobre la que se apoyan las traviesas.

Subbase.- Conjunto de una o más capas de asiento que se colocan entre la banqueta de balasto y la plataforma. En el caso más general, estará formada por una capa de subbalasto, una capa de cimentación, una capa anticontaminante y un geotextil anticontaminante, aunque lo habitual es que conste de una única capa de subbalasto.

Capa de forma.- Es la capa superior de remate y coronación de la plataforma, que se dispone en algunos casos con el fin de mejorar la capacidad portante de ésta última.

Explanada.- Superficie superior de desmontes y terraplenes.

Plataforma.- Superficie sobre la que se apoyan las capas de asiento de la vía y los dispositivos destinados al funcionamiento de los trenes.

Suelo.- Agrupación natural de granos minerales que se pueden separar por medios mecánicos simples, tales como agitación en un medio acuoso. Según su contenido en materia orgánica  $C_0$ , se clasifican, según la Ficha UIC 719 R en su versión de Febrero de 2008, en:

Suelos minerales:	$C_0 \leq 2\%$
Suelos con bajo contenido en materia orgánica:	$2\% < C_0 \leq 6\%$
Suelos con contenido medio en materia orgánica:	$6\% < C_0 < 20\%$
Suelos con alto contenido en materia orgánica:	$C_0 \geq 20\%$

Suelos tixotrópicos.- Son los que contienen elevadas cantidades de arcillas tixotrópicas, las cuales pierden resistencia al ser amasadas, para luego, si se mantienen con una humedad constante, recuperar con el tiempo una parte de ella al ser remoldeadas

Coefficiente de uniformidad ( $C_U$ ).-  $C_U = D_{60} / D_{10}$ , siendo  $D_x$  el tamiz que deja pasar el  $x$  % de la muestra en peso, es decir, que el  $x$  % de la muestra es de tamaño inferior al  $D_x$ .

Coefficiente de curvatura ( $C_C$ ).-  $C_C = D_{20}^2 / (D_{10} D_{60})$

Coefficiente de Desgaste de Los Angeles (LA).- Mide la resistencia al desgaste de los áridos naturales o procedentes de machaqueo. Es el cociente entre la diferencia de peso de la muestra inicial y del material retenido por el tamiz 1,6 mm UNE (una vez sometida ésta a un proceso abrasivo normalizado por medio de bolas de hierro) y el peso inicial de la muestra.

Coefficiente Micro-Deval Húmedo (MDH).- Mide la fragilidad de un árido. Es el cociente entre la diferencia de peso de la muestra inicial y el del material retenido por el tamiz 1,6 mm UNE (una vez sometida ésta a un proceso abrasivo y normalizado por medio de bolas de hierro en presencia de agua) y el peso inicial de la muestra.

Geotextil.- Elemento de construcción constituido por una lámina textil de material polimérico permeable (poliéster, polietileno, polipropileno o poliamida), que se emplea en contacto con suelos para aplicaciones geotécnicas.

Geotextil anticontaminante.- Geotextil no tejido con función separadora, es decir, que permite el paso del agua a través de él, pero no el de los elementos finos de los suelos en su contacto.

Conservación.- Conjunto de operaciones de actuación sobre la vía, por las que se restablecen las condiciones de proyecto o de servicio de ésta, sin realizar cambios sistemáticos de ningún elemento de la estructura de soporte de la vía.

Mantenimiento.- Conjunto de operaciones de conservación y renovación que se realizan diariamente sobre la vía para mantener las condiciones de servicio.

Renovación.- Operación por la que se sustituye sistemáticamente uno o varios elementos de la estructura de soporte de la vía.

## ANEJO 2

## DETERMINACIÓN DEL TRÁFICO

Para la caracterización del tráfico que soporta una línea se utiliza el concepto de "Tráfico medio diario equivalente". El Tráfico medio diario equivalente (Te) es un tráfico ficticio que se obtiene a través de la suma de los tráficos de pasajeros y mercancías, ponderados en función de su mayor o menor agresividad sobre la vía. Se puede calcular mediante la aplicación de la siguiente fórmula de origen teórico-experimental:

$$Te = Sv \cdot (Tv + 1,4 \cdot Ttv) + Sm \cdot (Km \cdot Tm + 1,4 \cdot Ttm)$$

siendo:

- Te: Tráfico medio diario equivalente (t / día).
- Tv: Tonelaje (cargas acumuladas) medio diario de vehículos remolcados de viajeros (TBR/día).<sup>(\*)</sup>
- Tm: Tonelaje medio diario de vehículos remolcados de mercancías (TBR / día).
- Ttv: Tonelaje medio diario de vehículos de tracción en trenes de viajeros (t/día).<sup>(\*)</sup>
- Ttm: Tonelaje medio diario de vehículos de tracción en trenes de mercancías (t/día)
- Km: 1,15 (valor normal).  
1,30 (tráfico con más del 50% de ejes de 20 t o más del 25% de ejes de 22,5 t).  
1,45 (tráfico con más del 75% de ejes de 20 t o más del 50% de ejes de 22,5 t).
- Sv: Factor corrector por velocidad de los trenes de viajeros. Se determina entrando en la tabla siguiente, con la velocidad del tren de viajeros más rápido.
- Sm: Factor corrector por velocidad de los trenes de mercancías. Se determina entrando en la tabla siguiente, con la velocidad de los trenes de mercancías ordinarios ( $V \leq 130$  km/h).

