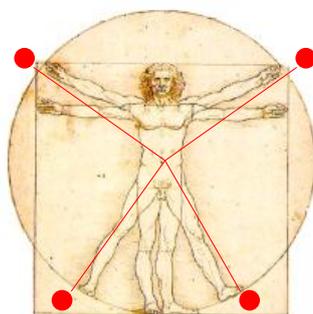


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XV. AÑO 2017

SEPARATA



EXPERIENCIA ITALIANA 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-italiana-en-empleo-de-subbalasto-bituminoso.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnología@ 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 ITALIANA 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:

La experiencia en Italia referida al comportamiento de la plataforma ferroviaria en secciones con subbalasto bituminoso constituye el caso europeo de mayor relevancia de empleo de mezclas bituminosas en líneas ferroviarias en servicio, con una experiencia contrastada de más de 30 años desde la apertura de la línea "diretissima" Roma-Florenca. Además, dicha línea no sólo atiende a tráfico de viajeros, sino también tráfico de mercancías, tratándose pues de una vía sometida a tráfico mixto. Este hecho hace doblemente interesante el proceso de diseño y el posterior estudio del comportamiento de la sección con subbalasto bituminoso tratados en el presente artículo, puesto que ha permitido apreciar de primera mano las ventajas del empleo del mismo, tanto en la mejora del comportamiento de la vía en cuanto a estabilidad y vibraciones, sino también el mejor comportamiento de la plataforma a largo plazo y la no contaminación del balasto, factores todos ellos que repercuten en un menor coste de mantenimiento de la vía.

PALABRAS CLAVE: Vía, Fatiga, Subbalasto bituminoso, Mercancías.

ABSTRACT:

The experience in Italy referred to the behavior of the railway platform with sections using bituminous sub-ballast is the most important European case about use of bituminous mixtures on railway lines in service, with proven experience of over 30 years since the opening of the line "diretissima" Rome-Florence. In addition, this line not only serves passenger traffic, but also freight traffic, so then being a line with mixed traffic. This doubles the interest of the design process and the subsequent study of the behavior of the section with bituminous sub-ballast discussed in this article, since it has allowed to appreciate the benefits of using it, both in improving the performance in stability and vibration of the rail, and also in the better performance of the long-term platform behaviour and avoiding contamination of the ballast, all of them factors that enable a lower cost of track maintenance.

KEY-WORDS: Track, Fatigue, Bituminous sub-ballast, Freight.

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Experiencia internacional, 3. Experiencia en Italia, 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.

En dicho entorno, las mezclas asfálticas y en concreto el concepto de subbalasto bituminoso proporciona una buena alternativa para cumplir con los requerimientos de los ferrocarriles modernos, de modo que en diversos países (EEUU, Italia, Francia, Japón...) se está trabajando en modelos a escala, tramos de ensayo y líneas en servicio encaminadas en este aspecto, tanto para tráficos de alta velocidad, como mixtos, como de alta carga por eje (principalmente USA e Italia en ese último sentido).

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.

La primera experiencia en el uso de subbalasto bituminoso en la construcción de líneas de alta velocidad se ejecutó en Italia (FS *Ferrovie dello Stato*) a principio de los años 70 para la línea de nueva construcción proyectada para velocidades superiores a 200 km/h entre Roma y Florencia (*Diretissima*).

Posteriormente esta sección estructural con un espesor de subbalasto bituminoso de 12 cm se ha extendido a otras líneas y actualmente se encuentran en explotación 1.200 km de líneas de alta velocidad con esta tipología. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto el buen comportamiento del subbalasto bituminoso, contribuyendo en general a:

- La estabilidad de la geometría de la vía.
- La reducción de los niveles de vibración.
- La mejora del comportamiento de la vía en zonas de transición.
- La mejora del comportamiento a largo plazo de la plataforma.
- El confinamiento del balasto y evitando la contaminación por finos del suelo.
- La reducción de los costes de mantenimiento de la vía.

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

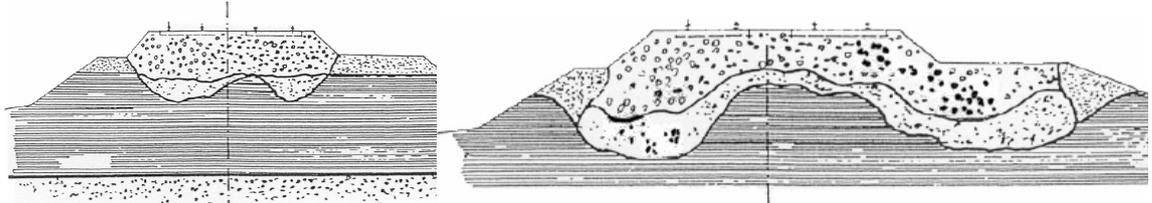
En otros países, como en las líneas con balasto de Alta Velocidad en Japón y en líneas convencionales en Suiza, se utilizan capas asfálticas de menor espesor (6 cm) en donde una de las principales funciones es la de mantener las condiciones de humedad de la plataforma a largo plazo.

