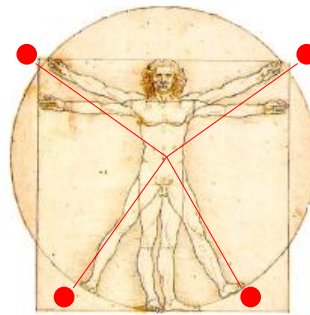


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XV. AÑO 2017

SEPARATA



EXPERIENCIA FRANCESA EN EMPLEO DE SUBBALASTO BITUMINOSO

Jesús Fernández de Puelles de Torres-Solanot, David Martín Ruiz



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO

Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Jesús Fernández de Puellas de Torres-Solanot, David Martín Ruiz
Marzo, 2017.

<http://www.uax.es/publicacion/experiencia-francesa-en-empleo-de-subbalasto-bituminoso.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

EXPERIENCIA FRANCESA EN EMPLEO DE SUBBALASTO BITUMINOSO

Jesús Fernández de Puelles de Torres-Solanot (a), David Martín Ruiz (b)

- (a) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Escuela Politécnica Superior. Área de Ingeniería Civil. Tlf: 918105001, email: jferndet@uax.es
- (b) Dr. por la Universidad Alfonso X El Sabio. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Escuela Politécnica Superior. Área de Ingeniería Civil. Tlf: 918105087, email: druizmar@uax.es

RESUMEN:

Francia ha sido tradicionalmente el país europeo pionero en materia de alta velocidad ferroviaria. Como tal, posee una gran experiencia en la ejecución y explotación de líneas ferroviarias de altas prestaciones, y sigue manteniendo un espíritu innovador y de liderazgo en cuanto al diseño de la plataforma ferroviaria. Con el pasar de los años desde la apertura de la Paris-Lyon, la SNCF ha buscado una optimización de la sección estructural basada en la experiencia y en las dificultades cada vez mayores para conseguir materiales granulares de buena calidad (recursos escasos a preservar, transportes largos y costosos, dificultades de puesta en obra...), proponiendo de esta manera una sección alternativa adaptada al actual contexto energético y de recursos. Los estudios y tramos reales construidos a modo de ensayo no dejan lugar a dudas, con las secciones en subbalasto bituminoso, además de mejorarse el comportamiento dinámico de la vía y su durabilidad, también se consigue una reducción de espesor de la capa de subbalasto, pasando de 20 cm de espesor de subbalasto granular a 10,5 cm de subbalasto bituminoso, con dos riegos adicionales de betún. Se produce asimismo un ahorro en la sección de capa de forma que pasa de tener 50 cm a 20cm produciéndose un ahorro total de material de casi 40 cm lo que se traduce en aproximadamente 5.000 m³ por kilómetro de vía. Estos ahorros en volumen de material repercuten también directamente en un ahorro del consumo energético y de emisiones para la construcción de líneas con sección con subbalasto bituminoso.

PALABRAS CLAVE:

Vía, Fatiga, Subbalasto bituminoso, Mercancías..

ABSTRACT:

France has traditionally been the European country pioneer in railway high speed. As such, she has extensive experience in the implementation and operation of high performance railway lines, and continues to maintain an innovative and leadership spirit in the design of the railway platform. Over the years since the opening of the Paris-Lyon, the SNCF has sought an optimization of the structural section based on the experience and the increasing difficulties for obtaining granular materials of good quality (scarce resources to preserve, costly transport, difficulties of placing ...), thus proposing a section adapted to the current energy and resources context.

Studies and actual sections built on trial leave no doubt, with sections on bituminous sub-ballast, plus improved dynamic behaviour of the track and its durability, reduced thickness of the sub-ballast layer is also achieved, from 20 cm thick granular sub-ballast to 10.5 cm of bituminous sub-ballast, with two additional bitumen irrigations. Savings are also produced in the track bed layer that goes from having 50 cm to 20 cm resulting in a total savings of almost 40 cm material which translates to approximately 5,000 m³ per kilometre of track. These savings in material volume also directly affect savings in energy consumption and emissions for the construction of lines with bituminous sub-ballast section.

KEY-WORDS:

Track, Fatigue, Bituminous sub-ballast, Freight

SUMARIO:

1. Introducción, 2. Experiencia internacional, 3. Experiencia en Francia, 4. Conclusiones, 5. Bibliografía citada

1. Introducción

Durante los últimos años se ha puesto de manifiesto un interés por realizar infraestructuras ferroviarias de altas prestaciones con unos costes de mantenimiento a largo plazo reducidos que contribuyan a la sostenibilidad de las mismas. Actualmente se está realizando un esfuerzo por incrementar las cargas de material rodante hacia altas cargas por eje y también en particular por aumentar el número de líneas de alta velocidad y su capacidad.