Tabla 6

V (km/h)	Sv	Sm
$V \leq 60$	1,00	1,00
$60 < V \leq 80$	1,05	1,05
$80 < V \leq 100$	1,15	1,15
$100 < V \leq 130$	1,25	1,25
$130 < V \leq 160$	1,35	---
$160 < V \leq 200$	1,40	---
$200 < V \leq 250$	1,45	---
$V > 250$	1,50	---

<sup>(\*)</sup> El tonelaje de los automotores de viajeros cuya carga por eje sea  $\leq 17$  t se incluye en Tv. Si es  $> 17$  t se incluye en Ttv.

## ANEJO 3

## OTROS MATERIALES DE SUBBASE

La posible utilización como capas de asiento ferroviarias de otros materiales diferentes de los granulares indicados en el *Pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios. PF-7 – SUBBALASTO* estará sujeta a las siguientes condiciones:

1). Cumplirán todas las siguientes funciones exigidas al subbalasto:

Ser soporte de la capa de balasto sin degradación y sin contaminación del mismo.

Transmitir las cargas a la plataforma.

Permeabilidad vertical limitada

Efecto filtro frente a los finos sobre plataformas constituidas por material QS1 y QS2.

Insensibilidad a la helada (en su caso).

2). Sus características físicas, químicas, mecánicas y funcionales serán estables a lo largo de la vida útil exigible a la infraestructura ( 100 años) frente a las acciones a soportar:

Tráfico ferroviario.

Interacción con el entorno geológico y químico.

Ambientales (humedad, temperatura,...)

3). Las deformaciones de la capa de estos materiales bajo las solicitaciones no resultarán significativas.

4). No se modificará con estas capas la rigidez vertical de la vía ni se provocarán heterogeneidades de esa rigidez en sentido longitudinal.

El dimensionamiento del espesor de la capa podrá realizarse mediante cálculos numéricos o procedimientos experimentales comprobándose, en todo caso, que las tensiones originadas en la plataforma por las cargas del tráfico ferroviario no superan las correspondientes a las que ocasionaría la capa equivalente de subbalasto.

## ANEJO 4

## ESPESOR DE PROTECCIÓN FRENTE A LA HELADA

Los parámetros más importantes de los que depende la penetración de la helada, con los que se calcula el espesor de protección, son:

- El índice de helada.
- La temperatura media anual invernal

Índice de helada

Se llama temperatura (atmosférica) media diaria a la media aritmética entre las temperaturas máximas y mínimas durante un día. Se toman a 2 m de altura del suelo.

Se considera el primer día con temperatura media  $< 0$  °C. A cada día sucesivo  $j$  se le asigna el valor:

$$H_j = \sum_{n=1}^j T_n$$

donde  $T_n$  es la temperatura media diaria, en °C, del día  $n$ .  $H_j$  representa la integral con relación al tiempo de las temperaturas medias expresadas en °C · día

Así se obtiene una sucesión  $H_j$ . Si es  $p$  el último día en que  $H_p \leq 0$  °C · día, al periodo de  $p$  días se le llama periodo de helada.

Se llama índice de helada (de ese periodo de helada),  $I = -\min(H_j)$

Ejemplo

Día (j)	1	2	3	4	5	6	7
$T_n$ (°C)	-10	-5	0	2	3	10	2
$H_j$ (°C · día)	-10	-15	-15	-13	-10	0	2

Periodo de helada = 6 días

Índice de helada,  $I = -(-15) = 15$  °C · día

Para un intervalo de tiempo, por ejemplo un año, que contiene uno o varios periodos de helada completos, el índice de helada que le corresponde es el mayor índice de helada de los diferentes periodos de ese intervalo.

Temperatura media anual invernal.

Para un lugar, la temperatura media anual invernal,  $T_N$ , correspondiente al año  $N$ , se define como la media aritmética de las temperaturas medias diarias en el intervalo comprendido entre el 1 de julio del año  $N-1$  y el 30 de junio del año  $N$ .

#### Invierno de referencia.

En un lugar, es el invierno del año para el que el índice de helada es máximo, entendiéndose por invierno el periodo de tiempo definido en el apartado anterior.

En caso de más de un invierno con el mismo valor máximo del índice de helada, el invierno de referencia será aquel (aquellos) para el (los) que  $T_N$  es mínima.

En España en la determinación del invierno de referencia se tendrá en cuenta siempre el invierno 1962-63.

#### Espesor de protección frente a la helada

Las curvas de la figura 4 permiten determinar el espesor de protección frente a la helada, es decir el espesor de material insensible a la helada que es necesario disponer. Se toman los valores del índice de helada ( $I$ ) y de temperatura media anual invernal ( $T_N$ ) correspondientes al invierno de referencia. Estos valores pueden redondearse a números enteros.

