



PROJECTE O TESIS D'ESPECIALITAT

Títol

**NUEVOS MATERIALES PARA SU EMPLEO COMO
BALASTO EN LÍNEAS DE FERROCARRIL**

Autor/a

AVELINO SEOANE TOMAS

Tutor/a

ANDRES LOPEZ PITA

Departament

INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE Y DEL TERRITORIO

Intensificació

INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS

Data

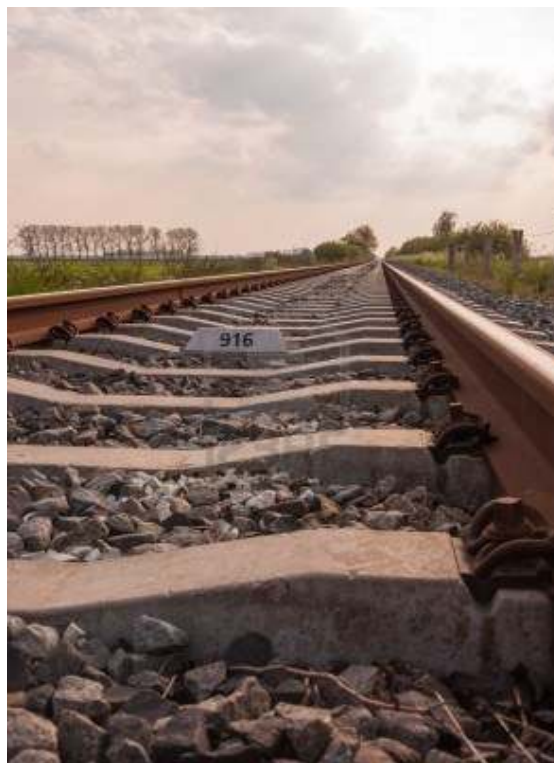
JUNIO 2013



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

TESINA
722-TES-CA-6292

NUEVOS MATERIALES PARA SU EMPLEO COMO BALASTO EN LÍNEAS DE FERROCARRIL



AUTOR: **AVELINO SEOANE TOMAS**

TUTOR: **ANDRES LÓPEZ PITA**

TITULACION: **ENGINYERIA DE CAMINS, CANALS I PORTS**

JUNIO 2013



Agradecimientos:

Al Profesor Andrés López Pita por su labor educativa y a los Sr. Juan Peset Iribarren, Carlos Saborido Amate y Nahuel Manzo Costanzo por su inestimable ayuda.

Dedicatoria:

A mis padres, hermana y a Eva, ya que sin ellos, este camino habría sido imposible.



NUEVOS MATERIALES PARA SU EMPLEO COMO BALASTO

EN LÍNEAS DE FERROCARRIL

AUTOR: AVELINO SEOANE TOMAS

TUTOR: ANDRES LÓPEZ PITA

RESUMEN

En las últimas décadas, la creciente conciencia ambiental de la sociedad ha propiciado un cambio de dirección hacia el ferrocarril. Este creciente interés alrededor del ámbito ferroviario, ha exigido avances en el sector para poder alcanzar y sobrepasar las expectativas que en torno a éste se crearon. De este modo ha sido fundamental la contribución de diversas investigaciones e innovaciones en lo que respecta tanto al material rodante, como al conjunto de vía.

A pesar de todas las mejoras introducidas, existe aún un elemento de vía sobre el cual no se ha innovado y presenta inconvenientes que necesitan soluciones reales en el corto plazo. La necesidad de prolongar la vida útil de la capa de balasto, conjuntamente con la demanda ambiental de reducir la utilización de las materias primas, obligan a buscar soluciones inmediatas a los problemas relacionados con el deterioro del conjunto de balasto. Una vez introducidas las problemáticas que surgen en torno a la acelerada degradación de la capa de balasto y a su atraso respecto a los demás elementos que componen la vía, se ha comenzado a plantear desde distintas ópticas, la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías que den una solución eficaz a los inconvenientes existentes y contribuyan hacia una mejora de las infraestructuras ferroviarias.

De este modo, la alternativa de la vía en placa frente a la vía en balasto garantiza unas mejores condiciones de comportamiento para la infraestructura en base a la calidad geométrica ofrecida y a un mínimo mantenimiento. Por el contrario, la vía en placa ha sido y siempre será mas costosa que una vía tradicional de balasto. Esta diferencia que hace de la vía en placa un sistema menos competitivo, ha promovido que durante las últimas décadas hayan aparecido un gran número de estudios e investigaciones. Por un lado existen líneas de trabajo que se centran en sustituir la piedra por elementos prefabricados de hormigón (balasto artificial), mientras que por otro lado están las tecnologías que se centran en el agregado de poliuretanos sobre el balasto. A pesar de los buenos resultados obtenidos en el campo de la resistencia y del desgaste del balasto, las expectativas no se llegan a cumplir del todo, especialmente por el elevado coste de dichas tecnologías, entre otros aspectos.

Ante esta situación, mostramos en la presente tesina una nueva alternativa que pretende mejorar la calidad de las piedras que componen el balasto natural. El neobalast, o balasto de altas prestaciones, mediante un nuevo tratamiento superficial (recubrimiento formado por un aglomerante más partículas de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso-NFU) pretende alargar la vida útil del balasto, mejorar sus prestaciones antivibratorias y frente a ruido, además de reducir el impacto ambiental por uso de material procedente de canteras.

Nuestro objetivo es abordar el estudio de este nuevo material desde ángulos y campos de conocimiento multidisciplinarios, a fin de poder conocer los criterios de viabilidad técnica, productiva y económica que puedan permitir la consolidación de este nuevo material en un futuro, frente a la tecnología tradicional del balasto natural.



NUEVOS MATERIALES PARA SU EMPLEO COMO BALASTO

EN LÍNEAS DE FERROCARRIL

AUTHOR: AVELINO SEOANE TOMAS

ADVISOR: ANDRES LÓPEZ PITA

ABSTRACT

In recent decades, the growing environmental awareness of society has led to a shift towards rail. This growing interest around the railway sector has demanded progress in the sector in order to meet and exceed the expectations around it were created. This contribution has been critical of various research and innovation in terms of both the rolling stock and the track assembly.

Despite all the improvements, there is still an element of track over which it has innovated and drawbacks that need real solutions in the short term. The need to prolong the life of the ballast layer, together with the environmental demand to reduce the use of raw materials, require immediate solutions to the problems associated with deterioration of the ballast assembly. Once introduced the issues that arise around the accelerating degradation of the roadbed and its backwardness compared to other elements of the track, it has begun to pose from different angles, the possibility of incorporating new technologies to give a solution effective existing drawbacks and contribute towards improving rail infrastructure.

Thus, the alternative of slab track is on the track in ballast ensures better conditions for infrastructure behavior based on the geometrical quality and low maintenance offered. By contrast, the slab track has been and will always be more expensive than a traditional track ballast. This difference makes the slab track system less competitive, has promoted over the past decades have appeared a large number of studies and research. On the one hand there are lines of work that focus on replacing the stone precast concrete (artificial ballast), while on the other side are the technologies that focus on the addition of polyurethane on the ballast. Despite the good results obtained in the field and wear resistance of the ballast, the expectations are not quite meet at all, especially for the high cost of these technologies, among others.

In this situation, we show in this thesis a new alternative that aims to improve the quality of the ballast stones that make naturally. The neobalast, or high performance ballast through a new surface treatment (coating further comprises a binder rubber particles from used tires-NFU) aims to extend the life of the ballast, anti-vibration and improve performance against noise, addition to reducing the environmental impact by using material from quarries.

Our goal is to approach the study of this new material from angles and multidisciplinary fields of knowledge, in order to meet the criteria of technical feasibility and economic production may allow the consolidation of this new material in the future, compared with traditional technology Natural ballast.



NUEVOS MATERIALES PARA SU EMPLEO COMO BALASTO

EN LÍNEAS DE FERROCARRIL

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	4
2. ESTADO DEL ARTE DE LA VÍA SOBRE BALASTO	5
2.1 LA VÍA SOBRE BALASTO	5
2.1.1 LOS CARRILES	6
2.1.2 FIJACIONES Y PLACAS DE ASIENTO	7
2.1.3 LAS TRAVIESAS	7
2.1.4 EL BALASTO	9
2.2 EL PAPEL DEL BALASTO	10
2.2.1 OBTENCIÓN DEL BALASTO Y TRANSPORTE	10
2.2.2 EMBALASTADO Y BATEO	11
2.2.3 GEOMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL BALASTO	12
2.2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEL BALASTO	14
2.3 CALIDAD GEOMÉTRICA DE LA VÍA	17
2.3.1 DEFECTOS GEOMÉTRICOS DE VÍA	17
2.3.2 CAUSAS DE LOS DEFECTOS GEOMÉTRICOS	18
2.3.3 IMPORTANCIA DEL BALASTO EN LA GEOMETRÍA DE VÍA	19
2.3.4 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE BALASTO	20
2.3.5 OPERACIONES DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA SOBRE BALASTO	22
2.4 DEGRADACIÓN DE LA CAPA DE BALASTO	25
2.4.1 VIDA ÚTIL DEL BALASTO	25
2.4.2 IMPORTANCIA DEL BALASTO EN EL DETERIORO DE LA VÍA	25
2.4.3 ESTUDIOS DEL COMITÉ D-117 DEL ORE	26
2.4.4 DETERIORO EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE BALASTO	29
2.4.5 RIGIDEEZ VERTICAL DE LA VÍA	29
2.5 MANTENIMIENTO Y REPERCUSIONES ECONÓMICAS	30
2.5.1 EL MANTENIMIENTO EN LA ACTUALIDAD	30
2.5.2 CRITERIOS DE INTERVENCIÓN EN LA VÍA	31
2.5.3 FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO	34
2.6 ARTICULOS RELACIONADOS CON EL COSTE DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA SOBRE BALASTO	37
2.6.1 INFRACOST-LICB (LASTING INFRASTRUCTURE BENCHMARKING)	37
2.6.2 REPORT DESCRIBING MAINTENANCE EXPERIENCES (JRTS, 1992)	40
2.6.3 TERRAPLENES Y BALASTO EN ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA.	41
2.6.4 LA AUSCULTACIÓN Y LOS TRABAJOS DE VÍA EN LA LÍNEA DEL AVE MADRID-SEVILLA	42
3. LA VÍA EN PLACA COMO ALTERNATIVA A LA VÍA EN BALASTO	43
3.1 INTRODUCCIÓN	43
3.2 DEFINICIÓN DE VÍA EN PLACA	47
3.3 LA INSTALACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE VÍA EN PLACA	49
3.4 COLOCACIÓN DIRECTA SOBRE LA EXPLANACIÓN	49
3.5 RUIDOS Y VIBRACIONES	51
3.6 COMPARATIVA VÍA EN PLACA-VÍA SOBRE BALASTO	54
3.7 ARTÍCULOS RELACIONADOS CON EL COSTE DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA EN PLACA	56
3.7.1 REPORT ILLUSTRATING ECONOMY OF SLAB TRACK (JRTS, 1992)	56
3.7.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DEFINICIÓN DEL EQUIPAMIENTO LAV MADRID-BARCELONA-FRONTERA FRANCESA	57



4. BALASTO ARTIFICIAL	59
4.1 LA INNOVACIÓN Y EL BALASTO	59
4.2 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, GEOMÉTRICAS Y FUNCIONALES DEL BALASTO ARTIFICIAL	61
4.3 INVESTIGACIÓN RELATIVA A MATERIALES APLICABLES EN LA PRODUCCIÓN DE BALASTO ARTIFICIAL	70
4.4 INVESTIGACIÓN SOBRE TÉCNICAS DE PREFABRICACIÓN APLICABLES	79
4.4.1 PRODUCCIÓN DE BALASTO ARTIFICIAL MEDIANTE MOLDES	79
4.4.2 PRODUCCIÓN DE BALASTO MEDIANTE MACHAQUEO DE BLOQUES	81
4.4.3 ELECCIÓN DEL MÉTODO PRODUCTIVO ÓPTIMO.....	84
4.4.4 ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA.....	86
4.4.5 REVISIÓN ESTUDIO ECONÓMICO.....	94
4.5 CONCLUSIONES.....	102
5. OTRAS TECNOLOGÍAS: XITRACKR Y ELASTOTRACKR	105
5.1 XITRACKRR	105
5.2 ELASTOTRACKR	107
5.3 ANÁLISIS DE LAS INNOVACIONES.....	108
6. UNA NUEVA PROPUESTA: EL NEOBALAST.....	109
6.1 NECESIDAD DEL PROYECTO NEOBALAST	109
6.2 ÁMBITO DE IMPACTO DE LA SOLUCIÓN	111
6.3 COMPONENTES DEL NEOBALAST	112
6.4 VALIDACIÓN DEL PROYECTO	114
6.4.1 ENSAYOS DE LABORATORIO	114
6.4.2 ENSAYO IN SITU.....	117
6.4.3 MODELO DE SIMULACIÓN	118
6.5 MEJORAS INTRODUCIDAS POR NEOBALAST. DESARROLLO	118
7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO	125
7.1 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO	125
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129



LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1- SECCIÓN TÍPICA DE VÍA EN BALASTO	6
FIGURA 2.2- CARIL UIC 60 (TGV)	6
FIGURA 2.3- FIJACIÓN ELÁSTICA TIPO OMEGA	7
FIGURA 2.4- TRAVIESAS DE HORMIGÓN MONOBLOQUE	8
FIGURA 2.5- TRAVIESAS SOBRE BALASTO	8
FIGURA 2.6- VÍA EN BALASTO	9
FIGURA 2.7- CANTERAS CON DISTINTIVO DE CALIDAD ADIF.....	11
FIGURA 2.8- MOVIMIENTO DE BATES DURANTE EL PROCESO DE BATEO DE VÍA.....	12
FIGURA 2.9- BATEADORA	12
FIGURA 2.10- HUSO GRANULOMÉTRICO PARA TODO TIPO DE BALASTOS	12
FIGURA 2.11- ÁBACO DE DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE DUREZA GLOBAL (DR)	15
FIGURA 2.12- ESQUEMA DE REFERENCIA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LAS FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL BALASTO.....	16
FIGURA 2.13- TIPOS DE DEFECTOS GEOMÉTRICOS DE LA VÍA	18
FIGURA 2.14- RELACIÓN ENTRE GEOMETRÍA DE VÍA Y ESTADO DEL MATERIAL QUE LA COMPONE (CHIARA PADERNO,2010).....	19
FIGURA 2.15- ASIENTOS EN FUNCIÓN DEL TRÁFICO DE LA CAPA DE BALASTO, SUBBALASTO Y PLATAFORMA	19
FIGURA 2.16- RESULTADOS DE TALBOT SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES BAJO TRAVIESA (TALBOT 1917)	20
FIGURA 2.17- DEFORMACIONES EN LA PLATAFORMA (FUENTE: A. LÓPEZ PITA)	21
FIGURA 2.18- EVALUACIÓN DE LA TENSIÓN ADMISIBLE POR LA CAPA DE BALASTO (FUENTE: A. LÓPEZ PITA)	21
FIGURA 2.19- DISTRIBUCIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN DEL BALASTO BAJO LAS TRAVIESAS (FUENTE: CABOS, 1977).....	25
FIGURA 2.20- EVOLUCIÓN DEL ASIENTO DE LA CAPA DE BALASTO BAJO CARGA DINÁMICA EN EL LABORATORIO	27
FIGURA 2.21- RELACIÓN ENTRE EL ASIENTO DE VÍA Y LA MAGNITUD DE LOS DEFECTO DE NIVELACIÓN LONGITUDINALES	28
FIGURA 2.22- DISPERSIÓN DEL DETERIORO DE LA VÍA EN DOS SECCIONES PRÓXIMAS (FUENTE: G. JANÍN).....	29
FIGURA 2.23- INFLUENCIA DEL ESPESOR DE BALASTO EN EL ASIENTO DE LA VÍA.....	29
FIGURA 2.24- RESULTADOS DEL COCHE DE REGISTRO DE VÍA Y APRECIACIÓN DE LA CALIDAD DE UNA VÍA	31
FIGURA 2.25- TRATAMIENTO NUMÉRICO DE LOS REGISTROS GEOMÉTRICOS DE LA VÍA (FUENTE: R. RIVIER)	32
FIGURA 2.26- EFICACIA DEL BATEO CON EL PASO DEL TIEMPO (FUENTE: ALAF)	36
FIGURA 2.27- MANTENIMIENTO DE VÍA EN LA LÍNEA PARÍS-SUD-EST (FUENTE: ESTRADÉ, 1996)	36
FIGURA 2.28- GASTO MEDIO ANUAL DE MANTENIMIENTO Y RENOVACIÓN POR KM DE VÍA PRINCIPAL NO ARMONIZADO (FUENTE: GRADINARIU 2005).....	38
FIGURA 2.29- GASTO MEDIO ANUAL DE MANTENIMIENTO Y RENOVACIÓN POR KM DE VÍA PRINCIPAL ARMONIZADO (FUENTE GRADINARIU 2005)	38
FIGURA 2.30- EVOLUCIÓN DE LOS COSTES DE MANTENIMIENTO Y RENOVACIÓN (1996-2003) (FUENTE GRADINARIU 2005).....	39
FIGURA 2.31- COSTES DE MANTENIMIENTO DE LOS TRAMOS CON VÍA SOBRE BALASTO DE LA LÍNEA TOHOKU SHINKANSEN	41

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1- IMÁGENES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y VISTA FINAL DE ACABADO DE VÍA EN PLACA	48
FIGURA 3.2- PICADO DE LOSA DE HORMIGÓN HASTA PRESOLERA	51
FIGURA 3.3- COMPARATIVA RENDIMIENTOS DE EJECUCIÓN DE OBRA	51
FIGURA 3.4- REDUCCIÓN SONORA PARA VÍAS DE ALTA VELOCIDAD.....	52

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1- SUELA BAJO TRAVIESA	60
FIGURA 4.2- EVOLUCIÓN DEL HUSO GRANULOMÉTRICO DE BALASTO A EN LA NORMATIVA ESPAÑOLA	62
FIGURA 4.3- ANÁLISIS DE RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE LA Y DIFERENTES ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL BALASTO	65
FIGURA 4.4- ANÁLISIS DE RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE LA Y EL ÍNDICE DE FORMA EN UNA DE LAS CANTERAS DE REFERENCIA ESTUDIADAS	66
FIGURA 4.5- RESULTADOS DEL ENSAYO DE (LA) VERSUS RESISTENCIA A COMPRESIÓN	67
FIGURA 4.6- PROBETAS DE ROCA EN CUBOS DE 4CM DE ARISTA PARA ENSAYO DE LA CON GEOMETRÍA ORDENADA	68
FIGURA 4.7- ENSAYO DE ROTURA DE VÉRTICE. GRÁFIC F-D Y CORRELACIÓN DE LA ENERGÍA DE ROTURA CON LA	68
FIGURA 4.8- CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA ARENA	71
FIGURA 4.9- CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA GRAVA.....	71
FIGURA 4.10- ESCORIAS	72
FIGURA 4.11- CENIZAS VOLANTES.....	72
FIGURA 4.12- HUMO DE SÍLICE ESPAÑOL	72
FIGURA 4.13- HUMO DE SÍLICE NORUEGO	72
FIGURA 4.14- ESQUEMA DE LOS ENSAYOS REALIZADOS POR ROTURA DE VÉRTICE	75
FIGURA 4.15- DISTRIBUCIÓN POROSA Y VOLUMEN TOTAL DE MERCURIO INTRUIDO ACUMULADO (PROPORCIONAL A LA POROSIDAD TOTAL DE LA MUESTRA) DEFINICIÓN DE L'OBRA	76
FIGURA 4.16- RESULTADOS DE LA PÉRDIDA DE PESO EN LOS DISTINTOS CICLOS Y ESQUEMA DEL ENSAYO	77
FIGURA 4.17- ESQUEMA DE PREFABRICACIÓN CON MOLDES ABIERTOS Y MÓVILES DEFINICIÓN DE L'OBRA	80
FIGURA 4.18- ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE BALASTO ARTIFICIAL.....	81



FIGURA 4.19-ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CANTERA DE BALASTO. FUENTE: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARA SUMINISTRO Y UTILIZACIÓN DE BALASTO	82
FIGURA 4.20- ESQUEMA DE LA PLANTA DE BALASTO ARTIFICIAL A PARTIR DE BLOQUES DE HORMIGÓN	83
FIGURA 4.21- ELEMENTOS DE UNA PLANTA DE TRITURACIÓN DE ÁRIDO	84

CAPITULO 5

FIGURA 5.1- RIEGO DE POLIURETANO SOBRE CAPA DE BALASTO XITRACKR	106
FIGURA 5.2- PIEDRAS ROCIADAS CON POLIURETANO XITRACKR	106
FIGURA 5.3- PROBETA DE BALASTO XITRACKR	107
FIGURA 5.4- BALASTO RECUBIERTO EN POLIURETANO ELASTOTRACKR.....	107

CAPITULO 6

FIGURA 6.1- PRIMERAS MUESTRAS DE NEOBALAST	112
FIGURA 6.2- MODELIZACIÓN DE LA CAPA DE BALASTO PARA ANÁLISIS DE SIMULACIÓN (FUENTE: A.LÓPEZ PITA)	118
FIGURA 6.3- DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN EL BALASTO EN FUNCIÓN DE LAS IMPUREZAS (FUENTE:ALAF).....	119
FIGURA 6.4- ELEMENTOS PARA REDUCCIÓN DE VIBRACIONES (FUENTE KRRI)	121
FIGURA 6.5- VUELO DE BALASTO.....	123

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

TABLA 2.1- CATEGORÍAS GRANULOMÉTRICAS. FUENTE UNE EN 13450.....	13
TABLA 2.2- CATEGORIAS PARA EL CONTENIDO DE PARTÍCULAS FINAS. FUENTE UNE EN 13450.....	13
TABLA 2.3- CATEGORÍAS PARA EL CONTENIDO DE FINOS. FUENTE UNE EN 13450	13
TABLA 2.4- ESPESORES DE BALASTO Y SUBBALASTO UTILIZADOS EN ALGUNAS REDES (1962)	20
TABLA 2.5- VALOR DE LOS PARÁMETROA A1 Y A0 DE CALIDAD DE VÍA	27
TABLA 2.6- VALOR DE LOS PARÁMETROS C1 Y C0 PARA LA LEY LOGARÍTMICA DE ASIENTO DE VÍA	28
TABLA 2.7- RELACIÓN ENTRE VELOCIDADES DE CIRCULACIÓN Y NIVELES DE CALIDAD EXIGIBLES UIC518 (1988)	34
TABLA 2.8- PERIODOS DE TIEMPO ENTRE AUSCULTACIONES EN LÍNEAS CONVENCIONALES Y EN LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN FRANCIA.....	35
TABLA 2.9- PERÍODOS D TIEMPO ENTRE AUSCULTACIONES LÍNEAS CONVENCIONALES Y LAV EN ALEMANIA.....	35
TABLA 2.10- OBJECTIUS DE L'ESTUDI COSTE DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA SOBRE BALASTO DE LA LÍNEA SANYO	40
TABLA 2.11- COSTE MEDIO DE MANTENIMIENTO EN ALGUNAS LAV CORRESPONDIENTE A LOS TRABAJOS MÁS RELEVANTES	42