Dentro de estas tendencias se están presentando avances en el diseño estructural de plataformas ferroviarias basados en el empleo de subbalasto bituminoso en vez de la solución tradicional basada en una capa de subbalasto granular. Estos trabajos se centran en una reducción del coste del ciclo de vida LCC de la infraestructura ferroviaria.

Por otro lado, las necesidades de material con las exigencias requeridas para el subbalasto inciden directamente en costes elevados debido a las distancias de transporte que en algunos casos superan los 70-80 km. Adicionalmente los requerimientos ambientales inciden en el concepto de sostenibilidad y por tanto soluciones constructivas mantenibles y fiables son un referente claro en el sector ferroviario.

2. Experiencia Internacional

Existen varios casos notables de experiencia internacional en el empleo de subbalasto bituminoso, tanto en algunas líneas en servicio como en tramos de prueba y ensayos experimentales. Hasta el momento, la mayoría de pruebas se han realizado para cargas por eje ligeras, propias de líneas de Alta Velocidad o de tráfico mixto, pero en algunos países, principalmente EEUU, sí se han orientado también a tráficos de alta carga por eje.

En Estados Unidos se cuenta con la experiencia del TTIC *Transportation Technology Center* donde se ejecutó un tramo de pruebas a escala real en 1999 con dos tramos de aproximadamente 100 metros con unos espesores de capas asfálticas de 8 y 12 cm sobre un suelo arcilloso de mala calidad portante. Anteriormente en los años 60 la compañía Santa Fe Railways construyó tramos experimentales de 6,3 cm, 12,7 cm y 19 cm en Nuevo México entrando en servicio dichos tramos en 1969.

En todos los casos el análisis de muestras del subbalasto bituminoso puso de manifiesto un envejecimiento muy reducido del mismo.

Actualmente en Estados Unidos se utiliza el subbalasto bituminoso en líneas en explotación y se plantea como una alternativa para líneas de alta velocidad en proyecto, si bien las cargas del material rodante son más elevadas que en Europa.

Uno de los proyectos más relevantes es la línea este de Amarillo (Texas), de alta velocidad, alta capacidad y alta carga de BNSF Railway “*Transon*”, en donde se especifica un diseño con subbalasto bituminoso de 10 cm que se apoya en una base granular de 15 cm con 30 cm de balasto (travesía de hormigón y carril de 60 kg/cm).

En otros países, como en las líneas con balasto de Alta Velocidad en Japón y en líneas convencionales en Suiza, se utilizan capas asfálticas de menor espesor (6 cm) en donde una de las principales funciones es la de mantener las condiciones de humedad de la plataforma a largo plazo.

Actualmente se están analizando tramos de ensayos tanto en Francia en la LGV Este como en tramos de las Líneas de Alta Velocidad en España (LAV Madrid – Valladolid y LAV Barcelona – Frontera Francesa).

3. Experiencia en Francia

3.1. *Criterios de diseño*

La SNCF francesa adoptó desde la década de los 80 una sección tipo de subbalasto granular, cuyo dimensionamiento frente a las cargas define un espesor global de las capas de asiento (balasto y subbalasto) que depende de:

- El suelo de soporte en plataforma:
 - Naturaleza geotécnica.
 - Estado hidráulico y sensibilidad al agua.
 - Condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.
- De la capacidad portante deseada (ver figura 1).

- Del tráfico.
- Del armamento de vía.

InfraIngenierie de SNCF define 4 clases de suelo de soporte en plataforma:

- S0: Suelo impropio para la construcción (Ej. turbas, arcillas flojas). Se aborda su sustitución o tratamiento.
- S1: Suelo de calidad mediocre (Ej. arcillas compactas).
- S2: Suelo de calidad media (Ej. arenas).
- S3: Suelo de calidad buena (Ej. gravas)

Sol	Classe de portance		
	P1	P2	P3
S0	30 MPa	50 MPa	80 MPa
traitement			
S1		CdF R+3 - 35 cm	CdF R+3 - 50 cm
S2			CdF R+3 - 35 cm
S3			

Figura 1: Clase de capacidad portante deseada y capas de forma necesarias en cada caso (Fuente: SNCF y Robinet et al. 2011).

La fórmula para dimensionar el espesor de conjunto queda en función de los siguientes factores:

$$e = E + a + b + c + d + f + g$$

E espesor nominal: 0,70 m plataforma P1
0,55 m plataforma P2
0,45 m plataforma P3

a: grupo UIC.

b: armamento (travesía).

c: dimensionamiento normal o excepcional.

d: carga por eje.

f: velocidad.

g: geotextil.