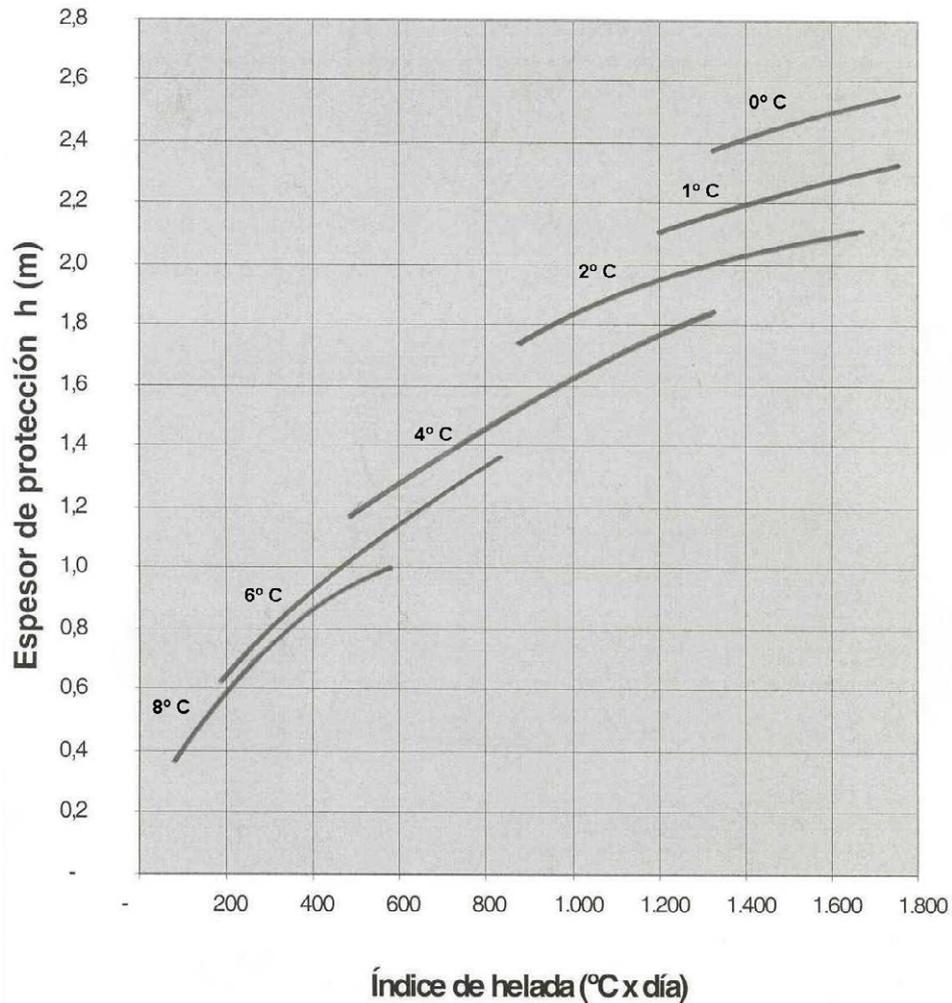
De esta manera se obtiene el espesor de protección frente a la helada, al cual hay que restarle el espesor de la base o banqueta de balasto, ya que este material es claramente insensible a la helada. Este último resultado, redondeado a múltiplos de 5 cm, será el espesor de material insensible a la helada que es necesario disponer.

#### NOTAS:

- Para el caso de  $T_N > 8$  °C se tomará la curva de  $T_N = 8$  °C
- En los puentes y obras de fábrica ha de considerarse la penetración de la helada a partir del intradós y paramentos.

En el caso de no disponer de los valores de  $I$  y  $T_N$  correspondientes al lugar en estudio se tomarán los datos de al menos 4 puestos de registro en el entorno y se interpolará linealmente en función de las coordenadas geográficas, o por mínimos cuadrados, en caso de ser más de 4 puntos.

FIGURA 4: Espesor de protección frente a la helada



- El valor de h es la suma del espesor total de la banqueta de balasto más el espesor del material insensible a la helada.
- Las curvas de la figura están dibujadas para seis valores de la temperaturas media anual invernal (0 °C, 1 °C, 2 °C, 4 °C, 6 °C y 8 °C). Entre estos valores se interpolará linealmente.

## ANEJO 5

### METODOLOGÍA PARA LOS ESTUDIOS E INVESTIGACIONES SOBRE LAS CAPAS EXISTENTES

#### 1) ESTUDIOS ESTADÍSTICOS DE OPERACIONES DE MANTENIMIENTO

El estudio estadístico de las operaciones de mantenimiento (conservación y renovación) requiere un control centralizado y unitario de todas las actuaciones llevadas a cabo, que se completa con las observaciones “in situ” (subidas de fangos, mal funcionamiento de los elementos de drenaje, etc.).