CAPÍTULO 3

TABLA 3.1- PARÁMETROS COMPARATIVOS ENTRE VÍA SOBRE BALASTO Y VÍA SOBRE PLACA.....	46
TABLA 3.2- COSTES DE MANTENIMIENTO (1986) SIN INCLUIR COSTES SALARIALES DE LOS EMPLEADOS PARA VÍA EN PLACA	56
TABLA 3.3- COSTES DE MANTENIMIENTO SIN INCLUIR LOS COSTES SALARIALES DE LOS EMPLEADOS PARA VÍA SOBRE BALASTO	56
TABLA 3.4- COSTES DIRECTOS DE MANTENIMIENTO DE LA LÍNEA MADRID-SEVILLA. AÑO 1997	57

CAPÍTULO 4

TABLA 4.1- DOSIFICACIÓN EN KG DE HAC2 CON UN 15% DE CONTENIDO EN PESO DE CEMENTO DE CENIZAS VOLANTES	72
TABLA 4.2- DOSIFICACIÓN MORTEROS DISEÑADOS PARA ENSAYOS	73
TABLA 4.3- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	74
TABLA 4.4- RESISTENCIAS MECÁNICAS EN MPA A LOS DIETE DÍAS DEL MORTERO M20	75
TABLA 4.5- RESULTADOS DEL ENSAYO DE LOS ANGELES. NORMA UNE EN 1097-2	76
TABLA 4.6- VALORES DE RESISTIVIDAD DE LA DOSIFICACIÓN PROPUESTA Y EL MORTERO DE REFERENCIA DEFINICIÓN DE L'OBRA...77	77
TABLA 4.7- RESULTADOS DE DUREZA	78
TABLA 4.8- INVERSIÓN TOTAL INICIAL BLOQUES DE HORMIGÓN.....	89
TABLA 4.9- RESULTOS PROPUESTA BLOQUE DE HORMIGÓN	90
TABLA 4.10- INVERSIÓN TOTAL INICIAL MOLDES	93
TABLA 4.11- RESULTADOS PROPUESTA MOLDES	93
TABLA 4.12- INVERSIÓN TOTAL INICIAL BLOQUE DE HORMIGÓN (AJUSTE)	97
TABLA 4.13- RESULTADOS PROPUESTA BLOQUE DE HORMIGÓN (AJUSTE)	97
TABLA 4.14- INVERSIÓN TOTAL INICIAL POR MOLDES (AJUSTE)	99
TABLA 4.15- RESULTADOS PROPUESTA POR MOLDES (AJUSTE).....	100

CAPÍTULO 6

TABLA 6.1- DISTRIBUCIÓN POR BASES DEL BALASTO PREVISTO PARA LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD 2013-2014	111
TABLA 6.2- MODALIDADES DE TRATAMIENTO DE LOS NFU'S EN ESPAÑA Y LA UR DE LOS 15	113
TABLA 6.3- NORMATIVA ESPAÑOLA ACTUAL Y ANTIGUA	117



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La vía con balasto es una tipología de infraestructura ferroviaria avalada por la práctica y con aplicación actual y futura en líneas ferroviarias de altas prestaciones, entre ellas las líneas de alta velocidad (LAV).

Las ventajas de la tipología de vía con balasto son múltiples, entre las que cabe citar la economía de construcción, la posibilidad de corregir la geometría de la vía a lo largo de su vida útil mediante operaciones de bateo, la rapidez en las operaciones de construcción, nivelación y reparación. El balasto es además un material que confiere a la vía flexibilidad, amortiguamiento y atenuación de ruido y vibraciones.

Sin embargo, la solución de vía con balasto cuenta con desventajas que pueden, de forma muy esquemática y simplificada, resumirse en la necesidad de operaciones de mantenimiento de la geometría de la vía relativamente frecuentes y una vida útil relativamente corta del balasto (entre 15 y 30 años).

La tendencia a la mejora de materiales, con aplicación de la ingeniería y de la ciencia de materiales, ha llegado a los componentes de la infraestructura ferroviaria de forma descendente (carriles, sujeciones, traviesas). Centrándonos en el conjunto de vía, se destacan: la mejora introducida con el paso de las traviesas de madera hacia las de hormigón armado, el paso de las fijaciones rígidas hacia las elásticas, la utilización de



suelas bajo traviesas para mejorar el apoyo de las mismas y la soldadura de los carriles para evitar la discontinuidad de la superficie de rodadura entre otras.

A pesar de todas las mejoras introducidas, el balasto es el elemento de vía sobre el cual no se ha innovado y presenta, como hemos visto anteriormente, inconvenientes que necesitan soluciones reales en el corto plazo.

La necesidad de prolongar la vida útil de la capa de balasto, conjuntamente con la demanda ambiental de reducir la utilización de las materias primas, obligan a buscar soluciones inmediatas a los problemas relacionados con el deterioro del conjunto de balasto.

Así, la alternativa de la vía en placa como sustituta de la vía sobre balasto, plantea un escenario en el que se garantiza unas mejores condiciones de comportamiento para la infraestructura en base a la calidad geométrica ofrecida y a un mínimo mantenimiento, aunque, por el contrario, la vía en placa ha sido y siempre será mas costosa que una vía tradicional de balasto. Otros aspectos como el peor comportamiento frente a vibraciones y ruido de la vía en placa y unos procesos de montaje más laboriosos, producen que esta tipología de vía no cumpla todas las expectativas marcadas, y se aplique, de forma específica en casos concretos (zonas de difícil acceso como túneles y viaductos) y en determinadas infraestructuras (transporte urbano de ferrocarril con requerimientos basados principalmente en un mínimo mantenimiento).

De este modo, la lógica de mejora produce que el balasto se presente como el siguiente material susceptible de ser abordado desde el punto de vista del diseño y de su producción industrial, dentro de la tendencia, generalizada en el ámbito de la ingeniería civil y de la edificación, de sustitución de materiales naturales por materiales artificiales de mayores prestaciones. Las líneas de trabajo existentes buscan encontrar una solución que se sitúe entre la vía con balasto natural y la vía en placa, potenciando las cualidades del balasto (medio granular) y las de la vía en placa (diseño y material controlado). Esta solución intermedia no había sido ni planteada ni investigada anteriormente. Con esta idea se inicia una nueva aproximación al diseño de infraestructuras ferroviarias, con posible aplicación a medio o largo plazo, pero cuyas ventajas potenciales justifican que se haya abordado de forma temprana.

La primera propuesta (balasto artificial), está orientada al estudio de un nuevo material granular artificial, aplicable en infraestructuras ferroviarias, que pueda sustituir al balasto natural y mejore las características funcionales de esta capa de asiento sin perder sus ventajas como capa de ajuste geométrico. Este proyecto se encuentra en estos momentos en fase de estudio de viabilidad técnica y de investigación inicial. En él se han abordado estudios y las líneas de investigación necesarios para desarrollar el nuevo material, orientados, desde el estado actual del conocimiento y de la técnica, a definir un material de características adecuadas, cuya producción sea abordable a nivel industrial, de coste mínimo y que sea compatible con una aplicación a medio plazo como alternativa mejorada al balasto natural en líneas ferroviarias.

La segunda línea de trabajo son las innovaciones basadas en los agregados de poliuretano sobre el balasto. La utilización del poliuretano como protección de los granos les aporta una mayor durabilidad. A pesar de ello, existen una serie de factores que hacen estos productos poco atractivos para la implantación en líneas enteras (imposibilidad de reparación de defectos mediante bateo, disminuciones de permeabilidad de la vía, tiempos de curado etc)



Finalmente, en la presente tesina presentamos un nuevo proyecto, el balasto de altas prestaciones o “neobalast”, el cual busca dotar de mayores prestaciones al balasto mediante un nuevo tratamiento superficial (recubrimiento formado por un aglomerante más partículas de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso-NFU).

La fricción entre las diferentes partículas del balasto van desgastando sus caras perdiendo paulatinamente parte de las principales propiedades requeridas a la banqueta de balasto (principalmente la estabilidad lateral y asentamiento verticales), teniendo que proceder a acciones periódicas de bateo y en última instancia a su renovación parcial/total. Además la atrición del balasto natural durante su vida útil va contaminando también de finos la banqueta, haciendo que ésta pierda sus propiedades. El objeto principal del “neobalast” será tratar el balasto para conseguir mayor durabilidad y así, poder reducir los costes de explotación y mantenimiento, siendo esto aplicable a las líneas ferroviarias existentes y futuras.

Otro objetivo importante es dotar al balasto de mayores prestaciones, no sólo a nivel de durabilidad como en el punto anterior, sino a nivel de comportamiento frente a ruido y vibraciones. De todos es sabido la importancia que ha ido tomando este aspecto en las infraestructuras ferroviarias –al ir incrementando las velocidades máximas también se están generando mayores esfuerzos dinámicos que se traducen en mayor ruido y vibraciones- desarrollando elementos a incorporar en la sección de vía como mantas elastoméricas, suelas bajo traviesa, placas de asiento, etc. Al introducir en la mezcla- envoltorio del balasto partículas de caucho (provenientes de neumáticos reciclados), el comportamiento en este aspecto debe mejorar de forma ostensible, por lo que se espera poder reducir alguno de los elementos anteriormente citados. Otra de las finalidades del “neobalast” es la de minimizar la problemática de la escasez de materiales con características adecuadas para su uso como balasto en infraestructuras ferroviarias. A mayor durabilidad, menor necesidad de materiales, y además, el recubrimiento del balasto debe mejorar ciertas propiedades de algunos materiales que no pueden ser usados actualmente (básicamente balasto reciclado y áridos que no cumplen al 100% las especificaciones técnicas).

Tal y como se especifica en el Pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios, los requisitos que deben cumplir los materiales mencionados son muy estrictos. Cuanto mayor son los requisitos exigidos, mayor es la dificultad para encontrar áridos naturales que los cumplan y, a su vez, mayor es el coste del transporte, ya que hay que buscarlos en ubicaciones lejanas a la obra. Actualmente el árido utilizado para balasto es natural, procedente de canteras de roca. Canteras que tienen que tener una homologación dada por Adif. Todo ello redundará en mayores costes de ejecución de obra y efectos ambientales adversos derivados de las emisiones del transporte.

También se pretende mejorar la concienciación medioambiental, por lo que la búsqueda de materiales debe ir reduciendo el uso de canteras, traduciéndose en un aprovechamiento y reutilización de todos aquellos recursos al alcance de la industria.



1.2 OBJETIVOS

Dado que parece muy conveniente ampliar el conocimiento sobre el balasto natural en todos los aspectos, pero especialmente urgente avanzar en el aspecto experimental, la presente tesina tiene por objeto abordar el estudio del neobalast, o balasto de altas prestaciones, que se encuentra en la actualidad en vía de desarrollo, mediante una investigación desde ángulos y campos de conocimiento multidisciplinarios, a fin de poder conocer los criterios de viabilidad técnica, productiva y económica que podrán permitir la consolidación de este nuevo material en un futuro.

Para ello, y fruto de una intensa revisión bibliográfica, se da a conocer primeramente el estado del conocimiento de la vía sobre balasto natural (fundamentos, propiedades, normativa y tipologías), de la alternativa mediante vía en placa, y de otras líneas de investigación existentes como son el balasto artificial y los agregados de poliuretano.

De esta manera, a partir de las necesidades de mejora e innovación del balasto, procederemos a realizar un recorrido por todos los proyectos existentes a día de hoy, analizando la fase actual en la que se encuentran dichos proyectos, aspectos contrapuestos y mejoras a desarrollar.

En resumen, al final de esta tesina podremos llegar a afirmar que la producción de estos nuevos materiales está todavía muy alejada de los requisitos exigibles para poder aplicar este tipo de tecnología en la construcción de infraestructuras ferroviarias reales. Pero si que podremos considerar las líneas de trabajo de estos materiales como un primer paso para avanzar en el conocimiento y en las limitaciones del material, y por lo tanto de las oportunidades de mejora en su conocimiento y caracterización.



CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE DE LA VÍA SOBRE BALASTO

2.1 LA VIA SOBRE BALASTO.

La vía férrea tradicional está constituida por una serie de elementos que permiten el guiado de los trenes y el soporte de las cargas inducidas por su circulación. Esta se encuentra conformada por la superestructura que abarca los carriles, las fijaciones, las placas de asiento, las traviesas, el balasto y el subbalasto, y la infraestructura que está conformada por la plataforma (Fig. 2.1).

Los elementos que conforman la superestructura se encargan de transmitir las cargas de los trenes hacia la plataforma, disminuyendo las tensiones a medida que se transmiten de elemento a elemento. La disminución de estas cargas se efectúa aumentando las respectivas superficies de contacto entre componentes de la superestructura reduciendo las tensiones iniciales del contacto rueda-carril en 20.000 veces hasta alcanzar la plataforma. De este modo las tensiones de 300 MPa que se generan en el contacto rueda-carril, alcanzan la plataforma con un valor inferior al de punzonamiento de la misma.

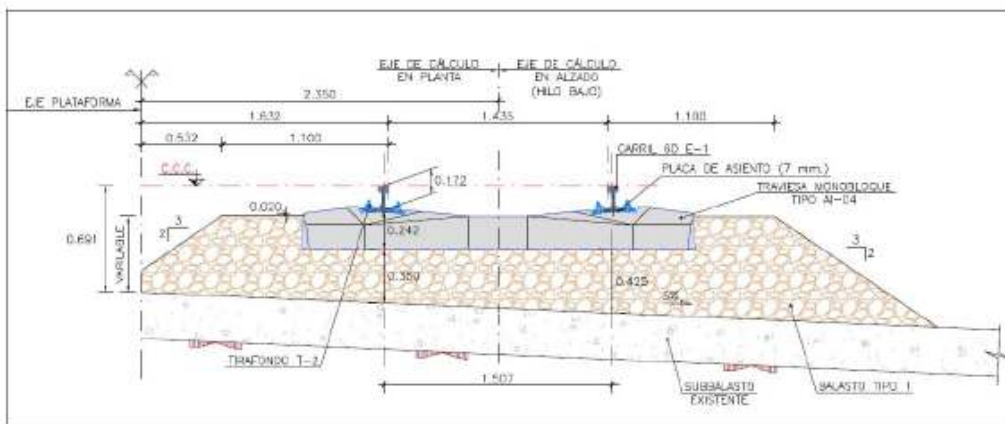


Figura 2.1 Sección típica de vía en balasto.

2.1.1 Los carriles.

Los carriles son los elementos de contacto entre el vehículo y la vía. Estos desempeñan un rol muy importante asegurando:

- La transmisión y redistribución de cargas verticales desde las ruedas hacia las traviesas a través de las placas de asiento.
- El guiado lateral de las ruedas y por tanto la absorción y transmisión de los esfuerzos transversales y la transmisión a las traviesas.
- Una superficie de rodadura lisa y la distribución de esfuerzos de frenado y de aceleración
- El retorno de la corriente de tracción de las líneas electrificadas, y la conducción de corriente para los circuitos de vía para los aparatos de seguridad.

En un carril se diferencian tres partes: cabeza, patín y el alma (Fig. 2.2). A su vez los distintos tipos de carriles se diferencian por su peso por metro lineal, que se encuentra estandarizado en algunos valores de referencia: 45 kg/ml, 49 kg/ml, 54 kg/ml y 60 kg/ml. Los primeros dos tipos se utilizan mayormente en líneas secundarias, el de 54 se utiliza en líneas con velocidades de entre 140 y 160 km/h, mientras que los carriles de 60 se utilizan en líneas con velocidades mayores a los 160 km/h.



Figura 2.2 Carril UIC 60 (TGV).



2.1.2 Fijaciones y placas de asiento.

En los comienzos del ferrocarril las fijaciones carril-traviesa se realizaban de manera rígida, mediante escarpas o tirafondos. El paso del tiempo puso de manifiesto que este tipo de fijación se aflojaba y dejaban de cumplir su función de manera correcta por lo que se comenzaron a implementar las fijaciones de tipo elásticas que son las que se utilizan comúnmente en la actualidad (Fig. 2.3).



Figura 2.3 Fijación elástica tipo Omega.

El sistema de fijación permite una conexión segura de carriles a traviesas. Sus principales funciones son:

- La transmisión de cargas del carril a la traviesa, y el amortiguamiento de las vibraciones que produce el paso del material rodante.
- La resistencia longitudinal a movimientos por dilatación de los carriles soldados y el arriostamiento frente a pandeo.
- Posicionar el carril en la elevación e inclinación deseadas.
- El aislamiento eléctrico de los carriles.

2.1.3 Las traviesas.

Las traviesas tienen varias funciones. Proporcionan en particular:

- La transmisión de cargas de los carriles al balasto
- Propician la elevación e inclinación de 1/20 de la superficie de los carriles
- Brindan resistencia mecánica suficiente en dirección vertical y horizontal

Inicialmente las traviesas se hicieron de metal y de madera aumentando su estabilidad y resistencia con la invención del hormigón armado. Los únicos inconvenientes que han acarreado estos componentes se deben a su baja capacidad de absorber vibraciones y al elevado peso. A pesar de estos inconvenientes, las traviesas de hormigón armado (Fig. 2.4 y 2.5) son las más utilizadas en las vías principales y de alta velocidad. Las traviesas se apoyan sobre el balasto, el cual dota de una mayor resistencia lateral y longitudinal de la vía.

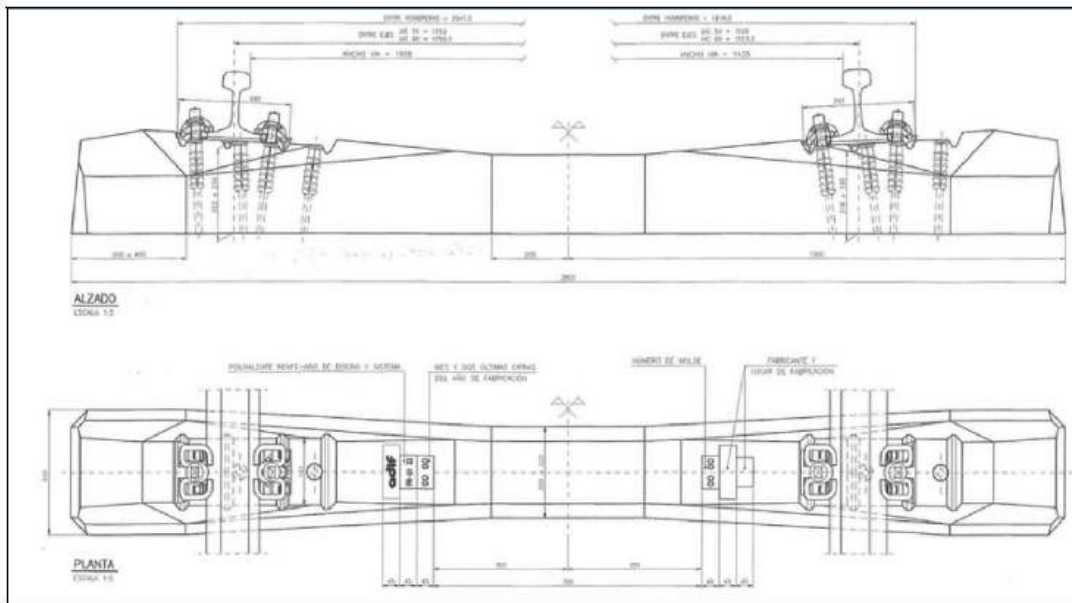


Figura 2.4 Traviesas de hormigón monobloque.



Figura 2.5 Traviesas sobre balasto.

En lo que respecta a las innovaciones introducidas en la superficie de contacto de las traviesas con la capa del balasto, destacan las suelas bajo traviesa que aumentan la superficie de contacto entre estos materiales y reducen las tensiones sobre los bordes de las traviesas. Su utilización en líneas de alta velocidad mostró una mejora de la vida del balasto, una mejor absorción de ruido y reducción de vibraciones y de asentamientos locales.



2.1.4 El balasto.

La capa de material granular que se coloca bajo las traviesas (Fig.2.6) desempeña un importante papel en el comportamiento de una vía frente a las acciones tanto verticales como transversales ejercidas por el material ferroviario, así como frente a las acciones climáticas. El material utilizado proviene de rocas con altas resistencias a compresión e impacto. Estas suelen tener origen ígneo o metamórfico, aunque en algunas partes del mundo se utilizan también rocas sedimentarias.



Figura 2.6 Vía en balasto

En el ámbito de los esfuerzos verticales, el balasto debe cumplir tres funciones principales:

- a) Contribuir a proporcionar elasticidad y amortiguamiento a la vía, para reducir la magnitud de las sollicitaciones dinámicas ejercidas por los vehículos
- b) Disminuir el nivel de presiones que llegue a la superficie de la plataforma, para evitar que supere la capacidad resistente
- c) Soportar la abrasión que las partículas pueden tener como consecuencia de su contacto con infraestructuras rígidas, tal como sucede en las vías que discurren sobre puentes de hormigón.



2.2 EL PAPEL DEL BALASTO

La vía en balasto ha sido y es, la tipología que predomina en los tendidos ferroviarios construidos alrededor del mundo. A pesar de la reciente aplicación de las losas de hormigón como variante de la vía tradicional, conformando la vía en placa, el predominio de las vías en balasto es absoluto y esto se justifica debido al menor coste que requieren este tipo de infraestructuras.

Dentro de las funciones más importantes que aporta la capa de balasto al conjunto de la infraestructura, podemos destacar:

- La transmisión uniforme hacia la plataforma de las tensiones recibidas de las traviesas producidas por la circulación de formaciones.
- La dotación de una elasticidad determinada al conjunto de vía.
- La estabilización de las traviesas, frente a las cargas longitudinales y transversales producidas por los trenes.
- La amortiguación de las vibraciones y la absorción del ruido, dotando de una mayor calidad y confort a la circulación.
- La estructura semirrígida que permite realizar correcciones del perfil en caso de deformaciones mediante el bateo, nivelación y estabilización.
- El drenaje eficaz de la estructura de vía eliminando de esta manera los problemas de hielo y deshielo.

Para cumplir las funciones mencionadas, es necesario disponer de un cierto espesor de balasto. Esta magnitud se sitúa entre 25 y 35 cm ya que con valores inferiores no se lograría el objetivo perseguido y con valores superiores se incrementaría el asiento de vía y previsiblemente el aumento también de los defectos geométricos. Para hacer frente a la abrasión, se exige que el balasto tenga un cierto coeficiente de Deval, en general mayor a 15.