3.1.1. Configuración estructural en secciones con subbalasto granular

De esta manera, en la figura 2 y en la figura 3 se aprecian las diferentes estructuras más habituales que se manejan en función de los diferentes tipos de suelo:

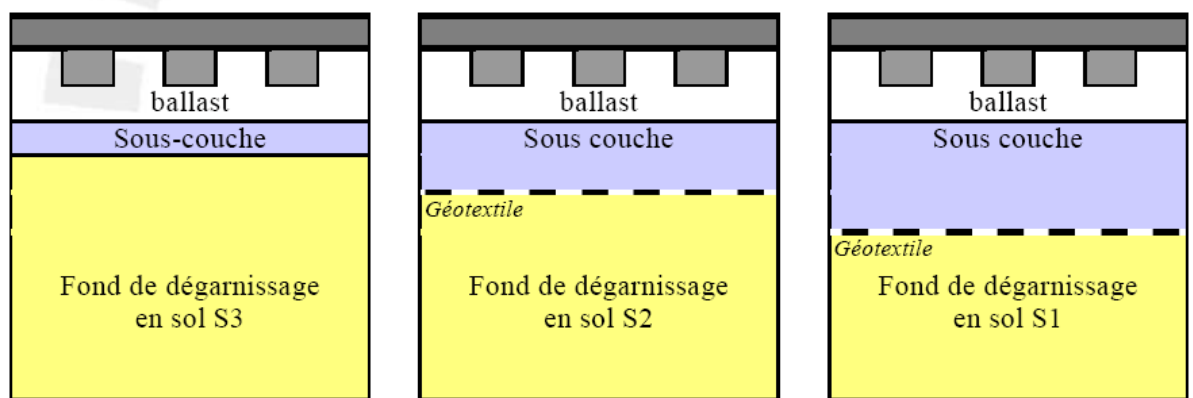


Figura 2: Estructuras normales con espesor de subbalasto en función del tipo de suelo (Fuente: SNCF y Robinet et al. 2011).

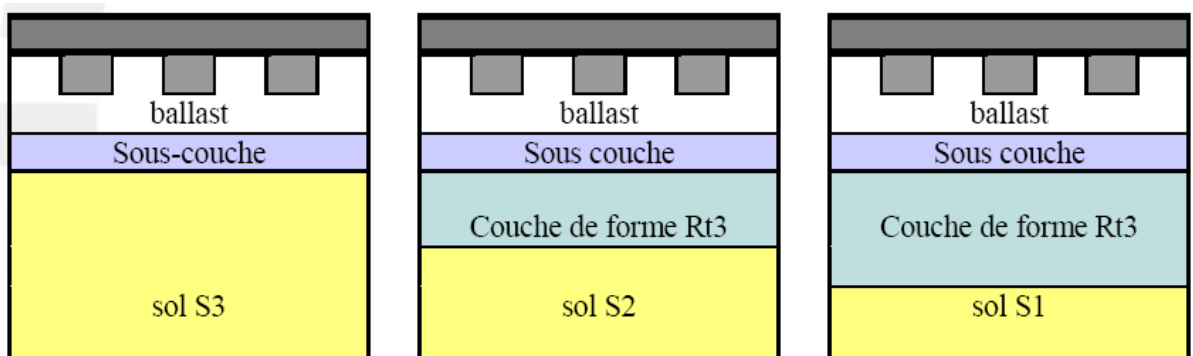


Figura 3: Estructuras con capa de forma interpuesta entre el suelo y el sub-balasto -de espesor constante, en este caso- (Fuente: SNCF y Robinet et al. 2011)

Suelo	Plataforma	Balasto (cm)	Sub-balasto (cm)	Geotextil	Capa de forma (cm)
S1	P1	35	55	Sí	Integrada
	P3	35	20		50
S2	P2	35	35	Sí	Integrada
	P3	35	20		35
S3	P3	35	20		Integrada

Tabla 1: Tabla de dimensionamiento de las LGV francesas (Fuente: SNCF y Robinet et al. 2011)

Así, la sección francesa está compuesta primeramente por una capa de balasto con espesor de 30 centímetros, seguida de una capa de subbalasto granular de espesor 20 centímetros y gradación 0/31,5), dotada de un bombeo para facilitar la evacuación de aguas del 4%, que a su vez descansa sobre una capa de forma con espesores comprendidos entre 35 y 50 cm, compuesta por gravas sin tratar.

La capacidad portante mínima exigida a la capa de forma en su superficie es de $E_{v2}=80\text{Mpa}$. Esta capa de forma en coronación de la plataforma se denomina PST (Parties supérieures de 70 terrassement) y se compone de rocas calizas tratadas con cemento para asegurar una mínima capacidad portante de al menos 50 Mpa, tanto en desmonte (espesor 35 centímetros) como en terraplén (espesor 70 centímetros). Esta sección estructural empleada en Francia se puede ver en la figura 4, observándose la tradicional capa de subbalasto granular.