Entre dos renovaciones sucesivas, el coste de los trabajos de conservación del perfil no es constante, varía de forma monótona creciente. El coste depende fundamentalmente de la calidad de las cimentaciones (capas de asiento y plataforma) de la vía. Este fenómeno se pone de manifiesto en las diferencias constatadas en lo que se refiere a operaciones de conservación del perfil en secciones de idéntica antigüedad, igual armamento (carril, traviesas, placas de asiento y sujeciones) y con similares tráfico.

Para una categoría de tráfico en un trayecto determinado, es posible evaluar estadísticamente el número medio anual de intervenciones ( $I_m$ ) en el perfil en función de la antigüedad ( $N$ , en años) de la vía.

En una sección de vía concreta, el número de intervenciones ( $I$ ) para una antigüedad ( $N$ ), diferirá del valor medio ( $I_m$ ). A este respecto, resulta fácil definir el factor “K”, denominado coeficiente de conservación de asiento, como  $K = I/I_m$ . Este coeficiente vale, por definición,  $K = 1$  en el caso medio, pero puede alcanzar un valor de 10 (incluso más) en el caso de secciones sobre capas de asiento de capacidad portante muy mala.

La metodología seguida para los estudios de conservación de las capas de asiento en las líneas de mucho tráfico se puede conocer en cualquier momento con el uso del valor “K”. Con este valor y las observaciones efectuadas durante las visitas a la zona afectada (localización de áreas fangosas y turbosas, funcionamiento de los elementos de drenaje, etc.) se podrán establecer las decisiones a tomar en materia de conservación corriente, posibles operaciones localizadas y renovación. Todo ello viene recogido en la publicación “*Recomendaciones para el proyecto de plataformas ferroviarias*”, del Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes.

## 2) INVESTIGACIÓN SISTEMÁTICA DE CARÁCTER GEOTÉCNICO

### 2.1.- Planificación del reconocimiento

La planificación del estudio geotécnico de campo ha de considerar los dos aspectos siguientes:

1. Los trabajos han de ejecutarse normalmente sobre una vía en servicio con circulación de trenes.
2. Los parámetros geotécnicos y su grado de variación han de determinarse en una franja lineal de terreno recubierta con un cierto espesor de balasto y otros materiales.

El primer condicionante obliga a una serie de actuaciones previas a la realización del trabajo. En síntesis, los trámites necesarios son los siguientes:

- Obtención de permisos para la actuación sobre las vías.
- Aportación de un piloto de vía para cada tipo de trabajo.

El trabajo ha de efectuarse frecuentemente en horario nocturno, en fines de semana o con intervalos reducidos de corte de circulación. En ocasiones, puede ser necesario el corte total de la circulación de trenes y/o la interrupción del paso de energía eléctrica por la catenaria. Todo ello conduce a bajos rendimientos, en relación con los trabajos ejecutados fuera de la vía, y, consecuentemente, a un incremento en la duración de las campañas de reconocimiento, así como en su coste. Por otra parte, es frecuente la aparición de imprevistos originados por los cambios en las circulaciones, falta de disposición de pilotos de vía, no disponibilidad de los medios auxiliares necesarios, etc. Este cúmulo de circunstancias aconseja la planificación de la campaña con la debida antelación.

El segundo aspecto reseñado conduce a la necesidad de disponer de los siguientes equipos humanos y materiales :

- Medios auxiliares de transporte, capaces de desplazarse sobre la vía: (locomotoras, minitrén, diplotrys, vagonetas, etc.).
- Personal especializado para la conducción de los anteriores medios de transporte.

- Medios mecánicos o manuales para la ejecución de calicatas que permitan determinar y atravesar los materiales que se quiere reconocer.
- Maquinaria de reconocimiento y sistemas de ensayo capaces de funcionar sobre la vía, con los condicionantes de la presencia de la superestructura de la vía (balasto, traviesas y carril).
- Medios para la reposición rápida de la vía a su estado inicial (equipos de compactación, bateo, alineación, nivelación y perfilado)

En general, los procedimientos de reconocimiento y métodos de ensayo deberán ser de ejecución rápida, y capaces de obtener un volumen de datos suficiente para la caracterización de los parámetros de las distintas capas de material en los correspondientes tramos de vía.

## 2.2.- Parámetros a determinar.

Con independencia de los parámetros de identificación de los suelos (granulometría, límites, humedad, etc.), cuya obtención debe ser rutinaria, las características mecánicas de los materiales, a determinar, son las siguientes:

- Módulo de elasticidad..... E
- Coeficiente de Poisson.....  $\nu$
- Ángulo de rozamiento interno.....  $\phi$
- Cohesión efectiva..... c
- Densidad.....  $\gamma$

Los parámetros indicados se deducirán mediante ensayos de campo y laboratorio, bien directamente, o a través de correlaciones empíricas.

En caso de no disponerse de datos más precisos pueden tomarse los valores de referencia para balasto (B) y subbalasto (Sb) indicados en la tabla 7 siguiente.