2.2.1 Obtención del balasto y transporte.

El balasto se obtiene por trituración de rocas sanas y debe cumplir ciertas especificaciones en cuanto a calidad del material madre y en su granulometría. Se transporta en camiones hasta donde puede ser cargado en trenes especiales con tolvas que permiten su descarga en la vía.

Según lo establecido por la norma UNE EN 13450 el balasto deberá proceder de:

- La extracción de rocas de cantera, seguida de machaqueo, cribado y clasificación, con o sin posterior tratamiento industrial que implique una modificación térmica o de otro tipo.
- La reutilización de balasto procedente de obras ferroviarias.

Las rocas para extracción del balasto han de ser de naturaleza silíceas y, preferentemente, de origen ígneo o metamórfico. Por tanto no se admitirán las de naturaleza caliza ni dolomítica.

Asimismo el balasto no podrá contener fragmentos de: madera, materia orgánica, metales, plásticos, rocas alterables, ni de materiales tixotrópicos, expansivos, solubles, putrescibles, combustibles ni polucionantes (desechos industriales).

Tampoco se admitirá balasto constituido por cantos rodados ni por mezcla de rocas de diferente naturaleza geológica.

Cuanto mayor son los requisitos exigidos, mayor es la dificultad para encontrar áridos naturales que los cumplan y, a su vez, mayor es el coste del transporte, ya que hay que buscarlos en ubicaciones lejanas a la obra. Es entonces, que existen solo una serie de canteras dentro del territorio español que constan de una certificación emitida por Adif y garantiza la calidad del balasto exigida (Fig. 2.7).

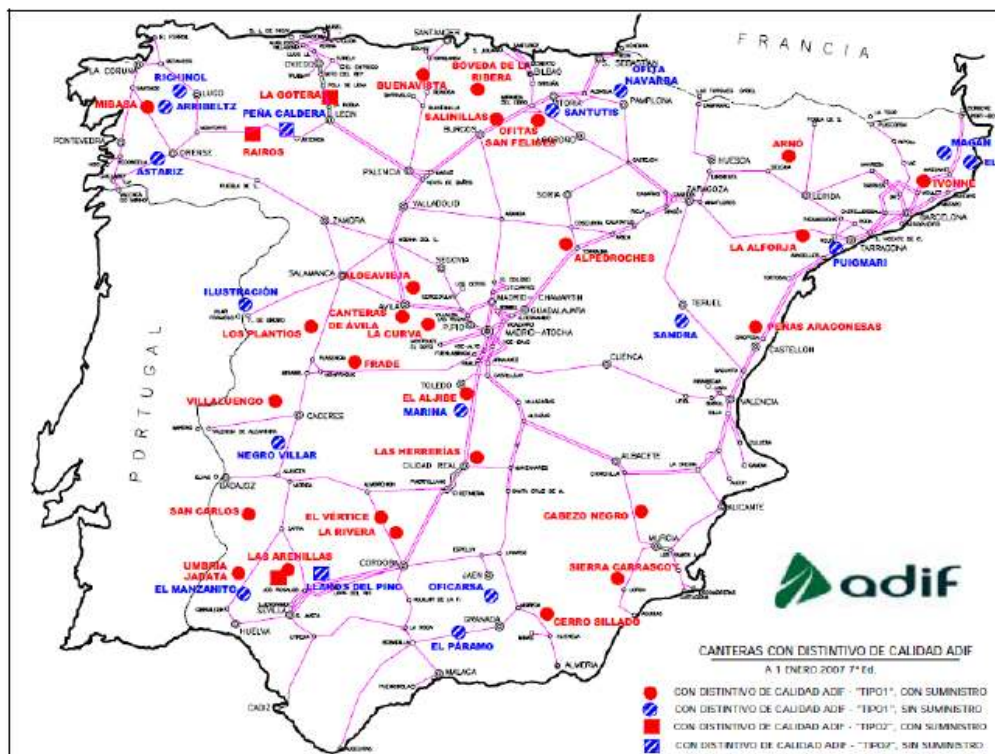


Figura 2.7 Canteras con distintivo de calidad ADIF

2.2.2 Embalastado y bateo.

Uno de los procedimientos para efectuar el montaje de una vía es colocar inicialmente el emparrillado de la vía y hacer circular sobre él los vagones tolvas que descargan el balasto sobre la infraestructura. Para que el balasto proporcione el apoyo requerido a las traviesas es necesario que las partículas que configuran dicha capa, experimenten un proceso de compactación mediante la realización de una operación llamada bateo de la vía.

Esta operación de bateo consiste en la introducción bajo la cara inferior de las traviesas de unos bates metálicos vibratorios (Fig. 2.8) que llevan a cabo la citada compactación del balasto. El ferrocarril dispone para ello, de las denominadas maquinas bateadoras un ejemplo de las cuales se muestra en la figura 2.9. Para que el bateo sea posible y eficaz, es preciso que las partículas de balasto tengan unas ciertas dimensiones que faciliten el bateo y una dureza determinada para que la inmersión de los bates en la capa de balasto no la deteriore en exceso.

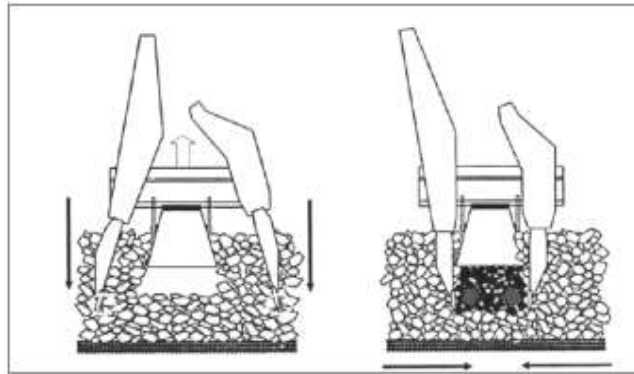


Figura 2.8 Movimiento de bates durante el proceso de bateo de vía.



Figura 2.9 Batedora.

2.2.3 Geometría y distribución granulométrica del balasto.

Normativa Europea.

Desde el punto de vista práctico, la experiencia ha puesto de relieve la idoneidad de disponer partículas de balasto con tamaños comprendidos entre 20 y 60 mm. En la figura 2.10 se muestra el huso granulométrico del balasto para todo tipo de líneas y condiciones de explotación Ferroviaria según la orden FOM 1269:2006.

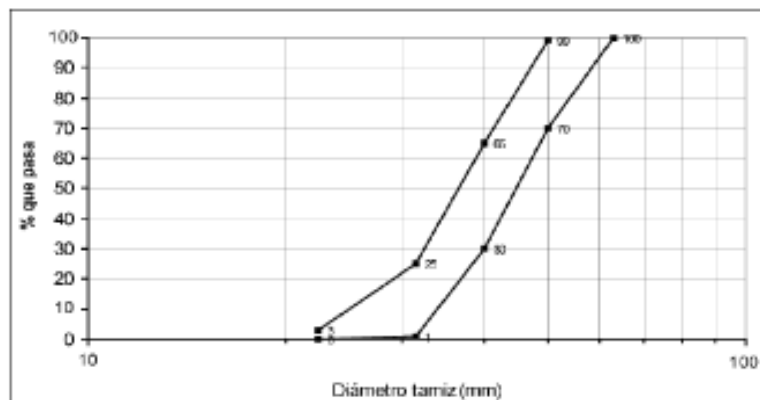


Figura 2.10 Huso granulométrico para todo tipo de balastos.



Dentro de los husos granulométricos permitidos por la normativa, existen distintas categorías de balasto en función de la distribución granulométrica. En la tabla 2.1, extraída de la norma UNE EN 13450, se distinguen los tipos de balasto clasificados de la A a la F, siendo los primeros los de mayor utilización y calidad.

Tamaño de tamiz mm	Tamaño de balasto 31,5 mm a 50 mm			Tamaño de balasto 31,5 mm a 63 mm		
	Porcentaje que pasa en masa (%)					
	Categoría granulométrica					
	A	B	C	D	E	F
80	100	100	100	100	100	100
63	100	97 a 100	95 a 100	97 a 99	95 a 99	93 a 99
50	70 a 99	70 a 99	70 a 99	65 a 99	55 a 99	45 a 70
40	30 a 65	30 a 70	25 a 75	30 a 65	25 a 75	15 a 40
31,5	1 a 25	1 a 25	1 a 25	1 a 25	1 a 25	0 a 7
22,4	0 a 3	0 a 3	0 a 3	0 a 3	0 a 3	0 a 7
31,5 a 50	≥ 50	≥ 50	≥ 50	–	–	–
31,5 a 63	–	–	–	≥ 50	≥ 50	≥ 85

NOTA 1 – La especificación de pasar por el tamiz de 22,4 mm se aplica al balasto cuyas muestras se hubieran tomado en el lugar de producción.

NOTA 2 – En algunas circunstancias, se podrá emplear como alternativa un tamiz de 25 mm en lugar del tamiz de 22,4 mm, aplicándose una tolerancia de 0 a 5 (0 a 7 para la categoría F).

Tabla 2.1 Categorías Granulométricas. Fuente: UNE EN 13450

Conjuntamente con la clasificación general, se debe tener en cuenta que las porciones de material fino de las distintas categorías de balasto no excedan unos máximos establecidos. Este condicionante tiene por objeto evitar que se pierda la porosidad de la capa de balasto y la pérdida de las características elásticas de ésta. En las tablas 2.2 y 2.3 se determinan los valores anteriormente mencionados (UNE EN 13450).

Tamaño de tamiz mm	Porcentaje máximo que pasa en masa			
	Categoría de partículas finas			
	A	B	Declarada	C
0,5	0,6	1,0	> 1,0	Sin especificación

NOTA – La especificación se aplica al balasto cuyas muestras se hubieran tomado en el lugar de producción.

Tabla 2.2 Categorías para el contenido de partículas finas. Fuente: UNE EN 13450

Tamaño de tamiz mm	Porcentaje máximo que pasa en masa				
	Categoría de partículas de finos				
	A	B	C	Declarada	D
0,063	0,5	1,0	1,5	> 1,5	Sin especificación

NOTA – La especificación se aplica al balasto cuyas muestras se hubieran tomado en el lugar de producción.

Tabla 2.3 Categorías para el contenido de finos. Fuente: UNE EN 13450

En paralelo se obliga a reducir al mínimo la presencia de partículas lajosas, tanto por la dificultad que presenta su bateo, como por su tendencia al deslizamiento. De este modo



las normativa establece que las partículas que forman el balasto tendrán formas poliédricas definidas por caras de fractura con aristas vivas, con la dimensión mayor no superior a 3 veces la dimensión menor (espesor). A su vez el espesor mínimo de los elementos granulares será de 25 mm y el porcentaje de piedras cuya longitud máxima sea superior a 100 mm será $\leq 4\%$

2.2.4 Propiedades mecánicas y físicas del balasto.

Cuando el eje de un vehículo se desplaza a lo largo de la vía, se producen en ésta dos fenómenos simultáneos: el primero una flexión vertical que, en función de la capacidad vertical resistente, afecta a una mayor o menor longitud de vía (3 a 4 metros); el segundo, el levantamiento de una parte delantera de la vía en la dirección al movimiento.

La deflexión vertical presenta un valor máximo bajo el punto de aplicación de la carga (eje del vehículo) que suele oscilar entre 1,5 y 2 mm bajo la acción de una carga por rueda de 10 toneladas. La magnitud de la onda de levante suele ser de aproximadamente 1/10 de la deflexión vertical, es decir, de 0,15 a 0,20 mm. Aun cuando la pequeña elevación de la vía y su posterior anulación al continuar el movimiento de los vehículos pudieran parecer no tener influencia práctica, la realidad es distinta.

En efecto, el sucesivo golpeteo de las traviesas sobre el balasto, correspondiente a los sucesivos ejes que pasan por una vía (el paso de un solo tren de mercancías puede representar el efecto de más de 150 ejes) y el cada vez mayor uso de traviesas pesadas (300 a 380 kg) frente a las primitivas traviesas de madera (80 kg de peso), pueden ocasionar un rápido deterioro de las partículas de balasto.

Para cumplir con la condición de dureza, se exige que la roca de origen de las partículas de balasto tenga una a compresión simple de al menos 120 MPa. Las rocas que más frecuentemente cumplen estas condiciones son las de origen ígneo y metamórfico.

En lo que respecta a los criterios de fragmentación del balasto, se exige que este material tenga un coeficiente de Los Ángeles (CLA) inferior a un cierto valor. Los criterios de referencia se sitúan en las siguientes magnitudes: CLA ≤ 15 para líneas con velocidades máximas iguales o superiores a 200 km/h, y CLA ≤ 18 para las líneas convencionales.

En función del tipo de balasto, la norma UNE EN 13450 define los valores del CLA requerido. Para el balasto tipo 1 el CLA ha de ser igual o inferior a 14%, para el tipo 2 igual o inferior al 16 % y por último el balasto clase 3 ha de tener un CLA $\leq 20\%$.

Con ocasión de la construcción de líneas de alta velocidad en Europa, los ferrocarriles franceses establecieron, para el balasto, el denominado coeficiente de dureza global (DR), que agrupa los coeficientes anteriores indicados: Coeficiente de Deval y coeficiente de Los Ángeles (Fig. 2.11). Para las líneas principales con velocidades de hasta 200 km/h y fuerte tráfico, el coeficiente de dureza global deseable se sitúa en el entorno de 17. Para líneas de alta velocidad el valor requerido es de 20.

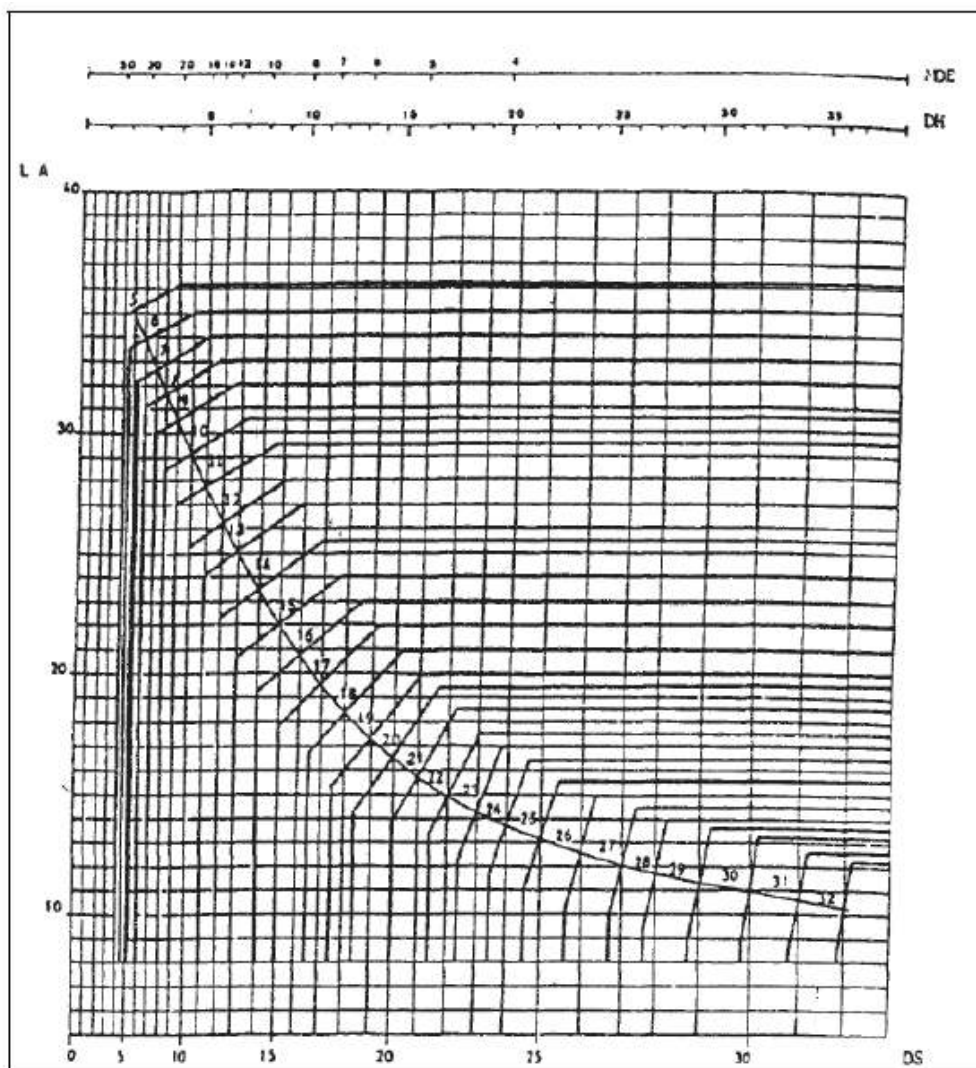


Figura 2.11 Ábaco de determinación de coeficiente de dureza global (DR).

Nótese en la citada figura 2.11 como para el primer grupo de líneas ($V \leq 200$ km/h) un DR de 17 corresponde a un coeficiente de Los Ángeles de 20 y un coeficiente de Deval superior a 15. Para líneas de alta velocidad, en donde $DR = 20$, los coeficientes de resistencia a la fragmentación (Los Ángeles) y de resistencia a la abrasión (Deval) se sitúan en torno de 17 y 20 respectivamente.

Con carácter de síntesis; en la figura 2.12 se expone un esquema de referencia para reducir las funciones que cabe exigir a los materiales utilizables como balasto, incluyendo también las variables de resistencia, tamaño o forma que permiten verificar el mayor o menor cumplimiento de las citadas funciones.

Por su parte, los procedimientos técnicos que se emplean en la caracterización de las variables del balasto natural se encuentran sometidos a las disposiciones establecidas en las siguientes normas:

- UNE EN 13450 (Áridos para balasto)
- UNE EN 932 (Ensayos para determinar propiedades generales de los áridos)
- UNE EN 933 (Ensayos para determinar propiedades geométricas de los áridos)



- UNE EN 1097 (Ensayos para determinar propiedades mecánicas y físicas de los áridos)
- UNE EN 1367 (Ensayos para determinar propiedades térmicas y de alteración de los áridos)
- DC UNE 103 401 (Ensayo de corte directo en suelos)
- ORDEN FOM 1269 (balasto y subbalasto)
- NRV 340 (balasto)
- UIC 518 (geometría de vía)
- AREMA Volumen 1, Capítulo 1, Apartado 2 (balasto)
- ASTM D5321-12 (Ensayo de corte directo para geosintéticos)

Elemento que desencadena la función	Esquema de actuación	Función del balasto	Factor commensurable
Acciones Verticales		Proporcionar elasticidad y amortiguamiento	Espesor de balasto
		Resistencia a la abrasión	Coefficiente Deval
		Disminución de presiones sobre la plataforma	Espesor de balasto
		Dimensiones, Dureza	Tamaños granulométricos Resistencia a compresión roca
Acciones Horizontales		Dimensiones Compactación	Tamaños Granulometría
		Filtración Resistencia al hielo	Granulometría Resistencia a los Sulfatos

Figura 2.12 Esquema de referencia para el establecimiento de las funciones y características del balasto.



2.3 CALIDAD GEOMETRICA DE LA VIA.

La calidad geométrica de la vía tiene un papel fundamental en la seguridad, en el confort y en la fiabilidad de las infraestructuras ferroviarias y, consecuentemente, en la determinación de las acciones de manutención. Estas requieren importantes recursos financieros, por lo que se torna esencial estudiar con rigor la evolución de las características de la vía durante el período de vida útil del sistema.

2.3.1 Defectos geométricos de vía.

La experiencia alcanzada a través de la explotación de líneas de ferrocarril ha puesto de manifiesto que, en relación con la calidad de la vía, como camino de rodadura, era posible obtener información suficiente si se conocía y cuantificaba la magnitud de los siguientes parámetros:

- Nivelación longitudinal de cada hilo de carril
- Nivelación transversal entre ambos hilos de carril
- Ancho de vía
- Alineación de cada uno de los dos carriles
- Alabeo

Se establecen las siguientes definiciones asociadas a cada uno de los términos indicados anteriormente y se visualizan en la figura 2.13.

Nivelación longitudinal

Parámetro que define las variaciones de cota de la superficie de rodadura de cada hilo de carril, respecto a un plano de comparación.

Nivelación transversal

Parámetro que establece la diferencia de cota existente entre las superficies de rodadura de los hilos de carril en una sección normal al eje de la vía.

Ancho de vía

Parámetro que determina la distancia existente entre las caras activas de las cabezas de los carriles, a 14 mm, por debajo de la superficie de rodadura.

Alineación

Parámetro que, para cada hilo de carril, representa la distancia en planta respecto a la alineación teórica.

Alabeo

Parámetro que representa la distancia entre un punto existente de la vía y el plano formado por los otros tres puntos.

Con carácter de síntesis, puede decirse que los defectos de nivelación longitudinal, medidos en mm, afectan al movimiento de galope de los vehículos. Los defectos de nivelación transversal afectan al balanceo de los vehículos. Las irregularidades existentes en el ancho de vía inciden en el movimiento trasversal (o de lazo) de los vehículos, así como los defectos de alineación. Finalmente los defectos de alabeo en una vía pueden ser la causa del descarrilamiento de los vehículos ferroviarios.

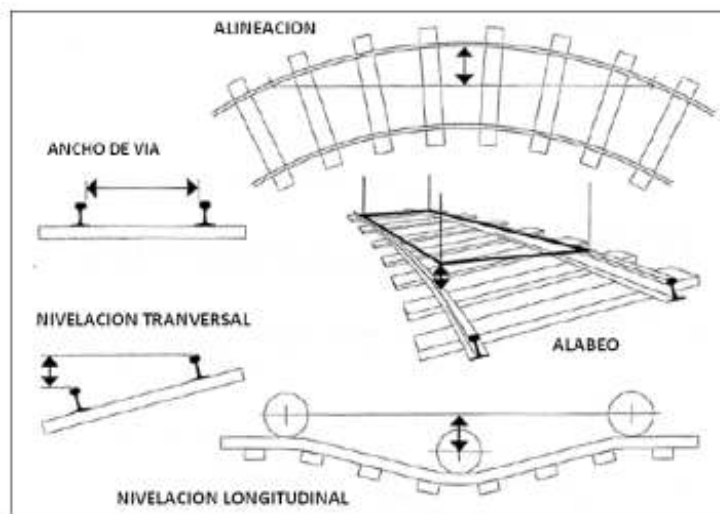


Figura 2.13 Tipos de defectos geométricos de la vía.