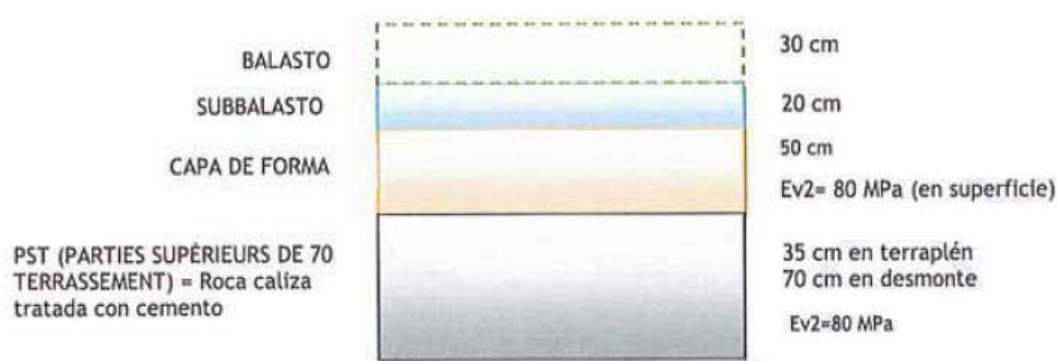


Figura.4: Sección estructural de subbalasto granular adoptada en Francia (Fuente ADIF)

Con el transcurso de los años y la experiencia, se ha ido evolucionando en algunos aspectos para cada nueva apertura de líneas LGV francesas (ver Figura 5 y Figura 6):

- LGV *Atlantique*: Tratamientos con cal de la PST.
- LGV *Nord*: Mejora de las especificaciones técnicas de los agregados y la reducción del espesor de las capas.
- LGV *Est*: Capas de forma con materiales tratados.
- LGV *Est*: Asignación de una capacidad portante de referencia para cada tipo de plataforma.

Fiche n° 1 : Sous-couche pour couche "sous-ballast"

		lignes parcourues à grandes vitesses V > 160 km/h	autres lignes
désignation		Grave 0 / 31,5 bien graduée	
Caractéristiques intrinsèques			
résistance LA+MDE		<= 40	<= 50
Caractéristiques complémentaires			
angularité		>= 95 sec. (sur fraction 6,3/10)	
forme	A	<= 25	
propreté	Vbg	<= 1	
compacité		>= 82 %	>= 80 %
sensibilité au gel		non gélif	
granulats artificiels		[3]	

Figura. 5: Ficha de caracterización del subbalasto granular -compactado al 100%- de la SNCF (Fuente: SNCF)

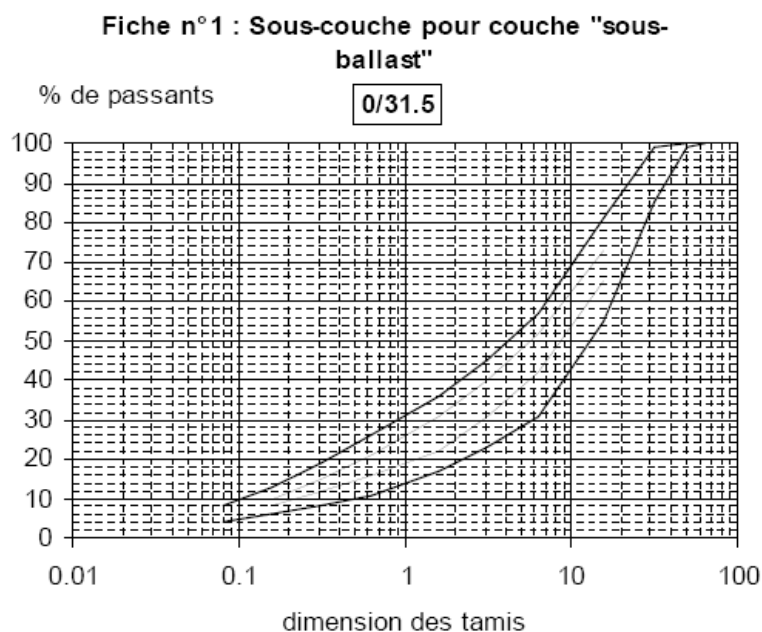


Figura. 6: Ficha de caracterización del subbalasto granular de la SNCF. Huso granulométrico de tamices (Fuente: SNCF)

3.1.2. Configuración estructural en sección con subbalasto bituminoso

Sin embargo, conforme ha ido pasando el tiempo, la SNCF ha buscado una optimización de la sección basada en la experiencia y en las dificultades cada vez mayores para conseguir materiales granulares de buena calidad (recursos escasos a preservar, transportes largos y costosos, dificultades de puesta en obra...), proponiendo de esta manera una sección alternativa adaptada al actual contexto.