3. Experiencia en Italia

3.1. *Criterios de diseño*

Los Ferrocarriles Italianos fijaron en fecha tan temprana como 1966 los requerimientos de proyecto y diseño para acometer la realización de la nueva línea Roma-Firenze, llamada “*diretissima*”. Principalmente se buscaba conseguir mejoras tanto en la calidad de vía como en la velocidad de explotación, manteniendo acotados en la medida de lo posible los costes de conservación y mantenimiento. La búsqueda de soluciones vino de la incorporación de diversas capas de creciente calidad entre la plataforma y el balasto, buscándose así que.

- Se distribuyeran adecuadamente los esfuerzos que llegaban a la plataforma, absorbiendo a la vez las sollicitaciones dinámicas provocadas en la vía.
- Se impidiera la contaminación del balasto por migración de finos y partículas del terreno natural (Figuras 1 & 2).
- Se impermeabilizasen las capas inferiores, buscando que el agua no pudiese percolar más allá de la capa de subbalasto.
- Se mantuviera un comportamiento bueno y resistente a las heladas.



Figuras 1 & 2: Contaminación y degradación del balasto por migración finos y por agua (Fuente: D'Andrea, 2011)

A partir de esta premisa de partida, se redactó un cuaderno inicial para el proyecto de la *diretissima*, incorporando las capas siguientes (ver figura 3):

- Una capa inferior denominada *Supercompattato*, granular y con clasificación A1 en la norma A.A.S.H.O., de espesor 25 centímetros como mínimo, compactada con densidad del 100% según la A.A.S.H.O, y un valor mínimo de 60 Mpa del módulo de deformación-
- Una capa de subbalasto dotada de un módulo de deformación que al menos alcanzara los 180 Mpa. Los ensayos e investigaciones llevadas a cabo por FS dieron en la prescripción inicial de suelos naturales con estabilización por medio de ligantes hidráulicos o con grava-cemento, normalmente a partir de materiales calcáreos por machaqueo de roca, y con contenido de cemento bajo y en torno del 6% de contenido en agua, lo que se vino a denominar *Misto-cementato*.

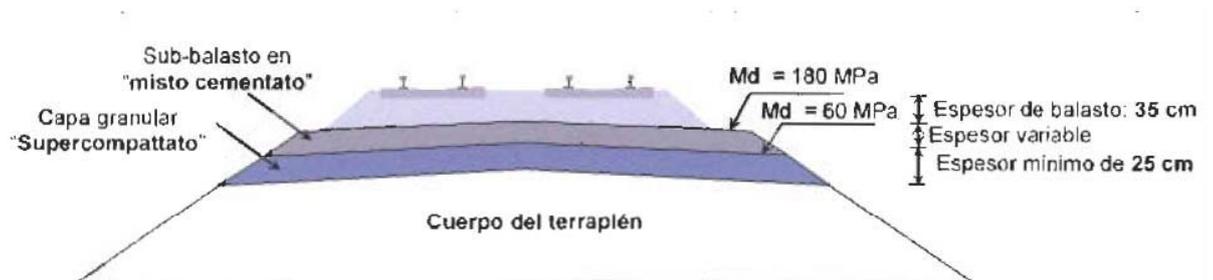


Figura 3: Sección inicial prevista para la línea Roma-Firenze (Fuente CENIT 2004)

A pesar de estas prescripciones, ya en las fases iniciales de obra, se plantearon otras posibilidades, considerando el empleo de cenizas volantes, escorias de altos hornos, y, sobre todo, mezclas bituminosas.

Las secciones con uso de cenizas volantes o escorias fueron descartadas pronto, con su empleo tan sólo en situaciones muy particulares como saneo de plataformas. En cambio, el interés levantado por el empleo de mezclas bituminosas fue superior al de la mezcla de *misto-cementato*, lo que ha terminado llevando a que en los trazados de nueva planta ejecutados en Italia se emplee casi siempre la sección con subbalasto bituminoso.

El interés inicial en el uso de la capa de subbalasto bituminoso provino de las compañías contratistas, espoleadas por las ventajas que encontraban:

- Se incrementaban los rendimientos de puesta en obra de la capa de subbalasto.
- La circulación del tráfico de obra y la maquinaria resultaba mucho más fácil sobre la capa bituminosa, minimizando la afección a la capa de forma.
- Problemas para conseguir áridos adecuados en la zona de la traza.
- Menor pérdida de jornadas de trabajo por cuestiones climatológicas.