2.3.2 Causas de los defectos geométricos.

El tipo de tren y de material rodante circulante sobre la vía (en particular la edad de las suspensiones y la relación entre masas suspendidas y no suspendidas) son los principales causantes de la degradación de la misma. Los efectos de las imperfecciones de contacto entre rueda y carril generan sobrecargas dinámicas, las cuales perjudican la durabilidad de la estructura. Estas sobrecargas son proporcionales a las cargas no suspendidas. La velocidad de los trenes desempeña en este caso un rol principal ya que es la que amplifica las cargas dinámicas.

A causa de las sobrecargas dinámicas inducidas por los defectos, con el paso de los trenes, se ha puesto de manifiesto una relación directa entre el estado del material y el estado geométrico de la vía. Es así que un carril en buen estado se somete a un desgaste muy rápido si la geometría del conjunto no es buena. Del mismo modo que una vía donde la geometría inicial es buena, se degradará rápidamente si existen defectos en los componentes. Por consecuencia, las tareas de mantenimiento deberán identificar el origen de las pérdidas de geometría y actuar de modo conjunto, tanto sobre la mejora de la geometría como la de eliminar los defectos existentes en los componentes de la vía. La figura 2.14 presenta un esquema en el cual se evidencia la relación existente entre el estado del material y la geometría de vía.

Para una carga estática constante, el estado geométrico de la vía se degrada de manera diferente en un lugar que en otro, debido a que las cargas dinámicas de los trenes no son a lo largo de toda la vía iguales. El hecho de que el soporte de los carriles no sea continuo en toda su longitud se traduce en que las traviesas no reciban todas las mismas tensiones. Asimismo, debe considerarse que tanto la plataforma como el subbalasto no presentan una geometría perfecta, lo que se traduce en asentamientos diferenciales de las traviesas y el fenómeno de la danza de traviesas que quedan suspendidas por los carriles. Este fenómeno empeora la situación, ya que las traviesas más próximas a las traviesas suspendidas han de soportar esfuerzos mayores, lo que se traduce en mayores asentamiento y la pérdida del funcionamiento elástico del conjunto.

Un problema más grande se presenta en las zonas de transición entre las vías en balasto y las vías en placa o sobre puentes: los asentamientos en estas zonas se acentúan a causa de la gran variación de rigidez en un pequeño tramo. Estudios más recientes han



demostrado que una transición moderada en la rigidez de vía en estos casos se traduce en una importante reducción de asientos. Es así que la geometría de vía nunca se deteriora de manera homogénea, esto radica en que son producto del paso de los vehículos y de las sobrecargas dinámicas que estos generan.



Figura 2.14 Relación entre geometría de vía y estado del material que la compone. (Fuente: Chiara Paderno, 2010)

2.3.3 Importancia del balasto en la geometría de la vía.

Una vez mencionados los distintos tipos de problemas que aparecen en torno a la geometría de la vía, es inevitable citar la importancia que tiene la capa de balasto a la hora de mantener el posicionamiento necesario de las vías para brindar una circulación en condiciones de los vehículos.

El motivo por el cual se ha de prestar una particular atención sobre este componente de vía se debe a la menor vida útil que el mismo presenta, es decir, que la capa de balasto suele ser el elemento de vía que pierde sus características iniciales más rápidamente frente a los demás. La figura 2.15 refleja los asientos que padecen la capa de balasto, subbalasto y la plataforma con la acción del tráfico. La vida útil de los otros elementos que componen la vía (carriles, traviesas y fijaciones) es ampliamente superior a la de los mencionados anteriormente.

De la figura 2.15 se puede apreciar la gran diferencia existente entre la pérdida de forma de la capa de balasto frente a las otras 2. Esto se traduce en la necesidad de ir bateando la vía con el objetivo de devolver a ésta su estado inicial y por consiguiente una geometría adecuada para la circulación.

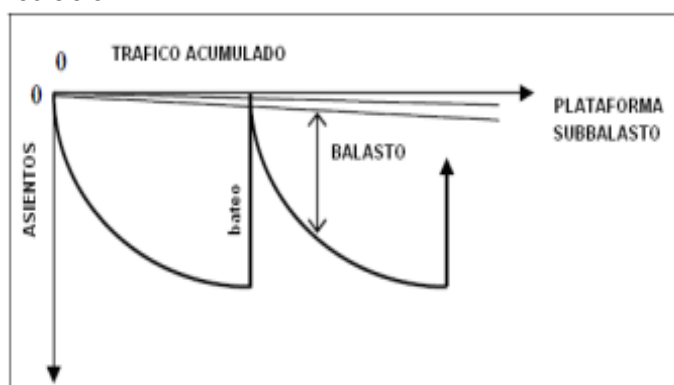


Figura 2.15 Asientos en función del tráfico de las capas de balasto, subbalasto y plataforma. (Fuente: Chiara Paderno, 2010)



2.3.4 Determinación del espesor de balasto.

Durante mucho tiempo, prácticamente hasta mediados de los años 50 del siglo XX, los problemas de diseño del sistema de balasto-plataforma se concretaban en la determinación del espesor necesario de aquel para evitar que el nivel tensional en la plataforma superase el admisible por ésta. Lógicamente, y en consecuencia, la atención del tema se centraba en conocer la forma en que desde la cara inferior de la traviesa tenía lugar la distribución de presiones verticales en profundidad.

La mayor parte de las expresiones propuestas para calcular la reducción de presiones con la profundidad tuvieron un carácter empírico o semiempírico, siendo los trabajos llevados a cabo por el profesor Talbot (Fig. 2.16) uno de los más interesantes ya que significan, posiblemente, los primeros trabajos experimentales sobre la forma de trabajo de los materiales granulares.

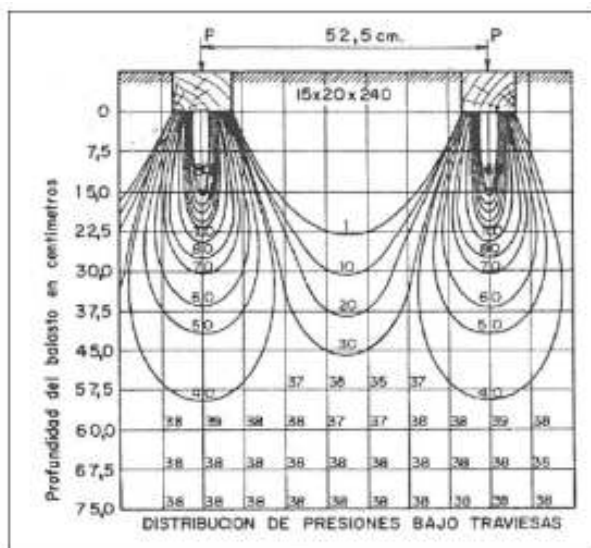


Figura 2.16 Resultados de Talbot sobre la distribución de presiones bajo las traviesas. (Fuente: Talbot, 1917)

Luego de varios modelos empíricos propuestos, y de las experiencias de cada una de las administraciones de Alemania, Francia, Italia, Estados Unidos y España entre otras, se han determinado los espesores de balasto óptimos según indica la tabla 2.4.

Red	Balasto	Espesor de Subbalasto
DB	30 cm	20 a 40 cm en infraestructuras poco resistentes
SNCF	30 cm	NO
RENFE	30 cm	NO
SNCF	15 a 20 cm	20 a 15 cm
NS	20 cm	Pt. Arcillosa; 50 cm arena
FS	35 cm	Pt. Poco permeable: 20 cm NO

Tabla 2.4 Espesores de balasto y subbalasto utilizados en algunas redes (1962)



En todos los casos el espesor de balasto escogido ronda los 30 cm, el cual garantiza que las tensiones que arriban a la plataforma sean menores que la que puede soportar la plataforma, y de este modo eliminar posibles deformaciones de la misma (Fig. 2.17). En los casos en los que se ha escogido un menor espesor de la capa, se requiere una plataforma con mayor capacidad portante.

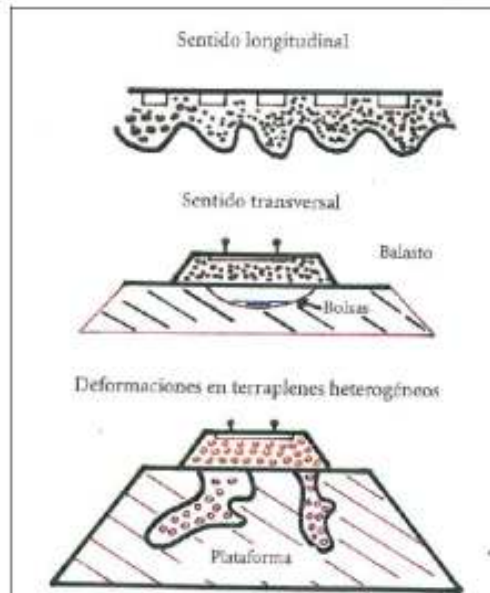


Figura 2.17 Deformaciones en la plataforma. (Fuente: A. López Pita)

En lo que respecta al análisis realizado para dimensionar la capa de balasto de las líneas de alta velocidad, se ha optado por utilizar un método basado en la carga de hundimiento de una zapata (asimilada a una traviesa), tal como se muestra en la figura 2.18.

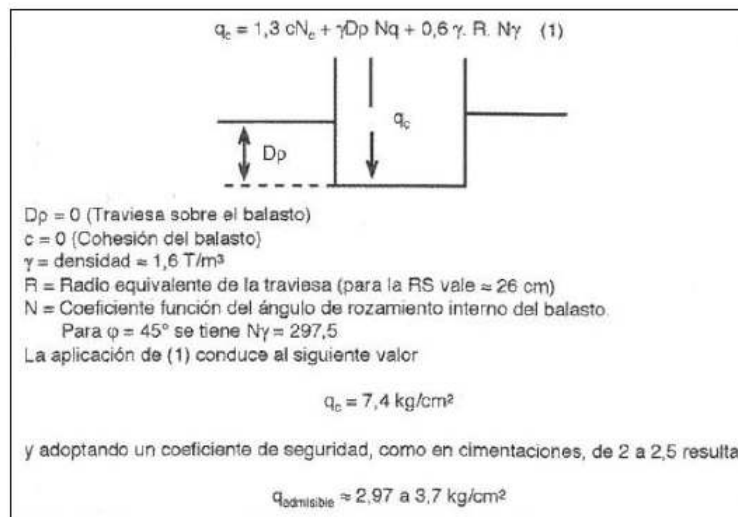


Figura 2.18 Evaluación de la tensión admisible por la capa de balasto. (Fuente: A. López Pita)

Naturalmente, no sólo el balasto interviene en la reducción del nivel de presiones que alcanza la plataforma y, por otro lado, las distintas experiencias habían puesto de relieve problemas de contaminación del balasto con la infraestructura, sobre todo en caso de



suelos arcillosos, fenómenos de helada en la plataforma de líneas de ferrocarril en algunos países, etc.

Esta situación condujo inicialmente a la SNCF, y posteriormente a la UIC, a establecer, siguiendo la tendencia marcada por la carretera para el dimensionamiento de firmes, un catálogo de secciones estructurales tipo en el que se recogiesen indicaciones precisas sobre la naturaleza, espesores y características de los distintos estratos a colocar desde la cara inferior de las traviesas hasta la superficie de la plataforma.

2.3.5 Operaciones de mantenimiento de la vía sobre balasto.

Las tres operaciones de mantenimiento de la geometría de la vía que se realizan con mayor frecuencia en las líneas sobre balasto son:

Nivelación de vía:

Permite corregir los defectos de nivelación longitudinal, peralte y alabeo.

Alineación de vía

Permite corregir los defectos de alineación. De forma análoga a las niveladoras, las alineadoras disponen.

Bateo de la vía.

La operación de bateo de la vía debe realizarse siempre que se realice el desplazamiento del carril (tanto en las operaciones de alineación como de nivelación).

Para la realización de las tareas de mantenimiento resulta imprescindible una infraestructura básica de mantenimiento que reside fundamentalmente en las bases de mantenimiento que tienen múltiples utilidades: oficina para realizar tareas de gestión y programación, garaje de vehículos y almacenamiento de herramientas, taller de material, acopio de materiales, etc.

Auscultación

Existen principalmente dos técnicas de auscultación: los métodos de auscultación geométrica y los métodos de auscultación dinámica.

Los métodos de auscultación geométrica se basan en la medición directa de la geometría de la vía (un ejemplo típico es el coche de registro Mauzin). Los métodos de auscultación dinámica se basan en la medición de las aceleraciones en el interior del vehículo o en una parte concreta del mismo (a destacar como ejemplo el coche Melusine). Las principales ventajas de la auscultación dinámica estriban en la factibilidad de medir los defectos a velocidades de explotación y la capacidad de insertarse en vehículos comerciales de forma que minimizan las interferencias en la explotación comercial.

Una vez auscultadas las vías, la cuantificación de los defectos se obtiene por la diferencia entre la geometría real del parámetro geométrico que se mide y la geometría teórica perfecta de la vía. Los criterios de intervención (o realización de trabajos de mantenimiento) dependen principalmente de tres tipos de cuantificadores estadísticos: el valor medio, la desviación estándar y los valores extremos. Tanto el valor medio como la desviación estándar (de parámetros como la alineación, la nivelación longitudinal,...) permiten evaluar la calidad global de la vía. En cambio, los valores extremos contribuyen a la detección de defectos puntuales.



Operaciones de nivelación

Las operaciones de nivelación permiten corregir los defectos de nivelación longitudinal, peralte y alabeo detectados y evaluados por los sistemas de auscultación.

Estas operaciones se llevan a cabo mediante máquinas llamadas “niveladoras”. Las niveladoras están dotadas de 3 palpadores de contacto por cada carril, de unas uñas para la sujeción del mismo y de unos gatos cuya fuerza permite colocarlo en su posición correcta. Entre los dos palpadores extremos se tiende una cuerda de acero o bien un rayo de luz infrarrojo.

La operación de nivelación consiste en que, fijadas las cotas de los extremos de la cuerda o rayo entre los palpadores A y C con las oportunas correcciones, el elemento interceptor correspondiente al palpador B quede alineado con la cuerda o el rayo definido. Este trabajo se puede realizar a partir de los datos de auscultación, que se introducen en la niveladora para corregir las posiciones de A y C. Este método recibe el nombre de “nivelación en base absoluta” o “bateo de precisión”.

En la nivelación longitudinal se disponen los extremos de la cuerda A y C a las cotas respectivas de acuerdo con los levantes calculados en el punto más próximo del carril.

Así, la cuerda o, en su caso, el rayo infrarrojo se coloca paralelo a la rasante del carril. Entonces el dispositivo de levante actúa hasta que el elemento interceptor correspondiente al palpador B queda alineado con la cuerda. A partir de este momento, solo será necesario corregir la posición de A, ya que el extremo C está ya sobre carril nivelado. Nivelar un tramo donde haya un acuerdo vertical consiste en realizar las mismas operaciones que se contemplaban al nivelar un tramo de pendiente constante, corrigiendo oportunamente el extremo A de la cuerda según un valor de guiado.

Para ejecutar los trabajos de nivelación transversal, las niveladoras están dotadas de péndulos en los puntos C y B. En B el maquinista introduce el valor del peralte que se desea en el punto que se está bateando, mientras que en C se procede a comprobar el peralte resultante. Esta última medida permite también conocer el alabeo remanente en la vía. En el punto A, se dispone también de un péndulo. En este caso, su finalidad es corregir los errores que, por motivo de los defectos del peralte en la vía, pudieran introducirse en las operaciones de nivelación y alineación. Las operaciones de nivelación de la vía requieren, en algunos casos, la incorporación de balasto a la vía. Para la realización de esta operación se requiere la utilización de tolvas para el transporte y vertido del balasto y de la actuación de una perfiladora para repartirlo y dotar a la banqueta de la sección transversal correcta.

Operaciones de alineación

Las operaciones de alineación se efectúan mediante máquinas específicas que reciben el nombre de “alineadoras”. Los elementos básicos son los palpadores (3 ó incluso 4 palpadores de contacto por cada carril montados en sus correspondientes carros de medida) y unas uñas que sirven para sujetar la cabeza del carril y colocarlo en su correcta posición utilizando la fuerza de unos gatos. La alineadora no presenta ningún tipo de restricción en las operaciones correctoras, pudiendo desplazar el carril a ambos lados.

Las alineadoras convencionales pueden trabajar de acuerdo con dos métodos generales: alineación basada en 3 puntos y alineación basada en 4 puntos. En el primer método, la operación de alineación consiste en que, fijadas las cotas de los extremos de una cuerda entre A y C con las oportunas correcciones, el elemento interceptor correspondiente al palpador B quede alineado con la misma, o bien, sin introducir correcciones, la flecha leída en B sea la correcta. En cuanto a la alineación basada en 4 puntos, el método consiste en mantener constante la relación entre la flecha leída en B y la flecha leída en C, respecto a la cuerda trazada entre A y D.



De forma análoga a las operaciones de nivelación, la alineación se puede realizar en base absoluta o en base relativa.

Operaciones de bateo

Las operaciones de bateo se llevan a cabo mediante las bateadoras, cuyo rendimiento supera en algunos modelos los 200 m/h y son, a la vez, niveladoras y alineadoras. Como se ha mencionado anteriormente, el bateo de la vía consiste en golpear el balasto para afianzar el asiento de las traviesas y deshacer los apelmazamientos para aumentar el drenaje de la vía.

Los bates experimentan tres tipos de movimientos: penetración en la capa de balasto, movimiento de cierre y movimiento vibratorio. La profundidad máxima de bateo, medida entre la cima del carril y la cima del taco del bate, es de 450 mm para la bateadora Matisse B-50.

Según el movimiento de cierre de los bates hay dos tipos de bateos: bateo síncrono, en el que todos los bates recorren la misma distancia y detienen su trabajo cuando uno sólo de ellos encuentra una resistencia al avance igual o superior a la presión de compactación ajustada, y el bateo asíncrono, en el que cada bate trabaja de forma independiente respecto a los otros bates. Finalmente, el rango ideal para la amplitud de la vibración es de 3 a 5 mm.

Otras actividades de mantenimiento

La acción de las bateadoras modifica la posición de las partículas de balasto lo que contribuye a la reducción de la resistencia lateral de la vía que obligaría al establecimiento de restricciones en la velocidad de circulación de los trenes hasta que el tráfico hubiera sido suficientemente importante para volver a aumentar la resistencia lateral. Para evitar las restricciones de velocidad, inmediatamente después de las acciones de bateo se realiza la estabilización dinámica de la vía mediante la aplicación de la combinación de una vibración horizontal y una carga vertical constante. Así, los trabajos de estabilización dinámica permiten anticipar el asiento que experimentaría la vía con el paso de las cargas dinámicas propias de la circulación de los vehículos, si no se efectuaran dichos trabajos.

Las operaciones de extendido de balasto y perfilado de la banqueta se llevan a cabo mediante composiciones de tolvas que trasladan el balasto hasta los tramos que lo requieren, y lo vierten en el lado exterior de cada uno de los carriles. Para repartir ese balasto y dotar a la banqueta de la vía de su sección correcta, se precisa la labor de una "perfiladora". Esta máquina recoge mediante unos arados exteriores el balasto vertido y lo reparte convenientemente en todo el ancho de la vía.

Asimismo, el desgaste ondulatorio de los carriles, que se produce sobre todo en aquellas líneas donde circulan trenes con un mismo régimen de marcha (típico en líneas de cercanías y líneas de alta velocidad explotadas únicamente con ramas de alta velocidad para el tráfico exclusivo de viajeros) obliga a realizar el amolado de los carriles. A tal fin se utilizan unas máquinas especiales que frota la cabeza del carril con unas piedras esmeriladoras restableciendo la geometría de contacto adecuada.

Esta técnica suele aplicarse antes de la puesta en servicio de las líneas de alta velocidad de nueva construcción con objeto de corregir los defectos puntuales en la geometría del carril debidos, principalmente, al choque con las partículas de balasto en el momento de su colocación.

Además de los trabajos de corrección de la geometría de la vía previamente mencionados existen otros trabajos de carácter más puntual, como puede ser la sustitución de traviesas y sujeciones y la realización de inyecciones de morterocemento en terraplenes para garantizar la estabilidad de taludes.



2.4 DEGRADACIÓN DE LA CAPA DE BALASTO

2.4.1 Vida útil del balasto.

El balasto ha sido definido en ocasiones como el “elemento débil de la vía convencional” (Lozano, 2007), debido a su papel fundamental en la estabilidad de las condiciones geométricas de la vía. Las cargas cíclicas a las que se ve sometido, así como la naturaleza puntual de los contactos entre los elementos discretos que lo componen, favorecen su machaqueo con el paso del tiempo y su paulatina contaminación por partículas, que acaban requiriendo su lavado o su sustitución.

El proceso de deterioro y contaminación depende de los ciclos de carga, pero también de las características del propio balasto (como su dureza) o del diseño de la superestructura (sub base, capas anticontaminantes, capas geotextiles, etc.)

Puebla et al. cuantifican la vida útil del balasto silíceo en 300 millones de toneladas brutas, equivalentes a un periodo de 25-30 años. (Puebla et al, 2000). El gestor de infraestructura francés, RFF, cuantifica la vida útil del balasto en 20 años para las líneas de alta velocidad y en 30 años para las vías convencionales.

2.4.2 Importancia del balasto en el deterioro de la vía.

Como ya se ha mencionado anteriormente, de todos los elementos que forman la estructura de una vía, es sin duda el balasto el que mayor intervención tiene en los procesos de deformacionales que dan lugar al deterioro de la calidad inicial de la vía.

De hecho, como señalo Birmann (1955), del asiento total de una vía bajo la acción de una carga puntual vertical, el 70% del mismo se debe al asiento de la capa de balasto en vías con traviesas de hormigón. Tan solo en el caso de plataformas de reducida capacidad portante, la contribución de éstas al asiento total puede tener mayor importancia que la del balasto, tal como se deduce de las medidas efectuadas por el instituto del profesor Eisenmann.

En todo caso, es de interés señalar que la capa de balasto bajo las traviesas se caracteriza por una marcada heterogeneidad resistente, tal como ha puesto de manifiesto Cabos en 1977 (Fig. 2.19). Nótese que la densidad del balasto se mueve en un intervalo comprendido entre 1,5 y 1,9 t/m³ y evoluciona con el tiempo a medida que pasa el tráfico.