Así, para el departamento de InfraIngenierie de la SNCF, el interés de la estructura bituminosa radica en los siguientes puntos:

- Optimización del proyecto.
- Optimización del movimiento de tierras (reducción de estructuras).
- Facilitar la puesta e instalación del equipamiento ferroviario (puesta de vía, señalización, catenaria...).

- Optimización del coste de mantenimiento de la infraestructura ferroviaria (mejora de la estabilidad de la vía).

De este modo, para el dimensionamiento de la nueva sección se verificó el comportamiento frente a la fatiga para el efecto de una carga circulando sobre una capa triple (figura 7):

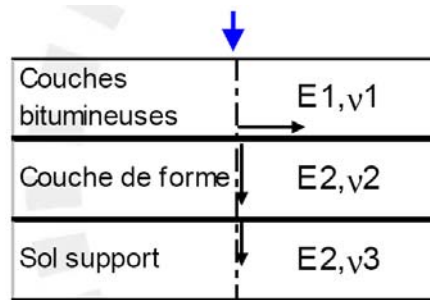


Figura 7: Esquema de actuación de cargas sobre triple capa (Fuente: Robinet et al. 2011)

Con el método de dimensionamiento mecánico de carreteras (Figura 8):

$$|\sigma_{calculada}| \leq \sigma_{admissible}$$

Materiales bituminosos

$$|\varepsilon_{calculada}| \leq \varepsilon_{admissible}$$

Materiales tratados con gigantes hidráulicos

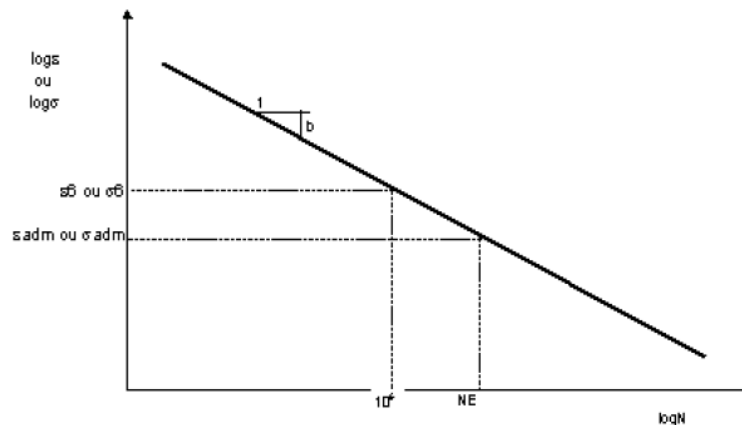


Figura. 8: Determinación de la tensión-deformación admisible (Fuente: Robinet et al 2011)

Y la determinación de los valores admisibles:

$$\sigma_{adm} = \sigma_6 * \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b * k_c * k_r * k_s$$

Siendo:

- Kc: Coeficiente de resonancia (para cada material).
- Kr: Coeficiente de riesgo. Refleja dispersiones en las características de fatiga (SN) y los espesores fijados en obra (Sh):
- u = valor de la variable de riesgo adjunta R.
- b = pendiente de la ley de fatiga.
- δ = salida de la ley normal de SN y Sh.
- Ks: Factor que tiene en cuenta las heterogeneidades locales de capacidad de carga, dependiendo de la clase de plataforma.

Con lo que se llegó al dimensionamiento de secciones con subbalasto bituminoso como uno de los ejemplos que se muestran en la figura 9:

Structure granulaire		structure bitumineuse	
Ballast	35 cm	Ballast	35 cm
Graves	20 cm	Grave bitume	15 cm
Couche de forme	50 cm	Couche de forme	35 cm
total	105 cm		85 cm

Δ = 20 cm

Figura 9: Dimensionamiento de sección bituminosa (Fuente: Estudio de viabilidad SNCF/COLAS, 2000)

3.2. Comportamiento en servicio

3.2.1. Tramo de ensayo en la LGV Est

En el año 2004 se construyó en la Ligne Grande Vitesse Est un tramo de pruebas dotado de mezclas bituminosas en la capa de subbalasto, de 3 km de longitud (Fig. 10) y velocidad de proyecto de 320 km/h, que fue puesto en servicio el 10 de junio de 2007. En la figura 11 se puede observar la sección tipo estructural del mismo.