Una vez estudiada la alternativa propuesta, los Ferrocarriles Italianos procedieron al desarrollo de las nuevas secciones de vía y autorizaron su construcción.

La obtención de resultados mejores incluso de los esperado dieron paso al empleo general de la nueva sección estructural en la totalidad de los nuevos tramos que se han construido desde entonces, así como en la renovación de antiguas líneas.

3.1.1. *Características de la mezcla bituminosa empleada*

A diferencia del caso norteamericano, los requisitos impuestos a la mezcla bituminosa por la normativa italiana son los normales en capas de firme de carreteras para rodadura o base, modificando ligeramente los husos granulométricos de áridos. Se pueden ver los requerimientos técnicos de la normativa italiana en la tabla 1.

PARÁMETROS	VALORES	OBSERVACIONES
Espesor	12 cm	• Valor de proyecto.
Áridos <ul style="list-style-type: none"> • Coef. L.A.(fracción gruesa) • Equivalente de arena (fracción fina) • Coeficiente de Absorción. • Filler 	<ul style="list-style-type: none"> <30% <70 <0,015% >70% 	<ul style="list-style-type: none"> • Fracción gruesa (retenidos ASTM 10) constituida por piedras/gravas de machaqueo, con al menos 90% de elementos con dos o mas caras de rotura, y un máximo de 10% de lascas y elementos aciculares. • Fracción fina (pasados ASTM 10) compuesta por mezcla de arenas y/o de machaqueo (relación máxima de 1/2)
Betún <ul style="list-style-type: none"> • Tipo • Porcentaje de betún. • Relación filler/betún. 	<ul style="list-style-type: none"> 50/70 4,1%-4,7% 1,5/2 	<ul style="list-style-type: none"> • Penetración a 25°C. • 4,4%+0,2 en masa. • En volumen
Mezcla <ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad Marshall • Deformación Marshall • Rigidez Marshall • Perdida de Estabilidad • Huecos residuales. • Resistencia a tracción indirecta. 	<ul style="list-style-type: none"> Min 1.000 daN 2-4 mm min 240 daN/mm² max 25% 3-6% >8daN 	<ul style="list-style-type: none"> • Carga máxima de rotura. • Fluencia • Carga máxima/fluencia • Comparación entre estabilidad en probetas originales y probetas colocadas en agua durante 24 horas a 60°C

Tabla 1: Requerimientos de la mezcla bituminosa a emplear en capa de subbalasto (Fuente CENIT basado en ITALFERR y Buonano et al.)

En la tabla 2 se indica la granulometría de los áridos del subbalasto bituminoso, tal como las especifica la normativa italiana.

ASTM N°	1	3/4"	3/8"	4	10	40	80	200
% pasa en masa	100	80-100	54-76	36-56	23-40	10-22	7-16	6-10

Tabla 2: Granulometría de áridos exigida para la conformación de subbalasto bituminoso (Fuente ITALFERR)

Y tal como se puede observar en la tabla 3, en realidad son valores bastante similares a los indicados por la normativa italiana de carreteras para capas base bituminosas:

TABELLA 3. Strati di base: Requisiti di accettazione degli aggregati per misti bitumati e conglomerati bituminosi aperti

DETERMINAZIONE		SIMBOLO	NORMA DI RIFERIMENTO			TRAFFICO			
						PP	P	M	L
FRAZIONE >4 mm	Contenuto di: - Rocce tenere, alterate o scistose	-	CNR 104/84	%	^	1	1	1	1
	- Rocce degradab.	-	CNR 104/84	%	^	1	1	1	1
	Coeff. Los Angeles	LA	CNR 34/73	%	^	25	25	30	40
	Micro Deval Umida	MDU	CNR 109/85	%	^	20	20	25	35
	Quantità di frantumato (4)	-	-	%	v	90/90	90/30	70/20	50/0
	Dimensione max	Dmax	CNR 23/71	mm	^	40	40	40	40
	Sens. al gelo(1)	G	CNR 80/80	%	^	30	30	30	30
Pass. al setaccio 0,075(2)	-	CNR 75/80	%	^	1	1	1	2	
Spogliamento in acqua a 40°C(3)	-	CNR 138/92	%	^	5	5	5	5	
FRAZIONE <4 mm	Contenuto di: - Rocce tenere, alterate o scistose	-	CNR 104/84	%	^	1	1	1	1
	- Rocce degradab.	-	CNR104/84	%	^	1	1	1	1
	Equiv. in Sabbia	ES	CNR 27/72	%	v	50	50	50	35
	Indice Plastic	IP	CNR-UNI 10014	%	^	NP	NP	NP	6
	Limite Liquido	WL	CNR-UNI 10014	%	^	25	25	25	35

Tabla 3: Requisitos de aceptación de los agregados para mezclas bituminosas y aglomerados bituminosos abiertos (Fuente D'Andrea, 2001)

3.1.2. Configuración estructural de la sección con subbalasto bituminoso

La figura 4 muestra la sección tipo adoptada en Italia para vías (doble, en este caso) con configuración estructural con capa de subbalasto bituminoso.