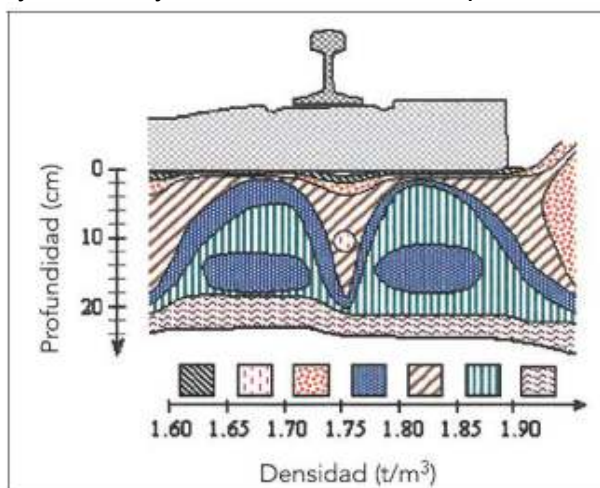


Figura 2.19 Distribución del grado de compactación del balasto bajo las traviesas. (Fuente: Cabos, 1977)



Los ensayos realizados en el laboratorio de Derby (1970), de los ferrocarriles británicos, permitieron establecer que la deformación permanente del balasto seguía la siguiente expresión:

$$e_{PN} = 0,082 (\sigma_1 - \sigma_3)^\alpha (100n - 38,5) (1 + 0,2 \log N)$$

Ec 1

Siendo:

e_{PN} = deformación permanente del balasto después de N ciclos de carga

σ_1 y σ_3 = tensión vertical y lateral sobre el balasto

α = exponente función de la magnitud de la tensión vertical (1 a 3)

n = porosidad de la capa de balasto

N = número de ciclos a que se somete el balasto bajo un estado tensional

Algunos años más tarde (1978), las investigaciones llevadas a cabo por Henn, en el Instituto de Munich permitieron obtener, para la evolución del asiento permanente del balasto (y), la expresión matemática siguiente:

$$y = 1,47 + 3,8\sigma_0 + 3,41\sigma_0^{1,21} \log N$$

Ec 2

Siendo σ_0 la tensión vertical aplicada durante N ciclos de carga.

La comparación de las dos expresiones anteriores pone de relieve el paralelismo existente entre ambos resultados, especialmente por lo que respecta al exponente que refleja el nivel tensional (σ).

2.4.3 Estudios del comité D-117 del ORE.

Por otro lado y de forma experimental, el Comité D-117 del ORE trató de obtener la ley de asiento de la vía en líneas sometidas a la explotación comercial normal. A partir de mediciones llevadas al efecto en algunas líneas francesas y alemanas se observa que la variación del asiento medio Me (mm) con el tráfico (T) respondía a la expresión:

$$Me = A1 + A0 \log (T/2 \cdot 10^6)$$

Ec 3

Siendo $A1$ y $A0$ dos coeficientes de ajuste, pero con una interpretación física de gran interés:

- $A1$ representa el asiento durante el denominado “período de juventud de la vía”.

- $A0$ representa la velocidad de deterioro de la vía con el tráfico.

Los valores que toman estos coeficientes se encuentran relacionados a la calidad de la vía como indica el siguiente cuadro:



Calidad de vía	A_1 (mm)	A_0 (mm)
Buena	6-10	2-4
Media	10-15	4-6
Mala	15-20	6-10

Tabla 2.5 Valor de los parámetros A_1 y A_0 de calidad de vía

La extensión de las citadas medidas a otras redes ferroviarias permitió disponer de resultados que pusieron en evidencia que en algunas líneas y después de un cierto tráfico se producía una brusca modificación de la relación asiento-tráfico, mientras que en otras líneas la evolución del asiento presentaba una única recta de ajuste.

En relación con el hecho de que, a partir de un determinado número de ciclos, el asiento de la capa de balasto crezca de forma importante pone de manifiesto que para valores elevados de la tensión sobre el balasto (4 kg/cm²), la velocidad de asiento de este material se multiplica casi por tres (Fig. 2.20).

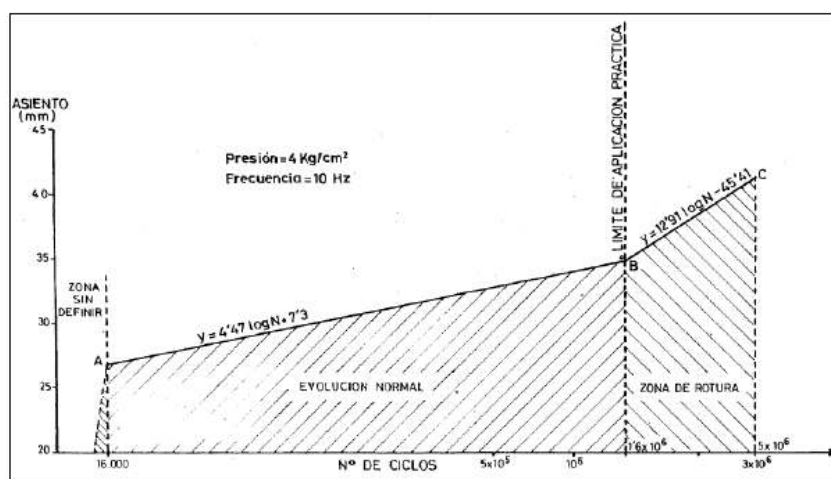


Figura 2.20 Evolución del asiento de la capa de balasto bajo carga dinámica en el laboratorio (Fuente: López Pita 1981)

Es importante destacar que el asiento de una vía no es, por sí mismo, representativo del deterioro de la calidad geométrica. Si toda la vía asentase paralelamente a sí misma, no habría defectos. Sin embargo, diversos estudios realizados, pusieron de relieve que a mayor asiento en la vía, mayor era también la magnitud de los defectos geométricos (Fig. 2.21).

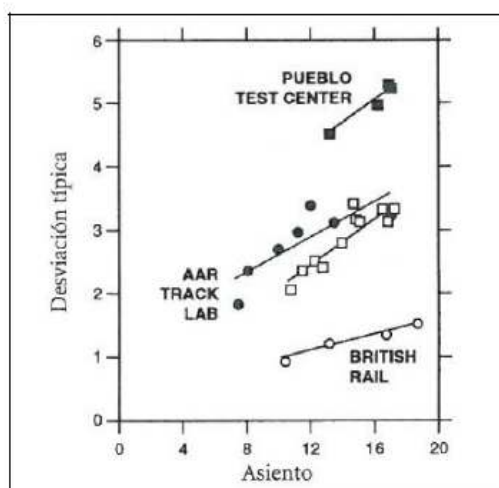


Figura 2.21 Relación entre el asiento de una vía y la magnitud de los defectos de nivelación longitudinales. (Fuente: Tomada de T. Seling y J.M. Waters, 1994)

En todo caso la observación de la variación de la desviación típica de los defectos con el tráfico condujo también a una ley de tipo logarítmico. Ley no solo aplicable a los defectos de nivelación longitudinal, sino también al resto de parámetros (nivelación transversal, alineación, ancho y alabeo), la cual está definida por:

$$\sigma_T = C_1 + C_0 \log (T/2.106)$$

Ec 4

Siendo C1 y C0 coeficientes de ajuste que varían según el tipo de defecto.

PARAMETRO	C ₁	C ₀
Nivelación transversal y longitudinal	0,5 a 2,5	0,1 a 0,5
Alineación	0,7 a 6	0,01 a 1,57
Alabeo	0,31 a 3	0,08 a 0,65
Ancho	0,8 a 2,2	0,03 a 0,45

Tabla 2.6 Valor de los parámetros C₁ y C₀ para la ley logarítmica de asiento de vía

Puede observarse que si σ_T se sustituye por el valor límite admisible para cada parámetro, resultaría teóricamente posible deducir para qué tráfico T en la línea se alcanzaría el citado límite de los defectos, y en consecuencia, planificar las operaciones de mantenimiento. La dificultad se encuentra en el hecho de que C1 y C0 sólo pueden considerarse constantes para longitudes cortas (200 a 300m), lo que dificulta un tratamiento integral de las líneas. La heterogeneidad en la vía “en términos de deformación” puede observarse en la figura 2.22, correspondiente a una línea convencional.

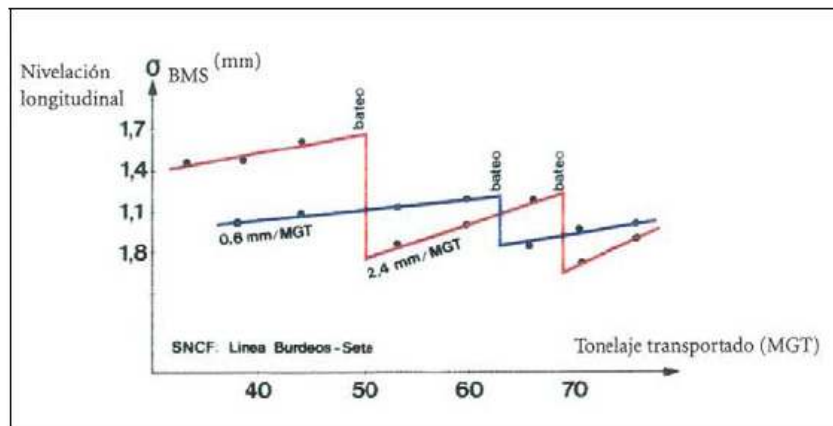


Figura 2.22 Dispersión del deterioro de la vía en dos secciones próximas. (Fuente: G. Janín)

2.4.4 Deterioro en función del espesor de balasto.

Por lo que se refiere al espesor de la capa de balasto en relación al deterioro de la vía, la figura 2.23 confirma el negativo efecto que tiene incrementar su valor tanto en el asiento de vía como en los defectos de la misma.

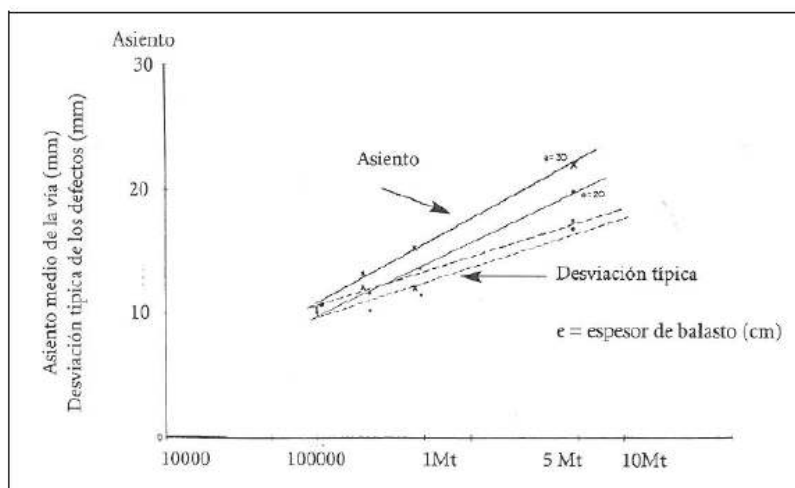


Figura 2.23 Influencia del espesor de balasto en el asiento de la vía. (Fuente: ORE)

2.4.5 Rigidez vertical de la vía.

Una forma de cuantificar el efecto conjunto de los parámetros que conforman una vía es considerando la rigidez vertical de la misma. Según los estudios llevados a cabo en el ámbito del proyecto Eurobalt II (2000), fue posible establecer de forma aproximada la relación entre el asiento de la vía y la magnitud de dicha rigidez. Matemáticamente:

$$S = 1800 / K^2$$

Ec 5

Siendo,

S: asiento de vía (mm/Mtoneladas)

K: rigidez vertical de la vía (KN/mm)



En forma análoga se obtuvo, para la desviación típica de los defectos de nivelación longitudinal (σ), la siguiente expresión:

$$\sigma = 100 / K$$

Ec 6

Relacionando las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\sigma = 2,35 S^{1/2}$$

Ec 7

De este modo se pone de manifiesto que a medida que aumentan los asientos en la vía, también se incrementa la magnitud de los defectos de la misma.

2.5 MANTENIMIENTO Y REPERCUSIONES ECONÓMICAS

2.5.1 El mantenimiento en la actualidad.

En la actualidad el “mantenimiento cíclico ha sido sustituido por el “mantenimiento según estado”. Es decir, por realizar los trabajos de conservación en aquellos elementos o parámetros sobre los cuales existe la certeza de que se está desarrollando algún tipo de defecto. Es evidente que este sistema necesita para su implementación de un exhaustivo y continuo crecimiento del estado real de la línea. Para ello se cuenta con tres tipos de vehículos: de control de calidad geométrica de la vía (vehículos de auscultación); de control en los defectos de los carriles (vehículos de auscultación ultrasónica), y de control del desgaste ondulatorio de los carriles.

Además de la utilización de los citados vehículos y de los resultados que de ellos se derivan, las decisiones de mantenimiento se apoyan también en inspecciones a pie por parte de brigadas de trabajo; inspecciones generales, y auscultación dinámica de la vía.

En este último caso, se trata de una medida indirecta de la calidad geométrica de la vía. En efecto, registrando las aceleraciones que tienen lugar en un vehículo se dispone de una cierta referencia sobre el estado de vía.

Con toda la información obtenida los equipos de mantenimiento de cada administración ferroviaria deciden las operaciones que deben llevarse a cabo y planifican los recursos humanos, técnicos y económicos necesarios.

Se comprende que la actividad principal del mantenimiento se centre en operaciones de bateo, alineación, nivelación, etc., cuyo objetivo es mantener la calidad geométrica de vía en el interior de los criterios de tolerancias establecidos al efecto. En general, el control ultrasónico de carriles y el control de desgaste ondulatorio no suelen dar como resultados actuaciones de entidad.

De esta manera, el interés existente en que los elementos que componen la vía sean de buena calidad y doten a la misma de una buena geometría durante el mayor tiempo posible, con el fin de reducir las intervenciones de mantenimiento, y así, bajar los costes que conllevan las mismas.



2.5.2 Criterios de intervención en la vía.

Los vehículos de auscultación geométrica de la vía proporcionan gráficos como los indicados en la figura 2.24, para cada parámetro de vía y para cada sección de línea considerada. A partir de los mismos, los expertos en vía deducían, por inspección visual de los registros y algunas medidas puntuales en los gráficos de los valores de ciertos defectos, la pertinencia o no de llevar a cabo operaciones de mantenimiento.

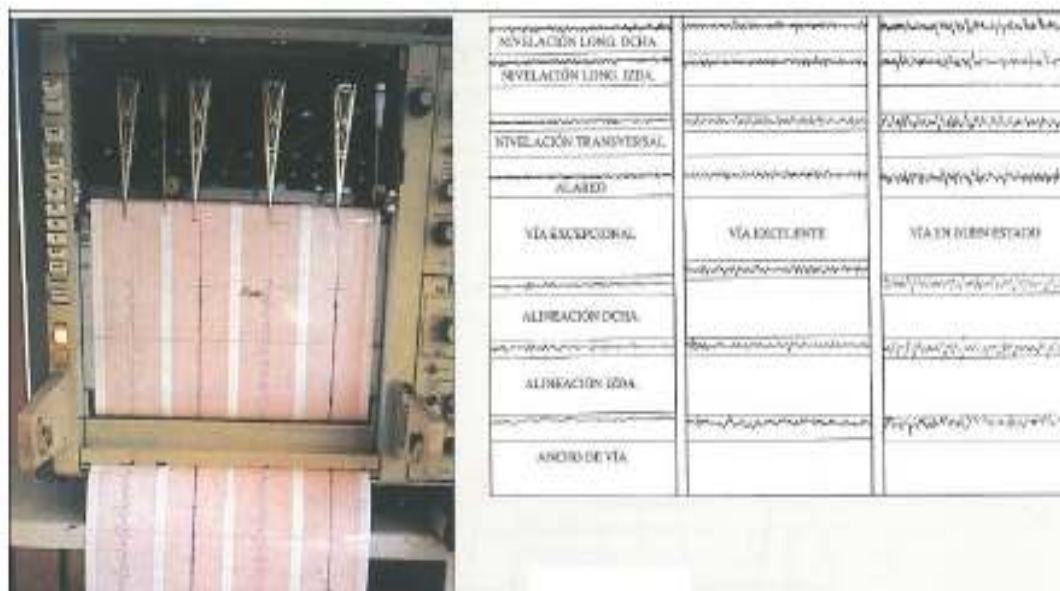


Figura 2.24 Resultados del coche de registro de vía y apreciación de la calidad de una vía.
(Fuentes: Renfe y SNCF)

Los avances producidos en el tratamiento de datos posibilitaron la implementación de indicadores numéricos de calidad de la vía. Como referencia, Weigend (1981) señaló los criterios de base de los ferrocarriles alemanes, que se resumen a continuación.

De los registros de auscultación geométrica de la vía y para cada parámetro (nivelación longitudinal, alineación, etc.) básicamente son tres los conjuntos de valores con los que se puede operar matemáticamente (Fig. 2.25):

- Valores aa': diferencias de amplitudes entre extremos sucesivos de la señal.
- Valores bb': medidas hasta el extremo de la señal y a partir de un valor de referencia correspondiente a la vía perfecta.
- Valores cc': medidas sucesivas de la amplitud de la señal en puntos equidistantes a lo largo de la vía.

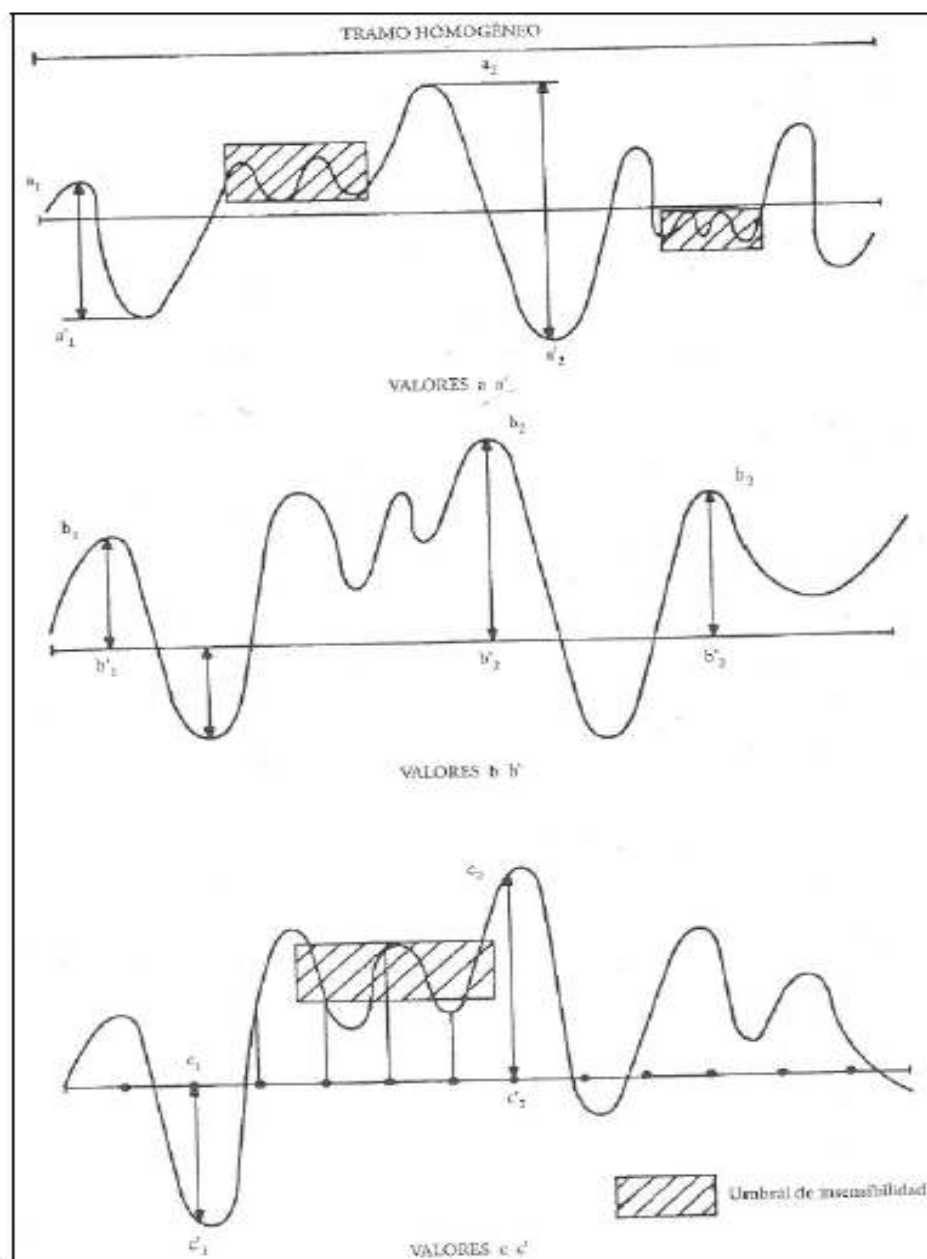


Figura 2.25 Tratamiento numérico de los registros geométricos de la vía. (Fuente: R. Rivier)

En cada parámetro se definen dos umbrales de insensibilidad: el primero, flotante, que actuaba a modo de filtro eliminando los pequeños defectos superpuestos; el segundo, que actuaba de igual modo, trabajando alrededor del cero.

Teniendo en cuenta las reflexiones precedentes, las señales se trataban del modo siguiente:

a) Los valores extremos de registro se agrupaban en clases según la magnitud de los mismos. La longitud de vía considerada se escogía libremente, pero como referencia se adoptaba $l=500$ m.



b) Las distintas clases elegidas se correspondían con los valores límites de los defectos aceptados para la recepción de los trabajos, conservación y decisión de intervenir.

La adición de los valores aislados de cada parámetro a lo largo de la sección de vía considerada se refería a una longitud estándar de vía (L), de valor, igual a 25 m. Se obtenía de este modo un indicador del estado de vía (S_i), correspondiente al parámetro i de la geometría de vía (por ejemplo, la nivelación longitudinal) por relación.

$$S_i = (a_{iu} + a_{iu} + \dots + a_{iu}) L / l$$

Ec 8

La consideración de los valores S para el resto de los parámetros (ancho de vía, alineación, etc.) permitía obtener un indicador global de calidad de vía (Q), definido por la expresión:

$$Q = K_1 S_1 + K_2 S_2 + \dots + K_j S_j$$

Ec 9

Los coeficientes K_i pretendían reflejar la importancia que cada parámetro tiene en la calidad del conjunto de la vía. En otras palabras, responder el interrogante de saber que parámetro tiene más repercusión en la calidad de una vía.

En el ferrocarril español la primera edición de la norma e vía N.R.V. 7-3-0.0/2 establecía los siguientes coeficientes K_i de ponderación:

K₁ (nivelación longitudinal) = 0,25

K₂ (ancho de vía) = 0,12

K₃ (alineación) = 0,40

K₄ (nivelación transversal) = 0,12

K₅ (alabeo) = 0,60

De tal modo que la expresión anterior queda de la forma

$$Q = 0,25 \times (S_{1D} + S_{1L}) / 2 + 0,12 S_2 + 0,40 (S_{3D} + S_{3L}) / 2 + 0,12 S_4 + 0,6 S_5$$

Ec 10

En donde S_{1D} y S_{1L} representan los valores de la nivelación longitudinal en el hilo derecho e izquierdo respectivamente de la vía; en forma análoga sucedía con los valores S_{3D} y S_{3L} de la alineación existente en cada hilo.