Figura 10: Tramo de prueba de 3km en la LGV Est (Fuente: SNCF)

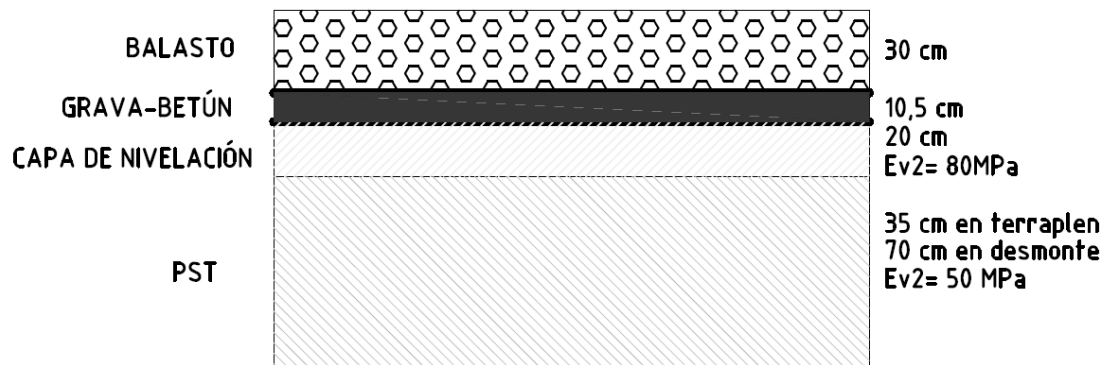


Figura11: Sección estructural de subbalasto bituminoso adoptada en el tramo de ensayos de la LGV Est en Francia (Fuente ADIF)

Esta sección fue construida mediante la compactación, sobre el PST, de una capa de forma para nivelación, y sobre la misma se efectuó un riego superficial con betún y así otorgar cierta protección a la capa de forma frente a la circulación de maquinaria y

vehículos en la fase de obra (la densidad del betún del riego superficial fue de 1,5 kg/m², suficiente para otorgar la protección requerida). Seguidamente se extendió la mezcla bituminosa en sendas tongadas sucesivas de 5,25 centímetros y compactadas al 96%, conformándose así la capa de subbalasto bituminoso de 10,5 centímetros de espesor. Por último, la capa de subbalasto bituminoso queda coronada con un tratamiento superficial por betún de dotación 0,8 kg/m². Se pueden ver imágenes de la construcción en las figuras 12 y 13, y del tramo en servicio con la capa de subbalasto bituminoso en la figura 14.



Figuras. 12 & 13: Implementación en obra de la sección (Fuente: SNCF/COLAS)



Figura 14: Borde de la capa de subbalasto bituminoso en el tramo de la LGV Est (Fuente: SNCF)

3.3. Ventajas del subbalasto bituminoso

Comparando ambas secciones de las figuras 4 y 11, es claramente visible una reducción del espesor total, al sustituirse la capa de 20 centímetros de subbalasto granular por una capa de subbalasto bituminoso de tan sólo 10,5 centímetros, prácticamente de espesor la mitad que aquella. Además, se consigue también una reducción en el espesor de la capa de forma, al bajar de 50 centímetros a sólo 20 centímetros, consiguiéndose un ahorro de material total de prácticamente 40 centímetros, lo que resulta en unos 5.000 m³ aprox. por km. de vía.

Dicho ahorro de material se ve también incrementado con la pendiente transversal de la capa de subbalasto, al ser ésta del 2,5% en el caso del bituminoso y del 4% en el caso del granular (ver figuras 15 y 16):

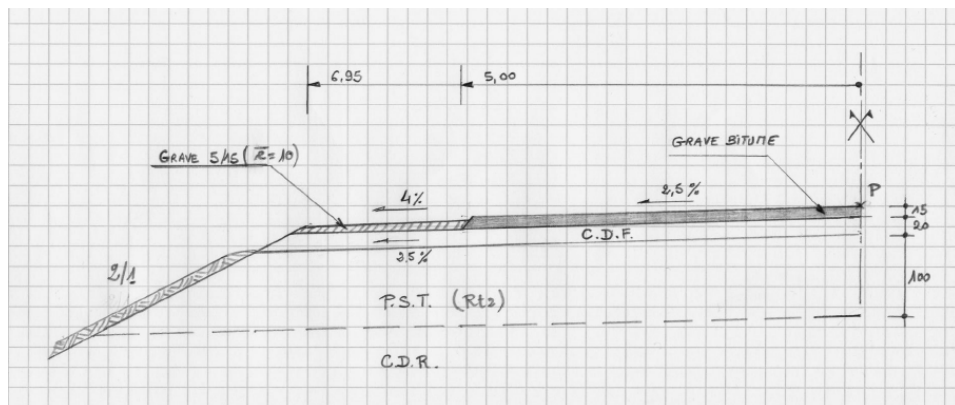


Figura 15: Economización de balasto (Fuente: Robinet et al, 2011)