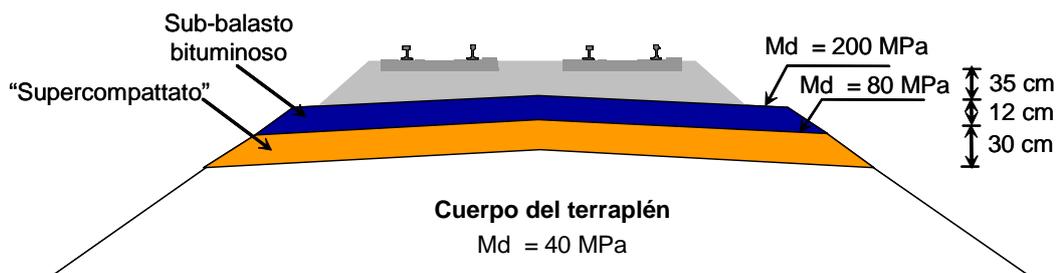


Figura 4: Sección estructural de la *diretissima* (Fuente López-Pita)

La capa de subbalasto bituminosa tiene un requerimiento del módulo de deformación de al menos 200 Mpa en su superficie, y a su vez en el “*supercompattato*” el límite mínimo es de 80 Mpa. Las especificaciones exigidas por la administración ferroviaria italiana para las capas de una sección en terraplén se pueden ver en la fig. 5.

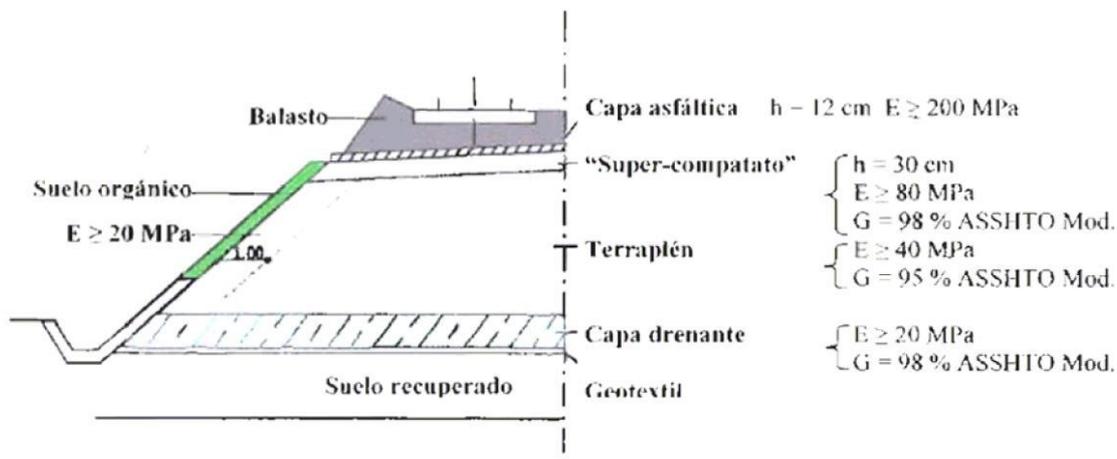


Figura 5: Sección de vía para LAVs en Italia (Fuente C. Giavarini y S. Ravaioli)

Los espesores marcados en las normas italianas han estado establecidos entre 8 y 12 centímetros, pero dada la generalización del espesor máximo de 12 centímetros, la

última normativa de ITALFERR tomada como referencia para la redacción de proyectos de nuevos trazados, únicamente indica el espesor de 12 cm (ver figura 5).

Además, las normas italianas contemplan seis clases distintas de secciones para las transiciones con obras de fábrica, según las diferentes propiedades de las estructuras y viaductos. El catálogo de secciones estructurales de la U.I.C. recoge estas secciones, que ya fueron empleadas en la Roma-Florenia (ver figura 6)