A partir del valor de Q obtenido, la UIC 518 estableció los criterios recomendables para definir la calidad de vía para cada intervalo de velocidades máximas en el tramo de vía considerado en el tramo de vía considerado. Los citados criterios determinan tres niveles de calidad:

QN1: Valor de defecto que implica una vigilancia de su evolución o su eliminación en ciclos normales de conservación.

QN2: Valor del defecto que obliga a efectuar operaciones de conservación a corto plazo.

QN3: Valor del defecto que corresponde a una situación no deseable.

Para cada parámetro geométrico, se fijan dos valores Q_{ni}:

- El primero corresponde al valor máximo en cada intervalo de 200 m.

- El segundo, a la desviación típica del defecto en el intervalo de 200 m.



Los valores admisibles están determinados en función de las velocidades de circulación y de los niveles de calidad. El cuadro siguiente recoge los valores que se encuentran especificados en la normativa UIC 518 (1998).

Velocidad (Km/h)	QN1 (mm)	QN2 (mm)
$v < 80$	12	14
$80 < v < 120$	8	10
$120 < v < 160$	6	8
$160 < v < 200$	5	7
$200 < v < 300$	4	6

Tabla 2.7 Relación entre velocidades de circulación y niveles de calidad exigibles UIC518 (1988)

Para el cálculo de los defectos puntuales se utiliza la relación $QN3 = 1,3*(QN2)$.

2.5.3 Frecuencias de mantenimiento.

La compleja interacción entre el deterioro de la geometría de la vía, los umbrales de intervención preestablecidos y la programación de las actuaciones de mantenimiento se concreta en unas determinadas frecuencias de intervención. En este apartado se analizan directamente las frecuencias con las que se llevan a cabo las actividades de mantenimiento en algunas líneas, mayoritariamente ejecutadas con vía sobre balasto.

Estas frecuencias se emplearán para estimar las posibles reducciones en el coste de mantenimiento para las líneas ejecutadas con vía en placa.

A la hora de interpretar la frecuencia de las operaciones de mantenimiento se debe tener siempre presente su dependencia del grado de deterioro de la vía, y por tanto de los parámetros que rigen dicho deterioro: intensidad de tráfico, tipo de explotación, velocidad, cargas por eje y las características de la vía (particularmente su rigidez vertical).

Auscultación.

La primera tarea necesaria para garantizar unas condiciones de operación óptimas es la auscultación. Las frecuencias de auscultación en principio están fijadas por las normas de cada administrador ferroviario y por tanto no están sujetas a variaciones en función del estado.

Tal y como destaca Ubalde (2004), del análisis de las frecuencias de mantenimiento en la red francesa, la frecuencia de las auscultaciones es superior para las líneas de alta velocidad (tabla 2.8), y muy en particular en el caso de la auscultación dinámica.

En España, las frecuencias de la auscultación en la línea de alta velocidad Madrid – Sevilla son de una vez al año para la auscultación geométrica y el desgaste de carril y de una vez cada tres semanas para la auscultación dinámica.

De manera similar, la auscultación dinámica de la línea de alta velocidad Roma – Florencia en Italia se lleva a cabo cada tres semanas y el control del desgaste del carril cada año. En la línea de alta velocidad belga entre Bruselas y la Frontera francesa la auscultación geométrica se lleva a cabo una vez al mes y la auscultación dinámica una vez cada dos semanas. En las líneas de alta velocidad alemanas se aplican las frecuencias de auscultación indicadas en la tabla 2.9.



Actividad	Líneas convencionales	Líneas de alta velocidad
Inspecciones a pie por parte de las brigadas de trabajo	2 semanas	Vía general: 10 semanas Desvíos: 5 semanas Obras de tierra, vallado: 5 semanas
Inspecciones generales por el Jefe de Distrito	A pie: 2 meses En cabina: 2 semanas	A pie: 1 mes En cabina: 2 semanas
Visita especial	---	Cada día al inicio del servicio con un TGV especial a 160 km/h
Auscultación geométrica (Mauzin)	6 meses	3 meses con base alargada
Auscultación dinámica	6 meses (dispositivo portátil)	3 semanas con vehículo Mélusine
Auscultación ultrasónica de los carriles	1 año	6 meses

Tabla 2.8 Periodos de tiempo entre auscultaciones en las líneas convencionales y en las líneas de alta velocidad en Francia.

Actividad	160<V≤230 km/h	V>230 km/h
Auscultación geométrica	3 meses	2 meses
Auscultación dinámica	6 meses	6 meses (excepto Colonia-Frankfurt: 4 meses)
Inspecciones en coche	3 meses	3 meses
Inspecciones a pie	3 meses	2 meses
Inspección de agujas	3 meses	3 meses
Auscultación por ultrasonidos	4 meses	4 meses
Auscultación del perfil de la cabeza de carril	18 meses	12 meses

Tabla 2.9 Periodos de tiempo entre auscultaciones en las líneas convencionales y en las líneas de alta velocidad en Alemania.

Actividades de bateo.

Las administraciones ferroviarias europeas llevan a cabo las actividades de bateo y estabilización dinámica de la vía en las líneas de alta velocidad en función del resultado de las auscultaciones.

En el caso de la línea de alta velocidad Madrid – Sevilla, en el periodo comprendido entre el año 1992 y el año 2003, las intervenciones de mantenimiento relacionadas con el balasto fueron del orden de 0,043 km/mes por km, lo que resulta equivalente de media a una actuación cada 23 meses, si bien existen diferencias entre los diferentes tramos de la línea (Ubalde, 2004).

En la línea belga entre Bruselas y la Frontera francesa, la frecuencia con la que se llevan a cabo las operaciones de bateo ha sido estimada en una vez cada 3 o 4 años. En la línea francesa Paris Sudest, la tasa anual de bateo en el año 2003 fue igual a 0,63, equivalente a una intervención cada 19 meses.

En este mismo ámbito, la ALAF (Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles), ha publicado un artículo en el cual menciona la eficacia del bateo durante la vida útil de la vía.



En la figura 2.26 se puede observar como durante los primeros bateos, la calidad geométrica de la vía se mantiene durante un tiempo más prolongado, mientras que con la acumulación de bateos, la eficacia de los mismos es menor. Esto se debe a la cantidad de finos que se van generando en la capa de balasto consecuencia del paso de los trenes y de las mismas operaciones de bateo.

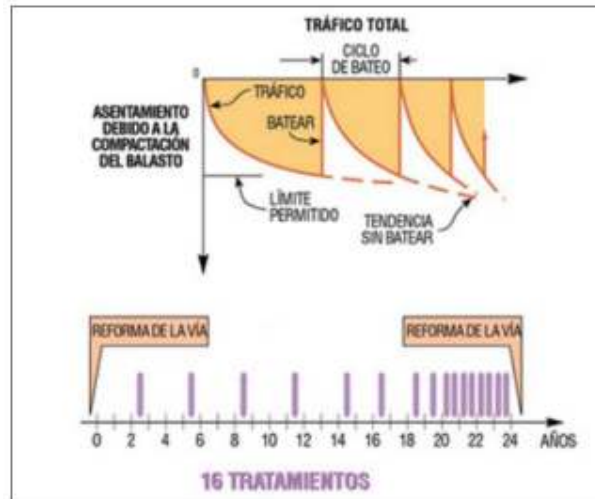


Figura 2.26 Eficacia del bateo con el paso del tiempo. (Fuente: ALAF)

Amolado de carril.

Las actividades de amolado de carril se realizan en general con una menor frecuencia que las operaciones de bateo.

En las líneas de alta velocidad alemanas, el amolado de carril se realiza de manera preventiva cada 20 o 30 millones de toneladas de carga pasante. De acuerdo con (Marks, 1991), las frecuencia prevista de amolado para la línea de alta velocidad Hannover Würzburg era de una vez cada cuatro años.

En la línea de alta velocidad francesa Paris Sud-est, el amolado es necesario, por regla general, cada cinco años (Fig. 2.27).

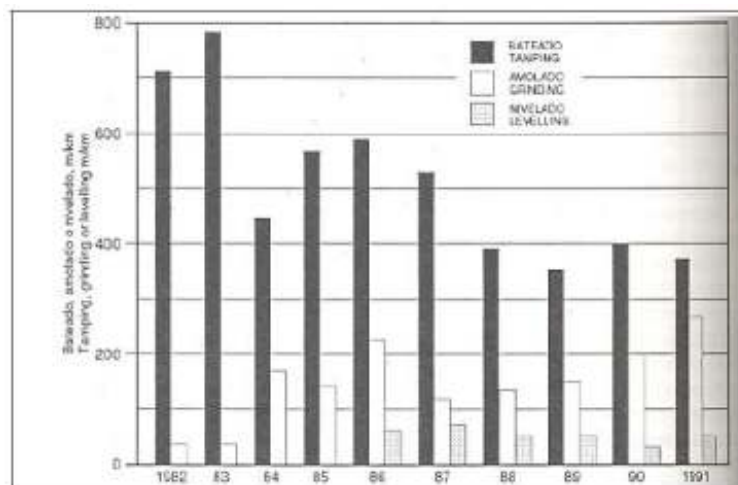


Figura 2.27 Mantenimiento de vía en la línea Pari-Sud-est (Fuente: Estradé, 1996)



2.6 ARTÍCULOS RELACIONADOS CON EL COSTE DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA SOBRE BALASTO

2.6.1 Infracost – LICB (Lasting Infrastructure Benchmarking)

Se disponen de dos documentos relacionados con el estudio Infracost, en la forma de Informes a la Comisión de Infraestructura de la UIC (1998 y 2000), ambos realizados por BSL Management Consulting y R+R Burger und Partner AG. Con posterioridad a estos informes se realizó el estudio LICB, consistente en la actualización de los resultados alcanzados por Infracost, del que se dispone de información a través de la presentación «Indication of costs of provision of infrastructure. Results of UIC Benchmarking» realizada por Teodor Gradinariu (Chargé de Mission Infrastructure, UIC) así como del estudio “Assessment Report on the Financial Model of the Slovene Rail Infra Manager AZP”.

Según el informe del año 2000 existen diversas características físicas de las redes que tienen un efecto importante en los costes de mantenimiento y renovación: la densidad de aparatos de vía; la longitud de líneas en túneles y obras de fábrica; la longitud de vía doble y el grado de electrificación. Existen además, otros parámetros como el radio de curvatura, la carga por eje y la velocidad que también presentan un impacto en el valor de los costes por ciclo de vida.

Asimismo, el grado de utilización de la red tiene una influencia muy destacada sobre los costes de mantenimiento y la vida útil de sus componentes hasta su reemplazo. En este estudio se utilizan dos indicadores del uso de la red: la frecuencia media de trenes por año y el tonelaje bruto medio por año (mercancías y pasajeros). Ello es así porque la experiencia pone de manifiesto que los costes de mantenimiento dependen más de la frecuencia de los trenes (por las dificultades y costes que suponen las interrupciones en la explotación) y que los costes de renovación están más relacionados con el tonelaje bruto puesto que tiene un impacto muy importante en el desgaste de las vías y el deterioro del balasto y, consecuentemente, en su ciclo de vida. El aspecto de la vía única y la vía doble es clave en la renovación de vías, según el estudio y a partir de datos de la SNCF y encuestas se puede concluir que el coste de mantenimiento por km de vía en una vía única es un 40% superior al de una vía doble.

Al tratarse de un estudio en constante actualización y en el que se analizan los costes de mantenimiento y renovación de distintas administraciones ferroviarias, los valores aportados para los costes de mantenimiento y renovación por km de vía son extremadamente variables.

El documento producido por la AZP en 2006 establece que el valor medio de los gastos de mantenimiento de 12 de los 13 países que participaron en el LICB asciende de media 47.476 €/km de vía (sin armonizar) y que los gastos de renovación medios son de 36.721 €/km de vía, alcanzando un total de 84.196 €/km de vía.

La presentación de Gradinariu afirma que el valor promedio de los gastos de mantenimiento más los de renovación constituye un indicador que refleja el coste por ciclo de vida de la infraestructura y determina que, en promedio, el gasto medio por km de vía principal en renovación y mantenimiento es de 72.000 €/km de vía (sin armonizar) (Fig. A1.1).

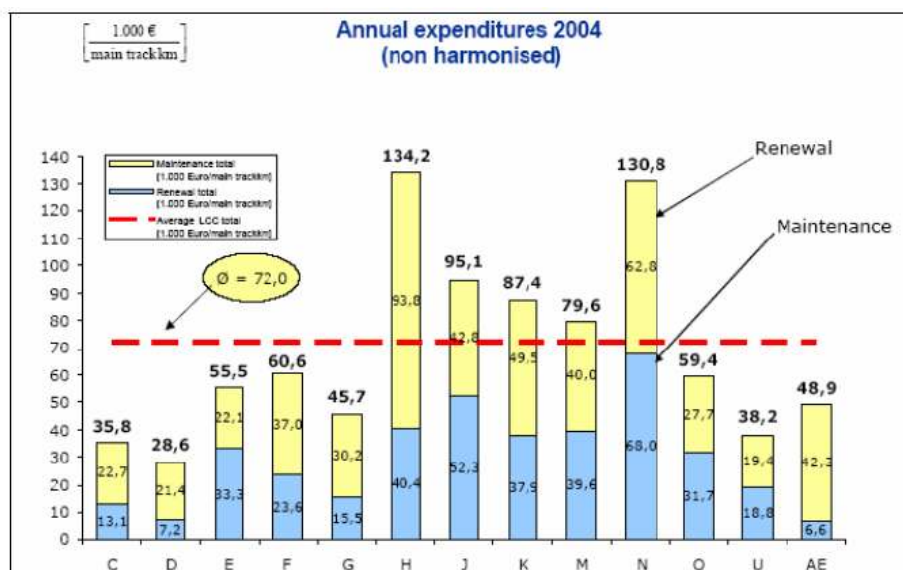


Figura 2.28 Gasto medio anual de mantenimiento y renovación por km de vía principal (no armonizado). (Fuente: Gradinariu, 2005)

Tanto el estudio Infracost como el LICB trataron de armonizar las diferencias de las redes en cuanto a gran parte de los aspectos mencionados (y otros como el coste de la mano de obra). Los resultados armonizados también resultan muy distintos en función de las administraciones implicadas en el estudio. En el documento del año 2000, correspondiente al estudio Infracost, se establecía que el coste de mantenimiento y renovación medio era de 57.000 €/km de vía principal (con un coste de mantenimiento de 33.000 € / km de vía y un coste de renovación de 24.000 € / km de vía). En la fase de actualización, la presentación de Gradinariu propone un valor medio de 80.400 €/km de vía principal (Fig. A1.2).

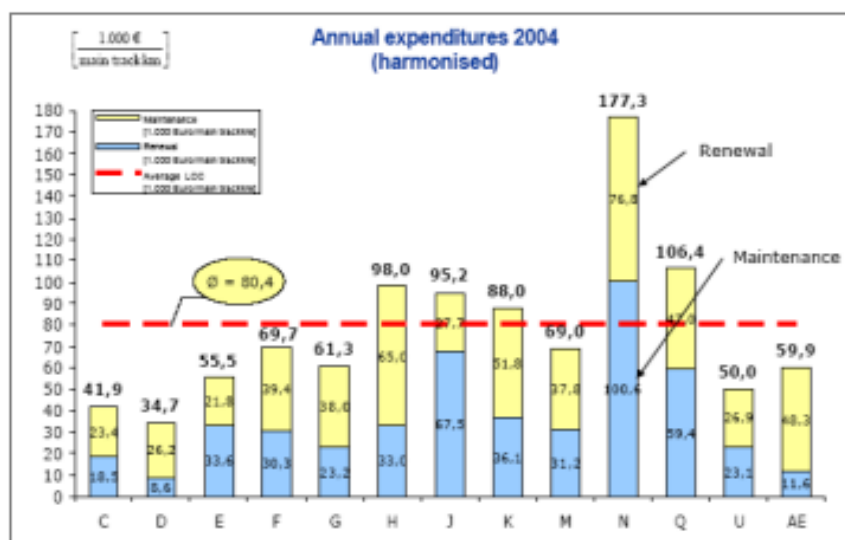


Figura 2.29 Gasto medio anual de mantenimiento y renovación por km de vía principal (armonizado). (Fuente: Gradinariu, 2005)



Sin embargo, el documento de la AZP que incluye los mismos países que el anterior excepto uno, establece que los costes de mantenimiento y renovación armonizados se pueden estimar en 69.650 €/km de vía principal.

Por otro lado, la presentación pone de manifiesto que los importes destinados a renovación de vía han aumentado un 60% de media entre 1996 y 2003 mientras que el gasto en mantenimiento se ha estabilizado (Fig. A1.3).

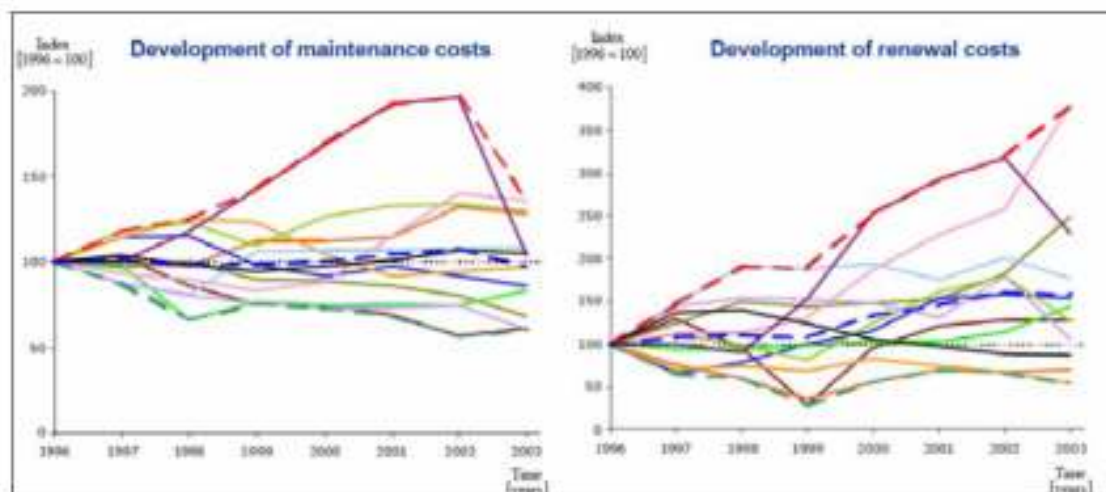


Figura 2.30 Evolución de los costes de mantenimiento y renovación (1996 – 2003). (Fuente: Gradinariu, 2005)

El informe del año 2000 indicaba la incidencia de cada gran partida en los costes de mantenimiento y renovación. En el caso de mantenimiento los movimientos de tierras, la vía y los túneles y puentes suponen un 57,7% de los costes en promedio, la señalización y las telecomunicaciones un 27,4% y la tracción eléctrica (subestaciones y catenarias) un 14,9%. En el caso de las renovaciones la primera partida es aún más importante con un peso de casi el 70% del total.

Destaca, además que la subcontratación no supone la reducción de los costes de mantenimiento ni de renovación (de hecho la tendencia que se observa es la contraria). Entre las distintas partidas que suponen la realización de las tareas de mantenimiento y renovación la mano de obra supone el 60% del total en el primer caso y el 30% en el segundo. Además, la necesidad de realizar las tareas de renovación sin interrupciones de tráfico supone un 50% más de coste (respecto a proyectos comparables sin interferencias de tráfico). La partida de compra de materiales es poco significativa en las operaciones de mantenimiento (8%) pero tiene mucha importancia en las de renovación (35%).



2.6.2 Report describing maintenance experiences (JRTS, 1992)

En el documento se lleva a cabo una descripción de las experiencias en el mantenimiento. En la introducción se hace un repaso a las principales cuestiones en la aplicación de la vía en placa en el Shinkansen Tohoku y Joetsu y su solución, partiendo de la experiencia en la línea Sanyo Shinkansen.

En lo que respecta a la vía en balasto, se realiza un interesante detalle de los costes de mantenimiento para el trayecto en balasto de la línea Sanyo. La tabla A1.3 refleja los kilómetros de vía reparados con su coste asociado y el tipo de mantenimiento empleado.

		VÍA EN BALASTO					
		75-76	77-78	79-80	81-82	83-84	Total
Bateo	¥ (millones)	541	546	593	558	528	2766
	longitud de vía (km)	365	343	341	338	302	1689
Nivelación	¥ (millones)	1197	1244	1084	1039	1001	5565
	longitud de vía (km)	326	374	259	237	231	1427
Alineación	¥ (millones)	140	135	107	80	55	517
	longitud de vía (km)	118	156	71	48	35	428
Reparación de sujeciones	¥ (millones)	39	100	120	137	66	462
	longitud de vía (km)	212	500	483	496	229	1920
Otros	¥ (millones)	787	1143	1454	1670	1468	6522
Total	¥ (millones)	2704	2988	3355	3483	3118	18767
por kilómetro	¥ (millones)	(A) 8.4	(B) 9.3	(C) 10.4	(D) 10.9	(E) 9.7	

Tabla 2.10 Coste de mantenimiento de la vía sobre balasto de la línea Sanyo



2.6.3 Terraplenes y balasto en alta velocidad ferroviaria. Segunda parte: los trazados de alta velocidad en otros países (Melis, 2006)

En el artículo se describen la evolución de los trazados de la alta velocidad en Francia, Alemania, Japón y otros países. En el caso de Japón, se hace una descripción de las principales características de las diferentes líneas, en relación a los terraplenes, túneles y viaductos. En base al porcentaje de estos elementos en las diferentes líneas el autor hace una comparación de los costes de mantenimiento de las líneas Sanyo Shinkansen y Tohoku Shinkansen en función de la tipología de vía instalada.

Es interesante ver de este artículo los costes de mantenimiento correspondientes al tramo de vía en balasto de la línea Tohoku Shinkansen, los cuales se encuentran representados en la figura A1.4.