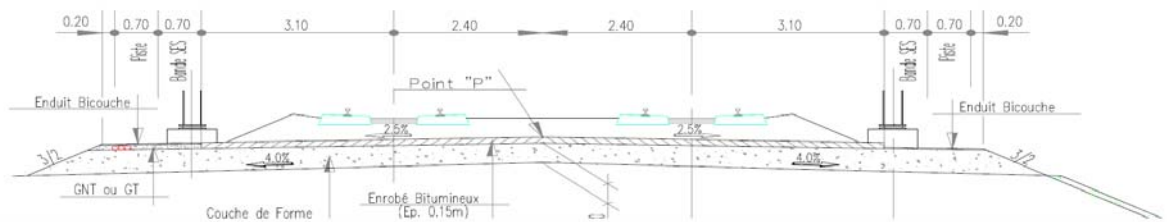


Figura 16: Pendientes en la sección con subbalasto bituminoso francesas (Fuente: SNCF)

3.3.1. Estudios experimentales

En el año 2000 se realizó un estudio de viabilidad económica por parte de SNCF y la constructora COLAS que mostró que la economía en el movimiento de tierras y la economía en la capa de forma permiten llegar a un equilibrio económico en función del precio de la capa de forma y evolución del precio del betón.

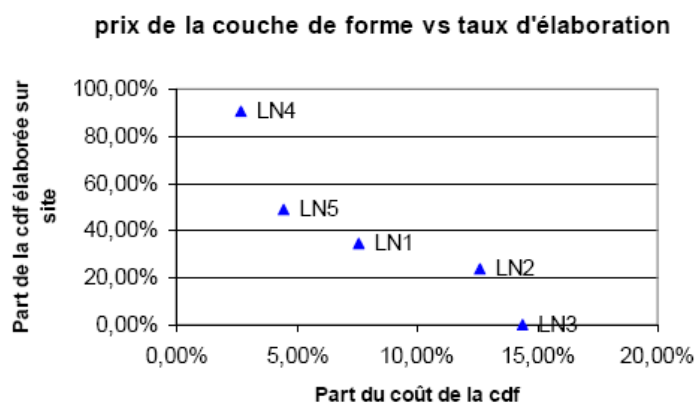


Figura 17: Variación del precio de la capa de forma (Fuente: Estudio SNCF/COLAS, 2000)

Además, en el año 2000 también se realizó un estudio complementario del estudio de viabilidad inicial, buscando caracterizar el comportamiento térmico de la sección, realizando ensayos sobre la interfaz balasto/grava bituminosa, con modelización a escala 1:1 (ver Figura 18).

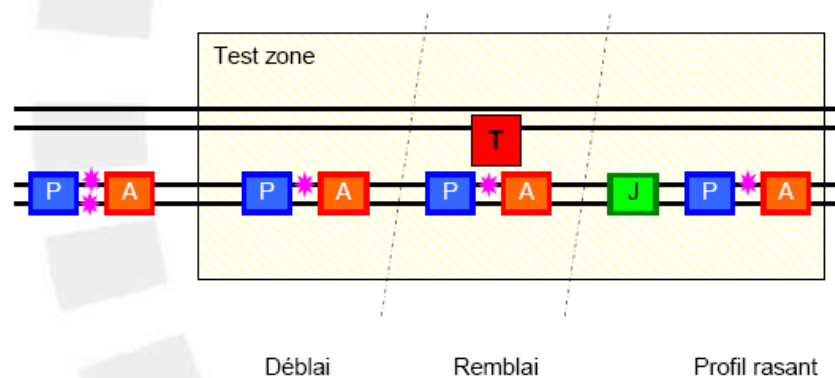


Figura 18: Ensayos a escala 1:1 (Fuente: Estudio complementario SNCF/COLAS, 2000)

3.3.2. Comportamiento en explotación

En el tramo anteriormente mencionado de la LGV Est se llevó a cabo una completa monitorización de la zona de ensayos (figuras. 19 & 20), controlando los diferentes parámetros más significativos:

- Temperatura subbalasto bituminoso / temperatura ambiente.
- Tensión en la plataforma (comparaciones entre la estructura con subbalasto bituminoso y la estructura clásica).
- Aceleración en las traviesas (comparaciones entre la estructura con subbalasto bituminoso y la estructura clásica).
- Alargamiento de la fibra inferior de la capa de subbalasto bituminoso.



Figuras. 19 & 20 Instrumentación de la zona de ensayos (Fuente: SNCF)

La zona tiene un buen comportamiento de mantenimiento después de 6 años desde su implementación (Figura 21).