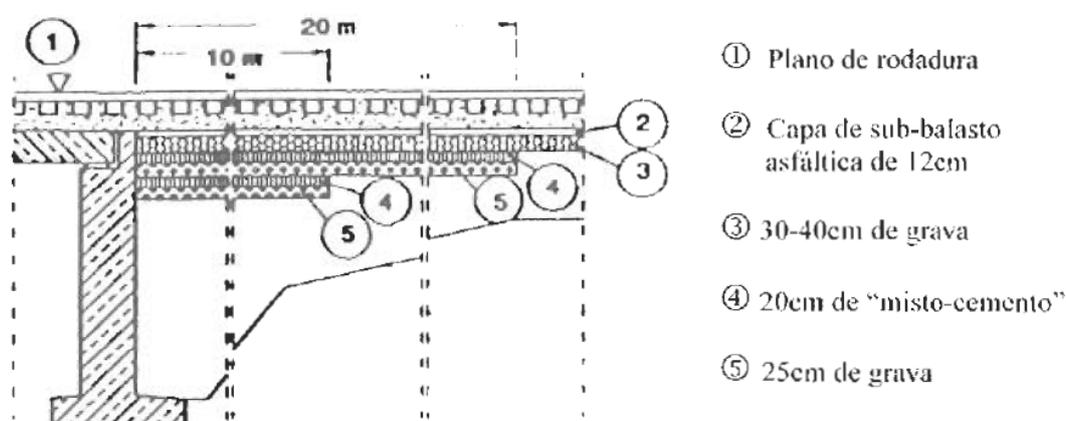


Figura 6: Transición con mbc en la capa de subbalasto (Fuente: UIC, ficha 719 R)

Al contrario de lo que sucede en EEUU, en Italia la capa de subbalasto bituminoso queda extendida en todo lo ancho de la plataforma. La ejecución de la capa se realiza en dos extendidos sucesivos de subcapas de 6 centímetros de espesor, siendo compactadas de forma sucesiva por medio de compactadoras de neumáticos convencionales de uso en carreteras.

3.1.3. *Diseño del espesor óptimo de la capa de subbalasto*

En los años 70 se llevaron a cabo estudios teóricos y empíricos comparando las secciones con subbalasto bituminoso y con "misto-cementato" (grava-cemento) y así poder definir el espesor más adecuado, y verificando:

- Que la plataforma recibe similares presiones en los dos casos.
- Que el rango térmico previsible, de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, no resulta en tensiones internas incompatibles con el material de la capa de mbc.

Basándose en la teoría de sistemas elásticos multicapas, se desarrolló un modelo analítico que consideraba los diferentes coeficientes de rozamiento de las interfases de separación de las capas del modelo (3 capas, tomando la capa de “supercompata” como de infinito espesor).

La evaluación de los esfuerzos equivalentes transmitidos a las traviesas del armazón de vía se realizó mediante la teoría de viga sobre fundación elástica, y tomando la relación de Kirk para la determinación de la rigidez del apoyo. Para poder adoptar las presiones resultantes en cada una de las diferentes traviesas, se superpusieron los esfuerzos correspondientes. En cuanto al material rodante generador de las cargas y esfuerzos, se adoptó una carga máxima de 22 t/eje, y unos bogies con empuje de 2,5 metros.

En la tabla 4 se pueden ver las diferentes propiedades tomadas para cada una de las capas y así poder resolver las ecuaciones diferenciales resultantes.

CAPA	MODULO DE ELASTICIDAD	ESPESOR
BALASTO	400 MPa	35 cm
SUBBALASTO MISTO-CEMENTATTO	Entre 600 Mpa y 900 Mpa (Valor de proyecto de 750Mpa)	20cm
SUBBALASTO BITUMINOSO	15.000 Mpa (temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) 9.000 Mpa (temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 4.000 Mpa (temperatura de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Variable (6, 8, y 12 cm)
CAPA SUPERCOMPATATA	200 MPa	---

Tabla 4: Valores teóricos a tomar en la determinación del espesor óptimo de la capa de subbalasto bituminoso o granular (Fuente: López-Pita et al.)

Para la capa de mezcla bituminosa, hay que tener en cuenta el módulo dinámico, función de la frecuencia de aplicación de cargas y de la temperatura de la mezcla. Así, se tienen 10 Hz de frecuencia para velocidades de 250 Km/h, y se pudo determinar en una serie de pruebas dinámicas con dicha frecuencia un intervalo de variación del módulo con $2 \cdot 10^{-5}$ de amplitud de deformación y temperaturas acotadas entre 10 y 30°C (dichos rangos fueron obtenidos en mediciones estacionales realizadas en la “*diretissima*”, tabla 5).

TEMPERATURA	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
Aire	10°C	15°C	25°C	19°C
Subbalasto	11°C	17°C	28°C	21°C

Tabla 5: Valores de t^a medias estacionales atmosféricas y en el interior del subbalasto en la “*diretissima*” (Fuente Crispino)

La comparación de esfuerzos y presiones propagados a la plataforma por las capas de diferentes espesores de subbalasto bituminoso (6, 8 y 12 cm) y una de “misto-cementato” de 20 centímetros se ve en la figura 6 (caso 12 cm).

Es fácilmente observable en dibujo que los valores de los esfuerzos verticales transmitidos a la plataforma en los casos de las capas bituminosas resultan análogos o hasta menores que los producidos en la capa de “misto-cementato” (siempre que se mantengan los rangos de temperaturas indicado).