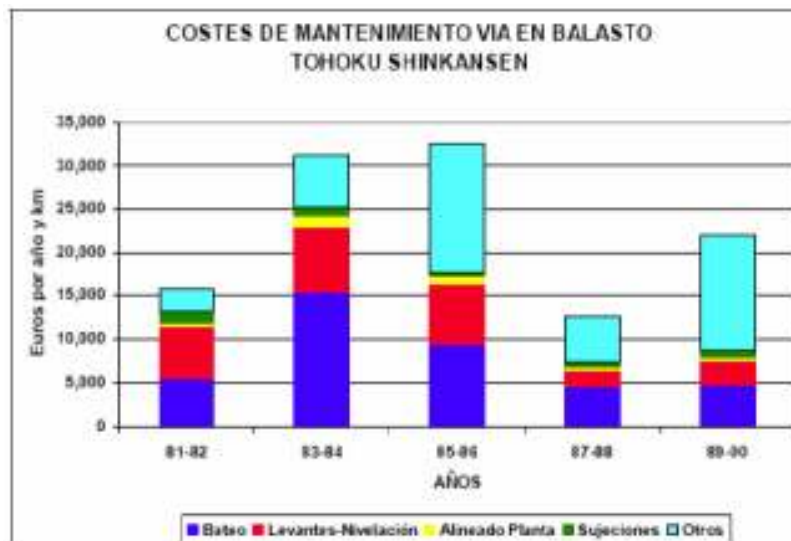


Figura 2.31 Costes de mantenimiento de los tramos con vía sobre balasto de la línea Tohoku Shinkansen. (Fuente: Melis, 2006)



2.6.4 La auscultación y los trabajos de vía en la línea del Ave Madrid-Sevilla: análisis de la experiencia y deducción de nuevos criterios de mantenimiento (Ubalde, 2004)

De forma general el coste de mantenimiento de vía se estima en una banda definida por 9.000 y 15.000 euros anuales por km de vía (López Pita y Robusté, 2002). Los costes de mantenimiento de la línea del Ave Madrid Sevilla se sitúan en torno a unos 12.000 euros anuales por km de vía. Si se considera un periodo de 15 años (período de tiempo usual entre dos renovaciones consecutivas de vía), el coste de mantenimiento supone entre un 1,1% y un 4,5% del coste de construcción de la línea.

En la tabla A1.5 se detallan los costes medios de mantenimiento (euros constantes de 1997) de algunas líneas de alta velocidad correspondientes a los trabajos más relevantes practicados a la superestructura.

DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS	COSTE DE MANTENIMIENTO ANUAL (€/km de vía)	
	Línea Madrid - Sevilla	Línea Paris - Lyon
Abastecimiento y mantenimiento del material y de las herramientas	360,60	835,78
Mantenimiento de la geometría: bateo, estabilizado, perfilado	4657,84	2047,20
Amolado	126,21	723,09
Mantenimiento de aparatos de vía	2488,19	2375,87
Personal de dirección, de control y de vigilancia	901,52	572,84
Mantenimiento de cercados, taludes y desherbado	768,69	525,89
Reparaciones excepcionales	1971,32	647,96
TOTAL	11274,37	7728,63

Tabla 2.11 Coste medio de mantenimiento en algunas LAV correspondiente a los trabajos más relevantes



CAPÍTULO 3: LA VÍA EN PLACA COMO ALTERNATIVA A LA VÍA EN BALASTO

3.1 INTRODUCCIÓN

Desde la concepción de la superestructura del ferrocarril de hace más de siglo y medio, se evidenció una estrecha semejanza con la de la carretera (Estradé, 1991). Cabe recordar que la carretera de piedra se desarrolló por Mac Adam en torno al año 1820. Los procedimientos de rehabilitación y renovación eran en esencia los mismos que en la construcción de carreteras. Lógicamente las diferencias resultaban del tráfico ligado al carril.

La aplicación en el marco de la carretera de los firmes flexibles modificó ese paralelismo, al desarrollarse una nueva tecnología que no se aplicó al ámbito ferroviario. Sin embargo, la introducción posterior de los firmes rígidos, utilizando el hormigón como sustituto de los productos bituminosos derivados del petróleo, hizo plantear la introducción de esta tecnología al ferrocarril. Este hecho fue paralelo a la puesta en explotación de la línea del Tokaido (Japón) en 1964, en la que se puso de manifiesto que la degradación de la calidad geométrica de la vía para una velocidad máxima de 210 Km/h, apenas podía ser neutralizada por las operaciones mecanizadas de mantenimiento nocturno.



La evolución de la vía en placa ha ido marcada firmemente por la apuesta de Japón sobre el uso de la vía en placa en la alta velocidad. Este país llegó a la conclusión de que debido a los elevados gastos en mantenimiento de la tradicional vía sobre balasto utilizada para alta velocidad, le llevaría a sustituirla por la vía en placa. De esta forma, la vía sobre losa ha sido objeto de estudios y ensayos en Japón y ha ido transformando la red ferroviaria de alta velocidad: Sanyo-Sinkansen (280 km de vía en placa), Tohoku- Sinkansen (480 km), Joetsu-Sinkansen (80 km), etc.

Por el contrario, Europa no siguió este camino. Las diferentes administraciones ferroviarias europeas construyeron pequeños tramos de vía en placa a modo de ensayo que se acreditaron desde el punto de vista técnico. Pero los elevados costes y la general desconfianza hacia la nueva superestructura que es la vía sobre losa, impidieron su aplicación de un modo generalizado.

Con la introducción en Alemania del tráfico de alta velocidad en el año 1991, solo en los tres túneles de la nueva línea Hannover-Würzburgo y en el Marksteintunnel de la línea Mannheim-Stuttgart se tendió vía sobre losa en una longitud total de 19.7 km. En los años 1993 y 1994 siguió la apuesta sobre la vía en placa con el tendido de otros tramos de vía sobre losa en las "líneas modernizadas de la unidad alemana": Berlín-Hamburgo y Berlín-Halle, así como en la nueva construcción de la curva de enlace Würzburgo-Aschaffenburg.

Pero también en estos casos se volvieron a criticar los elevados costes de la vía sobre losa en comparación a los costes ocasionados por la superestructura de balasto. Solamente cuando después de unos pocos años de tráfico a alta velocidad, el balasto acusó unos evidentes indicios de desgaste en forma de aparición de innumerables "lugares blancos" (balasto pulverizado), en especial en los puentes situados en el tramo Göttingen-Fulda, con una gran densidad de tráfico, también los que se mostraban críticos con la vía sobre losa empezaron a tener una actitud más positiva hacia la misma.

Al igual que en Alemania, la construcción de nuevas líneas de alta velocidad en el resto de países europeos a partir de la década de los ochenta, ha hecho replantear la conveniencia de aplicar soluciones diferentes a las superestructuras de balasto, aunque siempre bajo la sombra de una valoración económica desfavorable.

Dos aspectos fundamentales han hecho que en los últimos 20 años aumente considerablemente el interés por desarrollar modelos de vía en placa tecnológica y económicamente viables.

Por un lado, el aumento de tramos de túnel, viaducto y obras de fábrica presentes en las nuevas líneas europeas de alta velocidad hace resaltar las ventajas que la vía sobre placa tiene frente a la alternativa tradicional sobre balasto.

En segundo lugar, la aplicación de esta tecnología a otros sistemas de transporte, a parte del tráfico ferroviario a alta velocidad, como pueden ser las infraestructuras de metro, tranvía o transporte urbano de ferrocarril que, teniendo unos requerimientos basados principalmente en un mínimo mantenimiento, ha hecho ampliar el abanico de aplicaciones de esta tipología de vía, abriendo así un mercado que aún no se había desarrollado con plenitud.

Actualmente, el conocimiento sobre la vía en placa se basa fundamentalmente en la experiencia de los países pioneros en esta tecnología (Japón y Alemania) y en los ensayos y estudios que se están llevando a cabo por los países del "club" de la alta velocidad.



En este sentido, existen una gran cantidad de artículos dedicados a la experiencia positiva de la alta velocidad sobre vía en placa en Japón y Alemania y su influencia en las futuras líneas de alta velocidad europea (Estradé, 1991), (Escolano, 1998).

Estos estudios se han centrado en su mayoría en la valoración de la viabilidad económica del uso de una vía sobre losa, ya que éste ha sido siempre el factor más restrictivo. Actualmente, muchos estudios han demostrado la rentabilidad en términos de vida útil y de coste de mantenimiento, por lo que nos encontramos en un contexto que propicia la aparición de numerosos modelos y sistemas de vía en placa que buscan optimizar su comportamiento con el fin de ser competitivos en este nuevo mercado.

De esta manera, se plantea la necesidad de establecer un mecanismo de gestión de la información generada por la experiencia y los ensayos sobre los numerosos modelos que se crean y modifican de manera continua. Esto es, establecer un rigor en el uso o aplicación de una información que es abundante y que se incrementa rápidamente debido a los nuevos prototipos introducidos.

La historia plantea un escenario en el cual el uso de la vía en placa garantiza unas mejores condiciones de comportamiento para la infraestructura en base a la calidad geométrica ofrecida y a un mínimo mantenimiento. Por el contrario, la vía en placa ha sido y siempre será mas costosa que una vía tradicional de balasto.

La actualidad de la vía en placa esta muy extendida ya sea desde el punto de vista de vías construidas y en explotación como dentro del sector de la investigación y desarrollo de las empresas constructoras que ven en este tipo de infraestructuras un prospero negocio dentro del mundo del transporte tanto interurbano como de alta velocidad.

En este momento se empieza a ver la vía en placa como una alternativa más próxima. Proyectos como:

- Colonia-Frankfurt con circulación a alta velocidad e instalación de vía en placa a lo largo de 170 km.
- Alta velocidad en Holanda. F.Belga-Amsterdam con vía en placa.

Dan fe de una realidad en la que en muchos proyectos ferroviarios se inclinan hacia la opción de vía en placa.

Sin duda, la evolución de la alta velocidad está convergiendo hacia el uso de la vía en placa. Por un lado, las altas prestaciones geométricas que garantiza este tipo de infraestructura y, por otro, el concepto de vuelo de balasto que aparece en circulaciones a partir de 350 km/h con infraestructura de vía sobre balasto, han propiciado esta evolución.

Del conjunto de comparaciones que se podrían hacer entre ambas tipologías de vía, en la siguiente tabla se muestran las más representativas:



PARÁMETROS	VÍA EN PLACA	VÍA CON BALASTO
Supresión de cargas	Buena absorción de esfuerzos sobre carril.	Limitada estabilidad transversal.
Parámetros del trazado.	Permite radios de curvatura menores. Mejor adaptación al terreno.	Posibilita modificaciones en la geometría de la vía (reparación de asientos).
Altura del plano de la vía.	Sección menor de los túneles (-10 m2).	Ocupa mayor espesor de sección transversal.
Comportamiento de marcha de los vehículos.	Comportamiento garantizado para $V < 300$ kh/h.	Escasa incidencia por las vibraciones de la rigidez de la plataforma.
Freno por corrientes de Foucault.	Esfuerzos acotados por el incremento de la temperatura del carril.	Problema de absorción de los esfuerzos originados.
Emissiones sonoras.	Requiere la colocación de material absorbente.	Buena amortiguación acústica, corpórea y aérea.
Proyecciones de balasto.	Quedan descartadas.	Se pueden producir especialmente a alta velocidad.
Mantenimiento periódico.	Poco mantenimiento y largo periodo de vida útil.	Procedimientos acreditados de mantenimiento.
Disponibilidad.	Muy alta.	Intervalos de bloqueo poco prolongados para su renovación-conservación.
Rentabilidad.	Costes de instalación importantes si no se mejora la mecanización de su montaje.	Costes de instalación inferiores a los de la vía en placa (la mitad).

Tabla 3.1 Parámetros comparativos entre vía sobre balasto y vía sobre placa

En este marco, aun queda mucho camino para poder consolidar una experiencia completa y fiable acerca del transporte sobre vía en placa, una tipología de infraestructura que se está implantando de forma progresiva cada vez en más ámbitos del transporte ferroviario: alta velocidad, transporte interurbano, metro, tranvía, etc.



3.2 DEFINICIÓN DE VÍA EN PLACA

La vía en placa se caracteriza por la sustitución del balasto por un material más rígido (hormigón o asfalto) característico de los pavimentos viarios. Independientemente del tipo de material adoptado, estructuralmente se distingue: plataforma, placa base, placa principal, sujeciones, carriles, elastómeros y, en su caso, elementos intermedios, ya sea placas metálicas, bloques propiamente dichos, traviesas o losas.

La plataforma constituye la superficie que va a servir de apoyo a los diferentes elementos que componen la vía en placa. Sus características son fundamentales en el comportamiento general de la vía en placa ya que una plataforma de escasa capacidad portante y sin un drenaje profundo eficaz puede generar un proceso de socavación bajo la placa. Conviene, por tanto, mejorar las características de la plataforma mediante estabilizaciones, zahorras, suelocementos en caso de suelos mediocres. En la actualidad, la mayoría de los sistemas de vía en placa se utilizan losas de hormigón como placas de base.

Sobre la placa de base se sitúa la placa principal que constituye el conjunto que soporta los carriles, los cuales pueden fijarse directamente a ella por medio de los elementos de sujeción, o bien, a través de bloques prefabricados (bloques, traviesas o losas). Según los diferentes tipos de estructura de vía en placa, variará su forma y habrá que considerar diferentes aspectos. A este respecto, material para la sustitución del balasto, son placas de hormigón.

En todos los sistemas de vía en placa se coloca algún tipo de elastómero entre el carril y su base de apoyo (ya sea la placa principal, una chapa metálica, un bloque de hormigón o una traviesa). Además, en algunas soluciones se disponen otros niveles elastoméricos entre el elemento de apoyo del carril y la placa principal e incluso entre las placas de base y principal, con objeto de aumentar la elasticidad del conjunto y disminuir las cargas dinámicas al paso de los vehículos ferroviarios.

Sobre las placas principales de hormigón, los carriles pueden apoyarse de forma directa o mediante traviesas, las cuales, a su vez, pueden incorporarse de dos formas: hormigonando la placa una vez colocadas las traviesas de tal forma que éstas queden embebidas en aquélla al producirse el fraguado del hormigón, constituyendo un conjunto solidario y monolítico; o, interponiendo algún elemento, de naturaleza elástica, entre la placa principal, en general hormigonada in situ, y las traviesas que soportan los carriles. Asimismo cabe mencionar que en los modelos constituidos por losas prefabricadas de hormigón se suelen dejar las zonas de apoyo y sujeción de los carriles dotándolas de una forma similar a la de los extremos de las traviesas, realizando la misma función que si éstas hubieran estado embebidas de forma monolítica en la placa.

Por último, el elemento que materializa la fijación de los carriles a sus respectivos soportes son las sujeciones que en este tipo de superestructuras, al presentar mayores cargas dinámicas, conviene que sean muy elásticas y con la mayor superficie de contacto posible.

De entre todas las tipologías de vía en placa, las más comunes las podemos agrupar dentro de los siguientes grupos:

- Sistema de construcción de carril embebido.
- Sistema de vía en placa mixta con traviesas.
- Sistema de vía en placa continúa construida in situ.



- Sistema de vía en placa con bloques prefabricados aislados.
- Sistema de vía en placas prefabricadas.
- Sistema de construcción con losa flotante.



Figura3.1 Imágenes del proceso constructivo y vista final de acabado de vía en placa

A continuación detallamos de forma esquemática cuales son los aspectos más importantes y, por tanto, que suponen un punto crítico en el estudio de la viabilidad de una infraestructura ferroviaria destinada al tráfico de alta velocidad mediante vía en placa:

- Complejidad en el montaje de la infraestructura, que en caso de ser excesiva ralentiza el proceso constructivo encareciéndolo.
- La instalación de la infraestructura a cielo abierto comporta problemas asociados a las inclemencias del tiempo que pueden ocasionar problemas importantes en la fase de construcción.
- El mantenimiento ha de ser mínimo a la vez que garantice un nivel de explotación alto que permita rentabilizar la vía.
- El sistema ha de ser flexible y capaz de asumir una alta presencia de túneles y viaductos, elementos cada vez más presentes en los nuevos trazados ferroviarios, y que suponen un punto singular importante a considerar en el proyecto.
- El control geométrico de la vía es imprescindible para garantizar un mínimo de intervenciones de ajuste y renovación de vía.
- La reducción de vibraciones toma una importancia mayor en el caso de la alta velocidad.



- En un tema tan delicado como es el tráfico ferroviario de alta velocidad, un buen comportamiento garantizado por la experiencia de un proyecto en explotación supone en la mayoría de los casos del mejor indicador de calidad.

3.3 LA INSTALACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE VÍA EN PLACA

Cuando la vía sobre balasto no ha quedado en su posición correcta o bien, cuando por efecto de las cargas y empujes laterales del tráfico se ha asentado o desplazado, puede ser objeto de un rectificado en planta y alzado. La actual maquinaria pesada actúa sobre la vía bateándola, alineándola y compactándola con facilidad y bajo coste. Sin embargo, la vía en placa no se puede posicionar inicialmente de forma aproximada, para después proceder a un afinado con ayuda de maquinaria adecuada. La vía en placa debe tenderse con precisión milimétrica. Este hecho exige un alto grado de exactitud, no solo en la técnica de tendido de vía, sino también en la de replanteo.

Sus elementos tienen que tenderse y fijarse exactamente de forma inamovible frente a los puntos de referencia del replanteo. Al final de este proceso debe garantizarse un margen de exactitud entre puntos de referencia colaterales. Para ello, los métodos topográficos clásicos deben complementarse con sistemas de medición, ideados específicamente para poder alcanzar el alto grado de precisión que exige la alta velocidad. Resulta imprescindible la utilización de aparatos con tecnología láser.

A pesar de todas esas dificultades, podemos afirmar que en la actualidad existe una tecnología topográfica suficientemente desarrollada para poder garantizar la precisión requerida en la colocación de la vía en placa.

3.4 COLOCACIÓN DIRECTA SOBRE LA EXPLANACIÓN

La vía en placa tiene como elemento característico una placa portante de gran rigidez a la flexión y elevada resistencia transversal. Para circulaciones de alta velocidad debe ser catalogada como una estructura sensible a los asientos. Por tanto, los requisitos de la infraestructura están determinados por la posibilidad escasa de regulación de la geometría de la vía posterior al montaje. Así, en la actualidad, la vía en placa está concebida con una medida máxima de corrección en altura de sólo unos 29 mm. Por este motivo, las diferencias de asiento producidas por el tráfico sólo pueden admitirse de 5 mm como máximo, para que pueda colocarse la vía en su posición teórica mediante las actuaciones periódicas de mantenimiento.

Las posibilidades de compensación de la sujeción son de 4 mm para las tolerancias de montaje y de 5 mm para los asientos debidos al tráfico. Por tanto, los asientos residuales de la construcción de la infraestructura, debidos a su propio peso y a la deformación del subsuelo, no pueden sobrepasar los 20 mm. En el caso de los terraplenes de gran altura y longitud puede admitirse una mayor posibilidad de compensación, del orden del triple (60 mm). Así, para este valor sería necesario un asiento longitudinal uniforme de unos 190 m para una velocidad de 300 Km/h.

La infraestructura de la vía soporta solicitaciones dinámicas y cíclicas debido a las cargas de tráfico. A su vez, debe asegurar el drenaje y la colocación de las capas antiheladas. Los esfuerzos de compensación alcanzan valores del orden de 100 kN/m² en la superficie inmediatamente inferior al balasto para trenes circulando a 300 km/h, y menor a 50 kN/m² debajo de la losa soporte de una vía en placa. Asimismo, los esfuerzos dinámicos



provocados por el tráfico de alta velocidad en un subsuelo, alcanzan valores relevantes hasta profundidades de 3 a 3,5 m bajo la superficie de rodadura.

El espesor de la zona de apoyo, en el caso de la superestructura con balasto en trincheras, es de 0,5 m bajo la capa de protección contra la helada. Asimismo, la profundidad eficaz de asiento es de 2,5 a 3 m para la acción de las cargas ferroviarias (bogies de hasta 40 t). La vía en placa puede considerarse asegurada, si existe una capa portante compactada a una profundidad de 2,5 m por debajo de la placa soporte (capa de saneamiento anticongelante de 0,7 m y 1,8 m de material procedente de la excavación de trincheras del propio tajo). El sistema de cimentación de la vía en placa descansa sobre una capa antiheladas compactada, debiendo presentar un módulo de deformación superior a 100 N/mm².

Según el estado actual de conocimientos geotécnicos, puede afirmarse que las exigencias para trayectos de alta velocidad con superestructura de balasto, también son básicamente adecuadas para recibir vías en placa, que tengan gran capacidad de compensación por medio de las sujeciones de los carriles. Un valor estimativo para una delimitación sería, por ejemplo, el de 10 m de altura del terraplén (en el que no se sobrepasan los valores residuales de asiento de 20 mm) si el terraplén tiene un suelo normalizado y un basamento o subsuelo escasamente elástico. Cuando existen terrenos sueltos, poco compactados u orgánicos bajo la placa en una trinchera o pendiente casi a nivel, éstos deben ser cambiados hasta una profundidad de 4 m por debajo del nivel del carril.

En contraposición a la superestructura con balasto, la vía en placa exige unas medidas especiales para su drenaje. La vía en placa, la subestructura y el drenaje ejercen una acción recíproca entre sí. Así, en los trayectos de doble vía es necesario un drenaje central con evacuación cada 25 m. A su vez, éste debe ser superficial en vez del profundo de la superestructura con balasto. El agua no debe penetrar directamente en la capa de saneamiento anticongelante del borde de la vía. A su vez la plataforma debe presentar una pendiente hacia fuera del 0,7% para evitar posibles encharcamientos.

En todos los casos es necesaria una cuidada y detallada realización previa de auscultaciones de la infraestructura. La profundidad de las calicatas de los sondeos principales debe ser de 6 m por debajo del carril. Su distancia debe ser menor a 50 m. En determinadas condiciones geotécnicas (zonas de alto riesgo de deformación o en asientos no compensables) es aconsejable evitar la solución de vía en placa colocada directamente sobre la explanación.

Este criterio afecta por igual a todos los modelos de vía en placa ya que la rigidez y la casi nula posibilidad de modificaciones futuras de mantenimiento a un bajo coste forman la identidad de este estilo de infraestructura.

Sin pasar por alto esta idea y solo con el objetivo de marcar una diferencia jerárquica entre los modelos con que se está trabajando en cuanto a su aplicabilidad bajo este criterio, se debe decir que bajo posibles problemas de asiento, se minimizarían los costes de reparación en los casos en que la vía en placa se constituya a partir de bloques o elementos individuales prefabricados. De esta forma, el desperfecto ocasionado por un asiento diferencial de la explanación o, incluso, el producido por un descarrilamiento se solucionaría extrayendo los elementos dañados y cambiándolos por unos nuevos.



Figura 3.2 Picado de la losa de hormigón hasta la presolera

Este proceso de cambio ha de ser lo mas breve posible, ya que mientras se lleva a cabo la renovación, el servicio se ha de cortar temporalmente. En la siguiente figura se muestra como el rendimiento en trabajos de renovación de vía es inferior en el caso de arreglar una vía de hormigón que el de renovación total o el de ejecución de obra nueva.