Tabla 7

	E [MPa]	$\nu$	c [MPa]	$\phi$ [°]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Balasto	130	0,2	0	45	15
Subbalasto	120	0,3	0	35	19

Con independencia de lo anterior, es necesario conocer los parámetros de definición geométrica de la sección de vía, en especial los espesores de las distintas capas de asiento de la vía, del terraplén y/o los suelos naturales subyacentes.

## 2.3.- Técnicas de reconocimiento

### 2.3.1. Calicatas manuales o mecánicas

La calicata es una técnica de reconocimiento que consiste en la ejecución de una excavación, mecánica o manualmente, de dimensiones adecuadas para permitir el acceso a la zona que se desea reconocer, la toma de muestras en la misma y, en su caso, la ejecución de ensayos "in situ".

Habrà de adoptarse las precauciones necesarias para evitar el desprendimiento de las paredes, entibando si es preciso. En caso de lluvia la excavación deberá protegerse de las aguas de escorrentía.

Una vez efectuados el examen del terreno, la toma de muestras y, en su caso, los ensayos "in situ", se rellenará la excavación, apisonándose hasta conseguir la compactación original, controlando que la permeabilidad no supere los  $10^{-6}$  m/s (para la compactación obtenida). Es práctica habitual la mejora del material de relleno con la edición de un cierto porcentaje de cemento, no superior al 3% del peso de suelo, a fin de evitar la creación de un punto duro en la plataforma.

Se suele efectuar calicatas distanciadas regularmente con objeto de obtener un perfil continuo del material existente bajo la vía. El intervalo entre calicatas es función, lógicamente, de la homogeneidad y de la intensidad del reconocimiento a realizar.

La ejecución de calicatas permite el reconocimiento visual de la naturaleza y disposición de los distintos estratos atravesados. A partir de las muestras alteradas o inalteradas obtenidas, así como de los ensayos “in situ” realizados, puede deducirse, bien directamente o bien mediante correlaciones empíricas, todos o parte de los parámetros necesarios para el cálculo.

La calicata suele efectuarse en el borde de la banqueta de balasto, del terraplén, desmonte o terreno natural, comenzando por retirar el balasto existente entre dos traviesas, desde debajo del carril (hilo exterior en caso de doble vía) y hacia la arista de la explanación. Esta operación debe realizarse con la adecuada precaución, a fin de no descalzar las traviesas próximas. Otras veces, sin embargo, conviene efectuar la calicata en el eje de la vía.

Normalmente se diferencia el balasto limpio del contaminado y del subbalasto o capa equivalente (que en algunas zonas se denomina “machaca”). Inferiormente se sitúa el terraplén, si existe, y finalmente el terreno natural.

En los suelos se efectúa el ensayo de densidad “in situ” incluyendo humedad por el método de isótopos radiactivos, según *norma UNE 103 900*, y cada cierto número de catas (usualmente cada cuatro) se realiza además dicho ensayo por el método de la arena, según *UNE-103-503*. En caso de discrepancia importante, este último ensayo puede considerarse, en principio, como más representativo de la realidad del terreno.

En cada capa diferenciada se obtienen muestras de material para su ensayo en laboratorio. Puede distinguirse los tipos de muestra siguientes:

- Tipo I.- Mantiene inalteradas las propiedades mecánicas del terreno en su estado natural.
- Tipo II.- Mantiene inalteradas la humedad y densidad del terreno en su estado natural.
- Tipo III.- Mantiene inalterada la humedad del terreno en su estado natural.
- Tipo IV.- Mantiene inalterada únicamente la naturaleza del terreno.

De todas las capas se obtiene al menos una muestra de tipo III y/o de tipo IV.

La muestra tipo III consistirá en una cantidad del orden de 1 kg de suelo, para tamaños de partícula inferiores a 11 mm, o en otro caso la cantidad suficiente para que el terreno sea representativo. Se envasará inmediatamente después

de ser recogida en un recipiente impermeable, con cierre hermético y sin dejar cámara de aire, y se enviará al laboratorio a ser posible en un plazo máximo de 48 horas.

La muestra tipo IV se recoge en sacos de unos 50 kg, siempre que el volumen de material existente en la calicata lo permita. Esta cantidad de suelo resulta necesaria si se desea efectuar determinados ensayos, tales como el ensayo Proctor o el ensayo C.B.R.

Las muestras tipo I o II se obtienen por tallado de un bloque de terreno con dimensiones mínimas de 20 cm x 20 cm x 20 cm, en el fondo o en los laterales de la calicata. El tallado de estas muestras, su extracción y posterior manipulación, son operaciones delicadas, de cuya adecuada ejecución depende la calidad de la muestra obtenida. Una vez extraída la muestra, debe ser parafinada de forma inmediata. Para ello debe reforzarse la parafina con algún material que evite el que se descascarille. Suelen darse tres capas de parafina, con dos de venda de malla abierta, intercaladas. Ha de procurarse que las caras de la muestra sean lo más planas posible, a fin de evitar oquedades que formen cámaras de aire bajo la parafina. Habrá de señalizarse adecuadamente cuál es la parte superior y cuál la inferior de la muestra. Para su transporte es conveniente introducirla en un recipiente rígido y rodearla de un material que amortigüe los posibles golpes. Un procedimiento alternativo, cuando las dificultades de tallado en campo o laboratorio lo aconsejen, consiste en la introducción en el terreno de un tubo de unos 12 cm a 15 cm de diámetro y altura similar, con su borde inferior biselado. Para ello se simultanea el empuje o golpeo suave en su parte superior, con la excavación del suelo situado alrededor del tubo. Una vez obtenida la muestra, se parafinan sus partes inferior y superior. La posterior extracción y tallado de probetas para su ensayo en el laboratorio se realiza con ayuda de aparatos extractores adecuados.