En cuanto a las tensiones internas, en las capas de subbalasto bituminoso no se sobrepasan los 2,5 Kg/cm² de presión vertical, ni los 10,8 Kg/cm² de tensión de tracción, resultando unos valores admisibles para este tipo de materiales conforme a su empleo comprobado en firmes carreteros.

En lo que al “misto-cementato” se refiere, una vez transcurridos 5.000 ciclos de carga del modelo, se observa un incremento de las tensiones transmitidas a la plataforma, pasando de 0,7 a 1 Kg/cm². En cambio, para los tres casos de mezcla bituminosa, no hay ninguna afección de las resistencias de tracción ni compresión.

Por último, cabe reseñar que en estas pruebas se realizó una verificación de los espesores de las capas de subbalasto bituminoso con los mismos métodos empleados en el cálculo de carreteras con pavimentos flexibles, tomando un ciclo de vida de 50 años y 10 t de carga equivalente, pasada a nivel de esfuerzos a la capa de balasto.

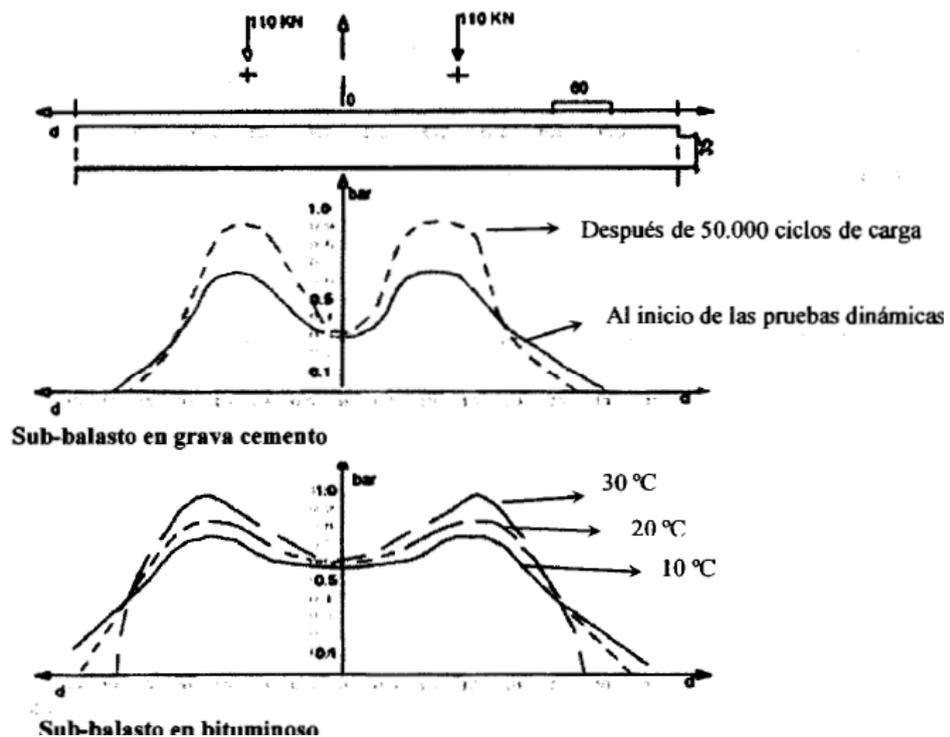


Figura 6: Comparativa en la distribución de presiones sobre plataforma en los casos de una gravamento de 20 centímetros de espesor y del la mezcla bituminosa en capa de 12 centímetros (Fuente Celard et al.)

Así pues, en la figura 6 se puede observar un rápido incremento de las presiones calculadas sobre la plataforma en el caso del *misto-cementato*, y prácticamente un no incremento de las mismas en el caso del subbalasto bituminoso.

Finalmente, los ensayos descritos hicieron posible la validación para las nuevas líneas de alta velocidad de la sección con subbalasto bituminoso tal como está descrita

en la tabla 1. Hoy en día se siguen utilizando estos valores, con pequeñas modificaciones, en la construcción de LAVs en Italia.

3.2. Comportamiento en servicio

Por desgracia, hasta el momento sólo se poseen datos de largo plazo en la diretissima, merced a sus más de tres décadas en funcionamiento. Además su importancia es doblemente interesante al tratarse de una línea sometida a tráfico mixto, que combina el paso de trenes ligeros de viajeros a altas velocidades, con el de trenes de mercancías con altas cargas por eje.

Además, en la diretissima ya se ha acometido una renovación completa en los tramos con 25 años en servicio, tal como marca la normativa de mantenimiento italiana. Esto ha permitido examinar de primera mano que ninguna de las capas de la vía había alcanzado en dicho plazo los límites de fatiga prematura, habiendo mantenido siempre un buen comportamiento.