Figura 21: Vista general de la zona instrumentada en servicio (Fuente: SNCF)

Como se ha dicho, se han realizado mediciones de las temperaturas en la zona experimenta, tanto la temperatura de la capa de subbalasto bituminoso, como de la temperatura ambiente (Figura 22)

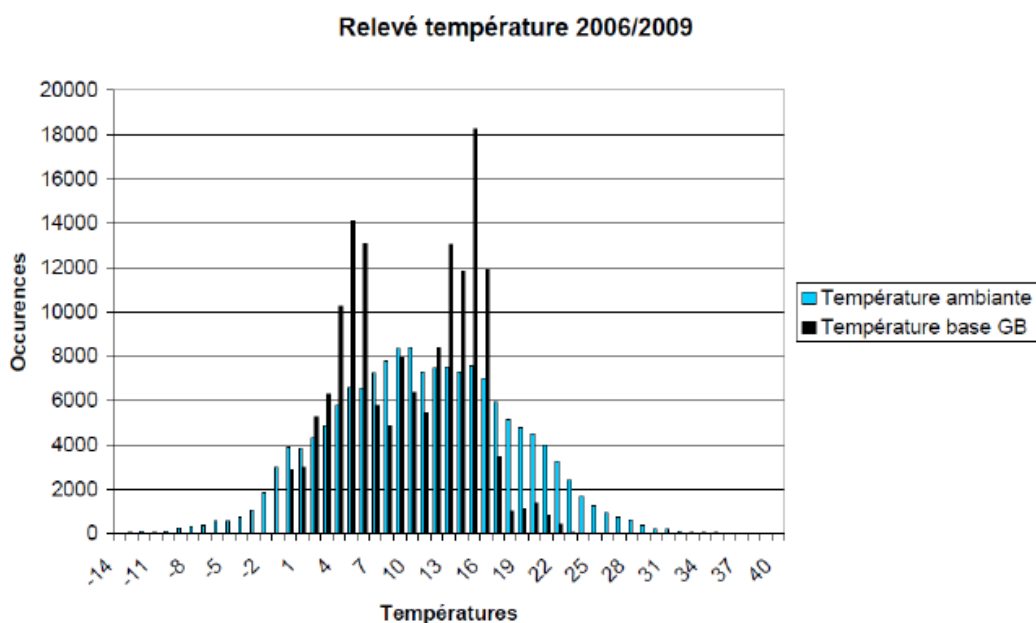


Figura 22: Gráfico de temperaturas en el periodo 2006/2009 (Fuente: SNCF)

4. Conclusiones

Las conclusiones alcanzadas por *InfraIngenierie* SNCF tras casi 10 años de uso de la sección con subbalasto bituminoso desde la puesta en servicio del tramo experimental de la LGV Est en verano de 2007 son las siguientes:

- Se consiguió una buena optimización de la sección de proyecto gracias a los estudios de viabilidad iniciales y de dimensionamiento de la sección, con las comprobaciones de tensiones admisibles y comportamientos de los materiales.
- Se consiguió una muy importante optimización en obra del movimiento de tierras, consiguiéndose no sólo menores alturas de terraplén y menores profundidades de desmonte, sino también una sensible reducción de estructuras.
- Se consiguió una reducción del volumen de material en la capa de subbalasto, mucho menor en el caso del subbalasto bituminoso frente a la tradicional del subbalasto granular (35 cm capa de forma + 15 cm capa bituminosa frente a 50 cm capa de forma + 20 cm capa granular).
- Se consiguió también una reducción en el volumen de la capa de balasto, merced a la menor pendiente de bombeo lateral para evacuación de aguas requerida por la capa de subbalasto bituminoso (3%) frente a una capa de subbalasto granular tradicional (5%).
- Se consiguió un mayor rendimiento de puesta en obra, al no depender tanto de las condiciones meteorológicas como para el extendido de una capa granular.
- Se facilitó la puesta e instalación del equipamiento ferroviario (puesta de vía, señalización, catenaria...) al poder desplazarse los camiones y equipos sobre un firme bituminoso.

5. Bibliografía Citada

- ADIF (2011). Pliego general de prescripciones técnicas tipo para los proyectos de plataforma versión 2, Madrid.

- ADIF CEDEX (noviembre 2010). Experiencias con el subbalasto bituminoso en plataformas ferroviarias, definición de sección tipo estructural y geométrica.
- ROBINET A. (2011). The evolution of the ballasted track platform design in France. The recent use of bituminous sub-ballast International Seminar on Optimization of Railway Design using Bituminous Sub-Ballast – BITU-RAIL, Lisboa.
- ROBINET A. (2000). L'expérience de la grave bitumen dans les structures ferroviaires – Journée Géotechnique Infrastructures de Transport , Cabourg.
- BILAL J. (2014). Voie ballastée innovante pour LGV à V360 grâce à l'enrobé bitumineux: d'une solution expérimentale à une solution de référence – 2ème Symposium International en Géotechnique Ferroviarie, Paris.
- LÓPEZ PITA, A., P. FONSECA TEIXEIRA Y F. ROBUSTÉ (2004). High Speed track deterioration: the role of the vertical stiffness of the track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 218, issue 1, marzo 2004.