La calificación de la muestra como de tipo I o II dependerá del tipo de material existente, así como de la alteración introducida durante el proceso de extracción y posterior manipulación de la misma, hasta su ensayo en el laboratorio.

La ejecución de calicatas es el método más sencillo y directo para reconocer las capas de asiento de la vía y la parte superior del terraplén o terreno natural, por lo que su empleo carece de limitaciones.

Cada calicata debe completarse con un croquis acotado y con la descripción de las características y dimensiones de las capas atravesadas. Las cotas verticales suelen referenciarse respecto a la cara superior de la traviesa. Debe anotarse, al menos, los puntos siguientes:

- Número de calicata.
- Croquis de situación respecto a la vía. Punto kilométrico de la vía.
- Cotas de origen y fondo de las calicatas.
- Fecha de comienzo y fin de la calicata.
- Método o métodos de excavación.
- Dimensiones de la calicata.
- Corte estratigráfico, efectuado por el técnico responsable, con definición visual de las capas y espesor de las mismas, así como observaciones sobre su inclinación, irregularidades, etc.
- Posición del nivel de agua.
- Indicación de los niveles en que se ha efectuado ensayos "in situ".

Finalmente se incluirá una fotografía de la excavación, con un cartel identificativo de la calicata y una mira topográfica de referencia para la comprobación de espesores.

### 2.3.2. Ensayos de penetración dinámica

Mediante esta prueba se determina la resistencia del terreno a la penetración de una puntaza metálica, situada en el extremo de un varillaje, que es golpeado según un procedimiento establecido.

Su utilización permite evaluar la compacidad de un suelo granular, si bien la existencia de partículas de tamaño grueso (> 6 cm) puede obstaculizar la penetración del cono, lo cual distorsionaría los resultados del ensayo, de forma que éstos no serían representativos.

En cualquier caso, el análisis del perfil de penetración proporciona información sobre la homogeneidad o anomalías de una capa de suelo. Igualmente resulta de utilidad el ensayo cuando se desea comprobar la situación en profundidad de una determinada capa (ej.: rellenos artificiales), cuya existencia se conoce.

Este ensayo no posibilita la extracción de muestras del terreno, por lo que habrá de efectuarse en combinación con otros reconocimientos, mediante calicatas o sondeos, que permitan la identificación de las capas de suelo existentes en el área investigada.

El ensayo de penetración más habitual, por su ligereza y facilidad de adaptación, es el que utiliza el equipo Borros. Este ensayo se rige por *la Norma UNE 103809*. Según dicha Norma las puntazas utilizables son las siguientes:

## Sección cuadrada

- Dimensión de la sección (mm)	40x 40
- Ángulo en la punta	90°
- Longitud del vástago (mm)	200

La masa de la maza es 65 kg y la altura de caída es de 500 mm. El varillaje tiene un diámetro de 32 mm y una masa de seis coma tres kilogramos por metro de longitud (6,3 kg/m).

Este ensayo presenta dificultades, como se ha indicado anteriormente, para atravesar partículas de cierto tamaño o compacidad, por lo que se pretende sustituirlo por el Ensayo de Penetración Dinámica Superpesada (D.P.S.H.), cuya ejecución viene regulada por la *norma UNE-EN ISO 22476-2*. La sección de la puntaza en este ensayo es circular, con un área nominal de 20 cm<sup>2</sup> en DPSH-B y 16 cm<sup>2</sup> en DPSH-A, terminada en forma cónica, con un ángulo en el vértice de 90°. La masa de la maza es de 63,5 ± 0,5 kg, y la altura de caída es de 750 ± 20 mm en DPSH-B y 500±10 mm en DPSH-A. El diámetro del varillaje es de 35mm en DPSH-B y 32 mm en DPSH-A.

La resistencia del terreno a la penetración dinámica se expresa generalmente por los golpes necesarios para hincar la puntaza 20 cm, N<sub>20</sub>, ó 10 cm, N<sub>10</sub>. El intervalo normal de operación en término de golpes debería estar entre N<sub>20</sub> = 5 y N<sub>20</sub> = 100. En general se debe detener el ensayo cuando el número de golpes excede dos veces los valores máximos citados anteriormente o se excede el valor máximo continuamente durante 1 m de penetración.

El ensayo se efectúa normalmente entre dos traviesas en el centro de la vía, hasta alcanzar el "rechazo". No obstante, se recomienda una longitud mínima de reconocimiento de unos 5m.