Resultó también que la capa de subbalasto bituminoso no precisaba de sustitución, debido a su muy bajo deterioro en el tiempo transcurrido. Pasados varios años se siguieron tomando muestras, que ponen de manifiesto que el subbalasto sigue conservando sus propiedades sin mostrar tanto envejecimiento como el empleado en firmes carreteros, debido al resguardo otorgado por el balasto situado sobre él.

Un aspecto importante es que el desguarnecido de vía en las renovaciones de balasto se han podido llevar a cabo con facilidad, empleando maquinaria desguarnecedora normal, y sin producir ningún daño a la capa bituminosa.

De este modo, vistos los buenos resultados en la Roma-Florenia, en Italia el empleo de subbalasto bituminoso es ya desde hace tiempo un estándar de diseño tanto para la construcción de nuevas líneas, como la reconstrucción de antiguas. Tan sólo se evita su uso en la construcción de nuevas vías con trazado paralelo a lo largo de vías antiguas existentes en servicio con ampliación de plataforma, para evitar los efectos de las diferentes condiciones de cimentación que ello provocaría.

Curiosamente, por restricciones presupuestarias en 2010, se construyó una nueva vía sin subbalasto bituminoso, hecho que aprovechará FS para tener un tramo de explotación real actual en subbalasto granular como comparativo frente a los tramos existentes con subbalasto bituminoso.

3.3. Empleo de agregado de polvo de neumáticos

En la actualidad, se está experimentando con agregado de polvo de neumáticos a las mezclas bituminosas, para buscar mejorar las propiedades de amortiguación de vibraciones del aglomerado bituminoso, y reducir así aún más las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario.

Además, con la reutilización de neumáticos se busca también una mejora en el aprovechamiento de los residuos y sus técnicas de reciclaje, acorde con la reciente legislación italiana y las últimas Directrices comunitarias al respecto.

Así, se están ensayando diferentes tipos de agregados de polvo de neumáticos, caracterizando adecuadamente sus propiedades y cómo afectan a las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas realizadas con ellos, y poder también modelar su comportamiento con modelos de predicción debidamente calibrados, simulando su comportamiento frente a vibraciones.

Tipos de polvo de neumáticos estudiados:

- FR: Pre-tratamiento de congelación y rotura por medios mecánicos, martillos y tamices.
- CN: Triturado mecánico de los neumáticos de desecho.

Conviene hacer notar que el tratamiento criogénico cambia las características de la goma, haciéndola absorber una menor cantidad de betún.

Los ensayos iniciales parecen reflejar que la goma causa una seria reducción de la estabilidad, al mismo tiempo que las curvas de rigidez resultan más planas. Por otra parte, el porcentaje de huecos de aire aumenta en el caso de mezclas con polvo de neumático.

Así pues, las experimentaciones italianas más recientes, parecen encaminarse hacia las siguientes conclusiones.

El uso de polvo de neumáticos incrementa sensiblemente la demanda de betún en las mezclas bituminosas.

El polvo de neumáticos afecta de forma importante las propiedades de las mezclas bituminosas. Sin embargo, los desplazamientos inducidos por las cargas provocadas por trenes ordinarios de alta velocidad son aceptables.

El tipo de polvo de neumático parece influir significativamente en el decremento de las propiedades mecánicas, y quedan fuera de los mínimos prescritos por la administración ferroviaria para contenidos de goma por encima del 5% del volumen.

El agregado de polvo de neumáticos a las mezclas bituminosas mejora la capacidad de disipación de energía, y el factor de pérdida crece con el incremento de contenido de goma.

4. Conclusiones

Gracias al empleo durante más de tres décadas del subbalasto bituminoso en Italia, se pueden asumir una serie de ventajas derivadas del uso del mismo en detrimento del subbalasto granular:

- El subbalasto bituminoso tiene un muy buen comportamiento de resistencia frente a fatiga, tanto comparado con capas granulares como incluso con capas tratadas con ligantes hidráulicos. Esta propiedad adquiere mayor relevancia al considerar las tracciones y compresiones cíclicas que causa el paso de trenes.
- Además, la capa de subbalasto bituminoso, gracias a las propiedades de las MBC, se comporta bien en retracción, no presentando fisuración, de manera que la plataforma sigue trabajando uniformemente y evitando el paso de agua a las capas inferiores, problemas estos importantes en capas cementadas.
- La capa de subbalasto bituminoso posee un comportamiento visco-elástico que otorga una capacidad de adaptación moderada ante posibles asentamientos limitados de la plataforma, evitando la aparición de fisuras y siendo capaz de seguir distribuyendo las cargas.
- El grado de impermeabilidad de la capa bituminosa es muy elevado, gracias a las propiedades hidrófugas del betún.
- Las MBC poseen la interesante propiedad de la autoperparación, siendo capaces de soldarse por sí solas al aparecer fisuras. Además, en áreas donde la cohesión hubiera disminuido por cualquier motivo, tras un plazo en reposo son capaces de restablecerla.
- Por último, la capa de subbalasto bituminoso consigue un mejor anclaje del balasto merced a su adherencia y rugosidad, consiguiendo una mejora en el funcionamiento de la vía ante esfuerzos laterales.