Previamente a la ejecución del ensayo es necesario atravesar la capa de balasto mediante una tubería de hierro o P.V.C., con su base apoyada en el subbalasto o capa subyacente al balasto. Deberá anotarse la longitud del tubo y todas las cotas del ensayo a partir del nivel de referencia de cotas (normalmente la cara superior de la traviesa).

En cada punto de reconocimiento ha de efectuarse un croquis que incluya, al menos, las dimensiones de la sección de plataforma y vía, referencia de la línea, tramo de línea, punto kilométrico, vía (derecha o izquierda), sentido de vía y referencia exacta de localización del ensayo.

De cada prueba realizada se presentará un gráfico de profundidad de penetración-número de golpes, según el modelo solicitado en la *norma UNE-EN ISO 22476-2*, con los datos solicitados en la misma.

La utilización de correlaciones empíricas permite obtener determinados parámetros resistentes del terreno, tales como el módulo de elasticidad  $E$  o el ángulo de rozamiento interno  $\varphi$ . Lógicamente la validez de estos parámetros viene relacionada con la de las correlaciones empíricas utilizadas. En este sentido, es conveniente hacer coincidir algunas de estas penetraciones dinámicas con puntos en que se vaya a efectuar ensayos con placa de carga, lo cual permitiría obtener las adecuadas correlaciones empíricas entre los resultados de ambos ensayos.

### 2.3.3. Ensayo de carga con placa

Este ensayo permite la determinación directa del módulo de compresibilidad de las capas de la plataforma y capas de asiento de la vía. No obstante, su ejecución presenta cierta complicación derivada del tiempo y medios necesarios, no siempre disponibles cuando se desea efectuar el ensayo en vías con circulación de trenes.

El ensayo determina el módulo de compresibilidad bajo la placa, en una profundidad del orden de dos a tres veces el diámetro de la misma. En el caso de no poderse asumir la hipótesis de continuidad en profundidad de las características de deformación del terreno, será preciso efectuar el ensayo a diferentes niveles.

Deberán preverse los aspectos siguientes:

- Corte de la circulación durante el periodo de ejecución del ensayo.
- Disposición de pilotos de vigilancia de vía.
- Tipo de elemento utilizado como reacción de las cargas del ensayo (locomotora, minitrén, vagoneta, etc.).
- Disposición de personal calificado para la conducción del material móvil sobre la vía.
- Diámetro máximo de las partículas del suelo, a fin de fijar el diámetro equivalente de la placa de ensayo. Se considera diámetro equivalente al del círculo de igual superficie que la placa de ensayo.

El ensayo se realiza normalmente en el centro de la caja de la vía, entre dos traviesas consecutivas. Previamente habrá de ser extraído el material existente sobre el nivel en que se desea efectuar el ensayo, a la vez que se entiba convenientemente la excavación. Normalmente ese nivel es el de la capa

superior del suelo que constituye la plataforma. A fin de realizar el ensayo en condiciones próximas a las del comportamiento del terreno húmedo, previamente a la realización del ensayo (con el tiempo suficiente para permitir la penetración del agua), se aportará la cantidad necesaria de ésta para conseguir un grado de humedad próximo al previsible en las condiciones más desfavorables.

El ensayo se realizará según *la norma española UNE 103808*, que consiste en realizar un primer ciclo de carga, una descarga y un segundo ciclo de carga, utilizando una placa de 300 mm de diámetro.

Los módulos de deformación vertical ( $E_v$ ) se calculan por medio de la curva cargas-asientos del primer ciclo de carga y del segundo ciclo de carga, a partir de la inclinación de la secante entre los puntos  $0,3\sigma_{m\acute{a}x}$  y  $0,7\sigma_{m\acute{a}x}$  mediante la expresión siguiente:

$$E_v = 1,5r \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \quad [ \text{MPa} ]$$

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$$

$$\Delta s = s_2 - s_1$$

siendo:

$\sigma_1$  Tensión normal media bajo la placa, para  $0,3\sigma_{m\acute{a}x}$ . [ MPa ].

$s_1$  Asentamiento medio de la placa correspondiente a la presión anterior (mm).

$\sigma_2$  Tensión normal media bajo la placa para  $0,7\sigma_{m\acute{a}x}$ . [ MPa ].

$s_2$  Asentamiento medio de la placa correspondiente a la presión anterior (mm).

$r$  Radio de la placa de carga (mm).

El módulo de deformación del primer ciclo se identifica con el subíndice 1 ( $E_{v1}$ ), y el del segundo ciclo con el subíndice 2 ( $E_{v2}$ ).

La curva del segundo ciclo se aproxima mucho más a una recta, lo que hace más segura la determinación de  $E_{v2}$ . La relación  $E_{v2}/E_{v1}$  es un índice de la compactación recibida por el suelo en el primer ciclo de carga. Un valor elevado, en general superior a 2,2, indicará insuficiente compactación inicial, motivada por un módulo  $E_{v1}$  reducido.

Si  $E_{v2}/E_{v1} > 2,2$  se adoptará el  $E_{v1}$  del primer ciclo como valor representativo.

Tras la realización del ensayo se procederá a la extracción de una muestra alterada en saco del material existente bajo la placa (Tipo IV).

En una zona lo más próxima posible a la ubicación del ensayo, pero no afectada por las cargas de éste, se determinará la densidad "in situ" del terreno.

Finalmente deberá rellenarse una ficha-tipo del ensayo, que incluya un croquis del ensayo, cotas, punto kilométrico, línea de ferrocarril, tramo, definición visual del terreno, fotografía, resultado del ensayo y observaciones.

#### 2.3.4. Sondeos mecánicos

Los condicionantes de tiempo, gálibo, económicos, etc, desaconsejan, normalmente, la utilización de este tipo de reconocimientos en la investigación de plataformas ferroviarias existentes. No obstante es factible investigar mediante sondeos el material constitutivo de los terraplenes, así como su terreno de apoyo, siempre que la ubicación de la sonda pueda efectuarse de forma que no interfiera el tráfico ferroviario.

#### 2.3.5. Ensayos de laboratorio

Las muestras inalteradas y alteradas obtenidas se ensayarán en laboratorio. Los ensayos que habitualmente se realizan son los siguientes:

.Preparación de muestras para ensayos de suelos .....	UNE 103-100
.Humedad natural de un suelo .....	UNE 103-300
.Densidad seca de un suelo.....	UNE 103-301
. Análisis granulométrico de suelos por tamizado .....	UNE 103-101
.Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación ....	UNE 103-102

.Peso específico de las partículas de un suelo .....	UNE 103-302
.Determinación del límite líquido de un suelo .....	UNE 103-103
. Determinación del límite plástico de un suelo .....	UNE 103-104
. Ensayo de compactación Proctor Normal .....	UNE 103-500
. Ensayo de compactación Proctor Modificado .....	UNE 103-501
. Determinación del índice C.B.R. en laboratorio .....	UNE 103-502
.Carbonatos en suelos .....	UNE 103-200
. Sulfatos solubles en suelos .....	UNE 103-201
. Determinación del contenido de materia orgánica de un suelo	UNE 103-204

Sobre muestras de balasto, puede ser conveniente efectuar algunos de los ensayos siguientes:

. Ensayo del Coeficiente Los Ángeles .....	UNE-EN 1097-2
. Ensayos sobre balasto .....	PPTG materiales ferroviarios PF-6. BALASTO

La dirección facultativa puede solicitar la información adicional que proporcionan los ensayos siguientes, a efectuar sobre muestras inalteradas:

. Ensayo de compresión simple en probetas de suelo .....	UNE 103-400
. Determinación de las características al esfuerzo cortante de un suelo en el equipo de corte directo .....	UNE 103-401
. Determinación de los parámetros resistentes de un suelo en el equipo triaxial .....	UNE 103-402
. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en el edómetro.....	UNE 103-405

## ANEJO 6

## NORMAS RELACIONADAS

TÍTULO	CÓDIGO
Ficha UIC 714-R, 2008	
Ensayo de penetración dinámica tipo Borro.	UNE 103809: 2010
Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa estática.	UNE 103808: 2006
Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 2: Ensayo de penetración dinámica.	UNE-EN-ISO 22476-2:2008
Preparación de muestras para ensayos de suelos.	UNE 103-100: 1995
Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.	UNE 103-300: 1993
Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática.	UNE 103-301: 1994
Análisis granulométrico de suelos por tamizado.	UNE 103-101: 1995
Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.	UNE 103-102: 1995
Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.	UNE 103-302: 1994
Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de casagrande.	UNE 103-103: 1994
Determinación del límite plástico de un suelo	UNE 103-104: 1993
Geotecnia. Ensayo de compactación Proctor normal.	UNE 103-500: 1994
Geotecnia. Ensayo de compactación Proctor modificado.	UNE 103-501: 1994
Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo.	UNE 103-502: 1995

Determinación del contenido de carbonatos en los suelos	UNE 103-200: 1993
Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo.	UNE 103-201: 1996
Determinación del contenido de sales solubles de un suelo.	UNE 103205:2006
Determinación del contenido de yeso soluble de un suelo	UNE 103 206:2006
Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.	UNE 103-204: 1993
Ensayo de colapso en suelos.	UNE 103406:2006
Ensayo de hinchamiento libre de un suelo en edómetro.	UNE 103 601:1996
Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Método para la determinación de la resistencia a la fragmentación.	UNE-EN 1097-2: 2010
Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo.	UNE 103-400: 1993
Determinación "in situ" de la densidad de un suelo por el método de la arena	UNE 103 503: 1995
Determinación in situ de la densidad y de la humedad de suelos y materiales granulares por métodos nucleares: pequeñas profundidades.	UNE 103 900:2013
Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval).	UNE-EN 1097-1:2011
Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo	UNE 103-401: 1998
Determinación de los parámetros resistentes de una muestra de suelo en el equipo triaxial.	UNE 103-402: 1998
Geotecnia, Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro.	UNE 103-405: 1994