Los problemas que en ocasiones sufre el betún, con importantes deformaciones, por elevadas temperaturas, pueden minimizarse hasta poder considerarse despreciables si se agrega un contenido de filler adecuado, se ajusta bien el árido a los husos granulométricos establecidos, empleando también betunes de baja penetración.

Por otra parte, el uso de polvo de neumáticos contribuye aún más a la amortiguación de vibraciones, si bien parece penalizar las propiedades mecánicas de las mezclas, especialmente con contenidos de goma mayores del 5% en volumen.

En la fase de construcción se consiguen varias ventajas respecto al subbalasto granular:

- El fácil empleo como camino de obra de esta capa para acceder a la totalidad del trazado de la obra.
- Dado que el ratio habitual de generación de caminos de servicio por kilómetro de traza a construir es de unos 800 mts/km, el empleo de más cantidad de mezclas bituminosas puede llegar a facilitar una reducción de los costes unitarios de la misma por su mayor volumen a negociar y fabricar.
- Extendido de capas más rápido con las actuales técnicas constructivas.
- Menos problemas con las bajas temperaturas para trabajar, y por tanto más meses de trabajo posible.
- La capa bituminosa ejecutada es practicable en horas, no en días.
- Hay una amplia disponibilidad de plantas de aglomerados en todo el territorio, lo que no sucede en el caso de canteras de material granular.
- Se salva del orden del 40% de los caros agregados por el menor espesor.

5. Bibliografía Citada

- ADIF CEDEX (noviembre 2010). Experiencias con el subbalasto bituminoso en plataformas ferroviarias, definición de sección tipo estructural y geométrica.
- BUONANNO, A. & R. MELE (2000) The use of bituminous mix sub-ballast in the Italian State Railways. Proceedings of the Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, September 2000.
- BUONANNO, A. (2000) Il sub-ballast in conglomerate bituminoso. La Técnica Professionale n. 9, September 2000, pp. 43-48.
- BUONANNO, A.; G. KAJON, R. MELE & C. GIAVARINI (1997) Experimental Study of Subballast in Modified Bituminous Conglomerate with Vibration Damping Function. Proceedings of the World Congress on Railway Research, Firenze, November 1997. vol. B, pp. 87-92.
- CELARD, B.; A. CONTI PUORGER, M. PISANI & A. ZOCCA (1978). Une plateforme en enrobe bitumineux pour les lignes nouvelles: l'expérience effectuée sur la "Direttissima" Rome-Florence. Rail International. April 1978. pp. 259-279.
- CRISPINO, M.; P. GIANNATTASIO, M. COLELLA & M. MARINO (1997) Theoretical Studies and Experiences Concerning Asphalt Concrete Subballast in Italian High Speed Lines. Proceedings of the World Congress on Railway Research, Firenze, November 1997. vol. B, pp. 7-20.
- D'ANDREA, A. (2011). Experience and recent developments on the use of bituminous sub-ballast in Italian high speed rail track International Seminar on Optimization of Railway Design using Bituminous Sub-Ballast – BITU-RAIL, Lisboa.
- GIAVARINI, C. & S. RAVAIOLI (2000) L'asfalto nelle applicazioni ferroviarie. Rassegna del Bitume n.35/00. pp. 33-36.
- ITALFERR (2000) Capitolato Costruzioni Opere Civili. Sezione XV, Sub Ballast e Pavimentazioni Stradali. 56 pp.
- LÓPEZ PITA, A. Y P. FONSECA TEIXEIRA (2004). Estudio sobre la viabilidad de incorporar capas de subbalasto con material bituminoso en las líneas de alta velocidad, Barcelona, abril 2004.
- LÓPEZ PITA, A. Y P. FONSECA TEIXEIRA (2001). Resistant track homogeneity: a way to reduce maintenance costs. 4th International Conference Railway Engineering, Londres, abril-mayo 2001.

- LÓPEZ PITA, A. Y P. FONSECA TEIXEIRA (2003). New criteria in embankmentbridge transitions on high-speed lines. IABSE 2003 Symposium Structures for highspeed railway transportation, Antwerp (Bélgica).
- 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.
- VILLARONTE FERNÁNDEZ-VILLA (2010). Estudio del subbalasto bituminoso como parte de la estructura de la vía, Madrid, octubre 2010.