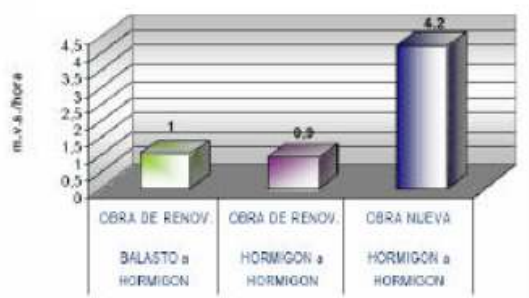


Figura 3.3 Comparativa de rendimientos de ejecución de obra

3.5 RUIDOS Y VIBRACIONES

Las vibraciones tienen su origen en irregularidades presentes tanto en la vía como en el material rodante que empeoran el contacto rueda-carril. Este contacto genera una reacción en cadena de la vía hacia la plataforma y se expande hacia los elementos cercanos a la vía, disminuyendo de intensidad con la distancia y en función del material que atraviesa.

La transmisión de vibraciones es en general de difícil cuantificación y generalmente incontrolable.

Las vibraciones de baja frecuencia de los vehículos circulando a alta velocidad imprimen en la vía sus propias frecuencias, originando vibraciones de resonancia y un elevado nivel de esfuerzos. Se inducen vibraciones de alta y muy alta frecuencia en el punto de contacto rueda-carril. Sus consecuencias son el desgaste ordinario y ondulatorio del carril, el deterioro de los granos de balasto o placa soporte de hormigón y el aflojado de la sujeción.

La problemática de las vibraciones también afecta en el caso de las líneas interurbanas de metro o trenes subterráneos. En este caso, la problemática reside en la existencia de elementos como túneles muy superficiales, edificios de varios pisos subterráneos, terrenos



geológicos muy transmisibles, construcciones sensibles (hospitales) y una calidad de vida cada vez más exigente en las ciudades.

En ambos casos, la trascendencia de ambos aspectos es importante pero con diferente alcance, por lo que en este punto, se trabajará por separado la problemática del ruido y vibraciones en la vía en placa destinada a alta velocidad y el caso de vía en placa para uso urbano.

Ruidos y vibraciones en la alta velocidad

Los primeros ensayos en el Sanyo Shinkansen probaron que el nivel de ruido de la vía en placa era de unos 5 dB más alto que en la vía sobre balasto. En consecuencia, desde 1970 se analizaron en Japón diferentes tipos de vía en placa que mejoraran la respuesta frente al ruido. Para ello se aumentó la elasticidad del material soporte de la placa de hormigón. Se han experimentado varios sistemas de superestructura de vía antiruido, como el concepto Danchoku (vía con traviesas flexibles sobre plataforma rígida de hormigón), vía sobre balasto con traviesas flexibles, y vía en placa antivibraciones de hormigón pretensado.



Figura 3.4 Reducción sonora para vías de alta velocidad

Según Estradé (1998), la reducción del nivel de ruido ha llegado a ser de 8 dB en la vía en placa de la sección Kitakami del Tohoku, en comparación con la inicial del Sanyo. Teniendo en cuenta que la limitación del ruido ambiental es de 70 dB a 300 Km/h, la mejora conseguida no es nada despreciable.

De los estudios teóricos y las mediciones llevadas a cabo en los trabajos encaminados a optimizar el aspecto acústico, se comprueba que el comportamiento de las placas elásticas intermedias no logra una reducción de ruido tan notable como una cubierta absorbente de ruidos, con la que se pueden alcanzar unas intensidades emisivas similares a las de vía tradicional, y en este sentido se están desarrollando mejoras.

En los túneles de nueva construcción se ha colocado un recubrimiento de hormigón poroso, que ha reducido notablemente el nivel de la emisión, sin llegar a alcanzar los niveles de la vía sobre balasto. Este tipo de revestimiento presenta la ventaja de poder ser utilizado como vía de tránsito para personas y vehículos ligeros en caso de emergencia.

No obstante, los últimos modelos aplicados en el análisis del nivel sonoro de las cajas de grasa en la vía o del ruido de rodadura, han demostrado las ventajas de la vía en placa, respecto al nivel sonoro en el interior de los vehículos. Dada la alta rigidez de la



superestructura de vía con balasto en las nuevas líneas de alta velocidad, la vía en placa ofrece indudables ventajas por la menor frecuencia de la resonancia rueda-carril. Por contrapartida, presenta claros inconvenientes en la banda de altas frecuencias.

Una medida más eficaz para reducir la transmisión de vibraciones del suelo hacia una estructura cercana, consiste en aislar la vía utilizando una vía sobre placa flotante. Con esto se añade un nivel más de elasticidad. Al respecto, hay ya 25 años de experiencias positivas con este sistema en las líneas subterráneas metropolitanas, lo que garantiza su aplicación en el futuro.

Siguiendo por este camino, en 1994, diferentes compañías ferroviarias formaron un consorcio con la finalidad de encontrar un modelo de vía más silencioso y con bajo coste de mantenimiento.

Tras la realización de ensayos y análisis, se vio que la causa principal del ruido era la interacción del carril con los elementos más próximos. Se estudió el efecto de la forma y el peso del perfil del carril, la distancia entre soportes, la rigidez de los distintos elementos, etc. Las conclusiones del estudio demostraron que un soporte continuo del carril reducía considerablemente la emisión de ruido.

Así, se realizaron los ensayos sobre la tipología de vía en placa del carril embebido, la cual ofrece la oportunidad de optimizar las rigideces horizontal y vertical del soporte del carril, además permite también situar un absorbente de ruido entre carriles.

Ruidos y vibraciones en el transporte urbano.

Aspectos como el trazado, la calidad del material rodante y otras situaciones son los factores que pueden incidir de una manera más directa sobre la interacción rueda-carril y por lo tanto, agravar el impacto que el sistema ferroviario produce sobre su entorno. Más concretamente, los elementos más influyentes en la generación de vibraciones son:

- Existencia de curvas de radio pequeño.
- Fuerza dinámica de contacto rueda-carril
- Flexión secundaria del carril, en sistemas de vía con apoyos discontinuos.
- Discontinuidades en la vía: juntas de dilatación, juntas aislantes, diagonales, etc.
- Defectos en la geometría del carril como en el material rodante.

En el caso de la generación de ruido, las principales fuentes generadoras son:

- Vibraciones generadas por rodadura e impactos
- Deslizamientos relativos rueda-carril.
- Ruido aerodinámico (solo en el caso de alta velocidad).
- Otros: señales de aviso, ventilación, megafonía, motores, compresores.

El orden de magnitud de estas patologías se encuentra en unos 5-10 dB para el caso de juntas en mal estado, 5 dB para defectos en la superficie del carril, 10 dB cuando nos encontramos con desgaste ondulatorio y de 3 a 15 dB cuando existen defectos en llanta.

Ante esta problemática en los ámbitos urbanos, se puede actuar mediante la actuación directa sobre la infraestructura (implantación de sistemas de vía antivibratoria, adaptación de planes de mantenimiento o eliminación de discontinuidades en la vía), la modificación de parámetros de explotación y mediante el aislamiento de edificios.



Para bajar la frecuencia propia solo podemos actuar en 2 elementos, disminuyendo la rigidez o aumentando la masa. Bajar la rigidez debajo del carril, tiene un límite, que es la inestabilidad de la vía, mientras que aumentar la masa tiene el inconveniente del coste. Por este motivo, la carrera por buscar una solución adecuada a cada problema se ha de llevar a cabo considerando cada caso específico por separado.

3.6 COMPARATIVA VÍA EN PLACA-VÍA SOBRE BALASTO

Se analizan a continuación las ventajas y desventajas que puede presentar la vía en placa frente a la de balasto:

Ventajas:

-Reducción del mantenimiento:

Tiene mejor comportamiento a la degradación, esto hace que tenga menor mantenimiento, permitiendo más tiempo de explotación comercial, minimizando la afección que pueden tener sobre el entorno: menos ruido y vibraciones en horas nocturnas en las que se llevaría a cabo la conservación, menos emisiones de gases, etc.

-Reducción del espesor:

El espesor necesario será menor que una vía en balasto. Los túneles serán de menor diámetro, un ahorro económico muy considerable en la infraestructura. En viaductos permite aligerar la estructura.

-Evacuación de los pasajeros:

En caso de avería o incidencia, proporciona unas condiciones adecuadas para la evacuación de los pasajeros.

-Facilita las operaciones de limpieza:

En los entornos urbanos es mucho más frecuente la instalación de vía en placa, facilita la limpieza y evita las operaciones de bateo y perfilado en la banqueta de balasto.

-Bases para el trazado de vía óptima:

Posibilita un trazado de vía más rectilíneo en la alta velocidad ya que permite construir curvas más cerradas y con inclinaciones más pronunciadas.

-Reducción de problemas de filtraciones: Las vías en balasto en algunas ocasiones pueden tener problemas de encharcamientos y supresiones de agua por su alto grado poroso. En la vía en placa al ser una losa de hormigón, estos problemas se reducen.

Desventajas:

-Montaje de la vía en balasto más económico:

La vía en placa es más costosa económicamente, su rendimiento es menor, los materiales son más costosos y requiere de buenos drenajes en la losa.

-Mayores costes en rectificación de alineación y nivelación:

Cuando la vía sobre balasto no ha quedado en su posición correcta o bien, cuando por efectos de cargas y empujes laterales del tráfico se ha asentado o desplazado, puede ser objeto de un rectificado. En la vía en balasto se puede corregir con maquinaria pesada, la bateándola, alineándola y compactándola con facilidad y bajo coste. Sin embarco, la vía en placa no se puede posicionar con ayuda de maquinaria, se tendría que optar por otras soluciones de más inversión.



-Montaje con menor tolerancia:

La vía en placa antes del hormigonado debe de alcanzar un alto grado de exactitud en cuanto a su posición. En cuanto a la vía en balasto, no es necesario tal grado de exactitud, dado que posteriormente se afina con la maquinaria pesada.

-Problemática a cielo abierto:

Los materiales puede verse afectados en cuanto a reacciones con el agua, curados, incrementos de temperatura, etc, estos problemas se pueden minimizar siguiendo las instrucciones o normativas pertinentes. En cambio, los movimientos del carril por esfuerzos térmicos pueden suponer grandes consecuencias sobre la geometría de la vía y el comportamiento estructural del sistema.

-Peor comportamiento con respecto a las vibraciones y el ruido:

Dado al no ser poroso no absorbe el ruido y debido a la reflexión en la superficie de hormigón de la losa el nivel de vibraciones es más elevado. Sin embargo, las investigaciones en estos campos han dado lugar a tipologías de vía en placa capaces de atenuar los niveles, incluso por debajo de los valores habituales en la vía con balasto.

Existen muchas tipologías de vía en placa y cada una de ellas tendrá unos comportamientos específicos, pero todas ellas guardan un mismo esquema estructural compuesto por plataforma, placa de base, placa principal, elastómeros, sujeciones, carriles y, en su caso, traviesas. Sin embargo existen diferencias intrínsecas que les confieren comportamientos dispares. Así, para poder abordar el problema de conocer la tipología de vía en placa más adecuada para afrontar una determinada problemática inducida por el ámbito metropolitano, es necesaria su previa clasificación de las tipologías comerciales de vía en placa en familias de características similares.

El montaje de vía en placa es laborioso, con rendimientos bajos y ha de ser muy preciso, implicando una inversión mayor que la vía en balasto. En cambio, tendrá una compensación durante fase de explotación ya que necesita menos mantenimiento. De ahí que la alternativa de vía en placa se esté aplicando de forma específica en infraestructuras de metro, tranvía y transporte urbano de ferrocarril, en las que el mínimo mantenimiento se convierte en el principal requisito de explotación.

Así y todo, las diferencias que hacen de la vía en placa un sistema menos competitivo que la vía en balasto, promueven que durante los últimos años estén apareciendo nuevos estudios e investigaciones que buscan soluciones a los problemas relacionados con el deterioro del balasto, buscando alternativas diferentes a la vía en placa para mejorar o sustituir el balasto natural.

Prueba de ello son los dos próximos capítulos de la tesina, en los que pasamos a presentar dos proyectos, en los que basándonos en la aplicación de la ingeniería y de la ciencia de materiales, por un lado buscamos la creación de un nuevo material granular artificial, aplicable en infraestructuras ferroviarias, que pueda sustituir al balasto natural y mejore sus características funcionales, y por otro, conseguir dotar de mayores prestaciones al balasto mediante un nuevo tratamiento superficial (agregados de poliuretano).



3.7 ARTÍCULOS RELACIONADOS CON EL COSTE DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA EN PLACA

3.7.1 Report illustrating economy of Slab Track (JRST, 1992)

En este artículo, los "Japan Railway Technical Services", llevan a cabo una comparación económica entre los costes de mantenimiento de la vía en placa y la vía sobre balasto para tres líneas japonesas: la Tohoku, la Joetsu y la Sanyo. Los valores son los indicados en las tablas A1.1 y A1.2

	Tohoku Shinkansen	Joetsu Shinkansen	Sanyo Shinkansen	Total
Longitud de vía (km)	840	510	549	1.899
Coste de mantenimiento (millón ¥/km)	7,01	6,08	5,84	6,42 (media)

Tabla 3.2 Costes de mantenimiento (precios de 1986) sin incluir los costes salariales de los empleados para la vía en placa

	Tohoku Shinkansen	Joetsu Shinkansen	Sanyo Shinkansen	Total
Longitud de vía (km)	90	29	540	659
Coste de mantenimiento (millón ¥/km)	17,01	13,48	12,53	13,30 (media)

Tabla 3.3 Costes de mantenimiento sin incluir los costes salariales de los empleados para la vía sobre balasto

Además, el documento recoge también los costes salariales de los empleados, siendo iguales a ¥ 1,65x106/km en el caso de la vía en placa, y de ¥ 5,5x106/km en el caso de la vía en balasto.



3.7.2 Análisis técnico-económico para la definición tecnológica del equipamiento de la vía para la línea de alta velocidad Madrid – Zaragoza –Barcelona – Frontera Francesa (Tramo Madrid – Lleida). Tifsa (1999)

Este estudio realiza un análisis económico orientado a determinar la viabilidad de la posible implantación del sistema de vía sin balasto en zonas de la línea española de alta velocidad Madrid-Barcelona. Para ello consideraba en detalle los costes de inversión, de mantenimiento y renovación de la vía sin balasto.

Como referencias previas para los costes de mantenimiento, el estudio señala la experiencia japonesa, en la que la que el coste de mantener vía en placa representa entre el 33% y el 18% del coste de mantener vía sobre balasto, y la experiencia francesa, que sitúa la reducción de los costes de mantenimiento entre un 47% y un 50% cuando se opta por la vía en placa.

El estudio toma como punto de partida los costes directos de mantenimiento de la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla (476,9 km), entendiéndose por tales aquellos costes de personal y de servicios exteriores directamente asignables a los tramos de la infraestructura (Madrid – Getafe, Getafe – Córdoba y Córdoba – Sevilla). En el año 1997, y para el conjunto de la línea, los costes directos de mantenimiento fueron los indicados en la tabla A1.4.

Concepto	Importe (M€)
Mantenimiento de vía	4,441
Mantenimiento de desvíos	4,718
Tratamiento herbicida	0,186
Amolado de carril	0,120
Control geométrico	0,950
Materiales	0,343
TOTAL	10,752

Tabla 3.4 Costes directos de mantenimiento de la línea Madrid-Sevilla. Año 1997

De estos datos, el estudio deduce un valor unitario del coste directo de mantenimiento en la línea Madrid-Sevilla igual a 22.538 €/ km de línea y año (1997).

Para estimar el incremento de coste de mantenimiento en la línea Madrid – Barcelona debido a la mayor velocidad máxima (350 km/h frente a 270 km/h), el estudio multiplica este valor por un coeficiente de 1,7, obtenido a partir de la fórmula francesa $C = 5000 + 2,75 \cdot V$, en la que C es el coste de mantenimiento en francos por km de vía y V la velocidad en km/h. Se obtiene así un coste directo de mantenimiento de 38.345 €/ km de línea y año (1997) para el tramo Madrid-Lleida.





CAPÍTULO 4: BALASTO ARTIFICIAL

4.1 LA INNOVACIÓN Y EL BALASTO

En las últimas décadas, la creciente conciencia ambiental de la sociedad ha propiciado un cambio de dirección hacia el ferrocarril. Así lo demuestran las nuevas directrices europeas en materia de transporte, que presentan el ferrocarril como uno de los sistemas de transporte más sostenibles, y por tanto, con más futuro.

Este creciente interés alrededor del ámbito ferroviario, ha exigido avances en el sector para poder alcanzar y sobrepasar las expectativas que en torno a éste se crearon. De este modo ha sido fundamental la contribución de diversas investigaciones e innovaciones en lo que respecta tanto al material rodante, como al conjunto de vía.

Centrándonos en el conjunto de vía, se destacan: la mejora introducida con el paso de las traviesas de madera hacia las de hormigón armado, el paso de las fijaciones rígidas hacia las elásticas, la utilización de suelas bajo traviesas para mejorar el apoyo de las mismas y la soldadura de los carriles para evitar la discontinuidad de la superficie de rodadura entre otras.

A pesar de todas las mejoras introducidas existe aún, un elemento de vía sobre el cual no se ha innovado y presenta inconvenientes que necesitan soluciones reales en el corto plazo. La necesidad de prolongar la vida útil de la capa de balasto, conjuntamente con la



demanda ambiental de reducir la utilización de las materias primas, obligan a buscar soluciones inmediatas a los problemas relacionados con el deterioro del conjunto de balasto.

Una vez introducidas las problemáticas que surgen en torno a la acelerada degradación de la capa de balasto y a su atraso respecto a los demás elementos que componen la vía, se ha comenzado a plantear desde distintas ópticas, la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías que den una solución eficaz a los inconvenientes existentes y contribuyan hacia una mejora de las infraestructuras ferroviarias.

En cuanto a la sustitución del balasto por elementos de hormigón armado, se ha realizado un proyecto llamado “Balasto Artificial”. El mismo propone la elaboración de elementos de morteros de alta resistencia con geometrías determinadas, como alternativa a las rocas que conforman el balasto. De este modo se podría tener un mejor control del funcionamiento de la capa de apoyo de traviesas. Los resultados que han obtenido son bastante esperanzadores en lo que respecta a la resistencia y dureza superficial de las partículas, dando inicio hacia la búsqueda de alternativas mejoradas.



Figura 4.1 Suela bajo traviesa



4.2 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, GEOMÉTRICAS Y FUNCIONALES DEL BALASTO ARTIFICIAL

Los diferentes estudios realizados muestran que el grado de “compactación” del balasto (en este caso se hablaría de estabilización o de consolidación) es un factor muy importante en su comportamiento así como que el balasto no es un material uniforme en función de la zonas en las que se está estudiando, zonas que se definen a balasto, zonas definidas por las acciones de bateo y estabilización y por la concentración de cargas transmitidas por la parrilla de vía.

En cuanto al estado de compactación del balasto bajo traviesa, y aunque depende de los autores, cabe diferenciar cuatro fases de comportamiento asociadas al estado del balasto:

- Como balasto NO estabilizado
- Una fase de “estabilización” ya sea mediante la acción de máquinas estabilizadoras (o, en su defecto, por el paso a velocidades reducidas de un número establecido de ejes o de TBR)
- Una fase de “consolidación”, en la que, después de estabilizado mecánicamente, se somete al paso de las primeras circulaciones normalmente también con ciertas restricciones (o, a falta de estabilización mecánica, como última etapa de la estabilización por paso de circulaciones)
- Una fase de “servicio normal” en la que el balasto cumple su función bajo las cargas de tráfico de la línea con condiciones “normales” de mantenimiento
- Una fase de “fin de vida” del balasto en la que el comportamiento del balasto es cada vez peor por pérdida de rugosidad, contaminación, rotura de granos, por factores ambientales, etc.

Aunque depende de los autores las diferentes fases se pueden asociar a valores de tráfico en ejes o toneladas brutas (se puede estimar 20t/eje), la estabilización puede ser mecánica o estar asociada al paso de 50.000 ejes, la consolidación se puede asociar el paso de entre 20.000 y 50.000 ejes, y la fase de servicio normal hasta los 15 a 30 millones de ejes. Por otro lado, se ha comprobado que el comportamiento del balasto puede estudiarse en situaciones de carga que son muy diferentes. Si bien el comportamiento bajo cargas de tráfico en una situación “normal” es la tónica general, parece necesario estudiar la degradación del balasto bajo diferentes sollicitaciones:

- bajo cargas de tráfico en situación “de referencia” (buen apoyo de traviesa, ausencia de sobrecargas dinámicas excepcionales)
- bajo cargas de tráfico, en situación “degradada” (descenso de la sustentación en traviesa, baile de traviesa, sobrecargas dinámicas excepcionales)
- bajo acciones de bateo

Las sollicitaciones bajo cargas de tráfico en situación de referencia son las más moderadas, pero alcanzan decenas de millones de ciclos. Las sollicitaciones en situación degradada deben tener un número mucho más reducido de ciclos (uno o dos órdenes de magnitud) pero las sollicitaciones a las que puede estar sometido el balasto, en especial en el caso de traviesas descalzas, pueden ser muy elevadas. En el caso del bateo, si bien estamos tratando (en sucesivas operaciones de bateo) de muy pocos ciclos de carga, las sollicitaciones son, muy probablemente, las más elevadas: la agresividad del bateo queda patente en la práctica en el número reducido de veces que se puede aplicar en un balasto. Los estudios hallados en la bibliografía plantean el balasto natural como una hipótesis de partida y por lo tanto no plantean la optimización del comportamiento a fatiga del balasto



natural aunque sí hacen algunas reflexiones sobre ajustes del huso granulométrico y apuntan a que la estabilidad del sistema crecerá con el incremento de la trabazón entre las partículas o del rozamiento interno del sistema granular, pero sin abordar el problema de que dicho incremento dificultaría el bateo de las mismas, o, al menos, aumentaría el riesgo de degradación del balasto en las operaciones de bateo.

En las modelizaciones y estudios del comportamiento de balasto realizados hasta fecha, las dimensiones de los granos se ajustan a parámetros directa o indirectamente inferidos del balasto natural y cumplen husos granulométricos normativos. Salvo contadas reflexiones sobre ajustes del huso granulométrico, no se han hallado pues referencias a generación de conjuntos granulares “artificiales”, ni a optimaciones en este tipo de materiales granulares, que hayan permitido obtener orientaciones en cuanto a modificaciones del huso granulométrico o de la geometría de las partículas respecto de una referencia “balasto natural”.

La definición preliminar de diseño de grano de balasto artificial se ha basado en el planteamiento del problema, el análisis de los condicionantes y en aportar las definiciones necesarias para el desarrollo del programa de simulaciones y el plan de ensayos.

A partir de las experiencias recogidas en normativas, se puede hacer una clasificación en tres niveles de “geometría” de grano: forma (geometría base), indentaciones (anfractuosidad) y rugosidad (aspereza, textura) con posibles distribuciones estadísticas de tamaños que pueden no ser independientes.

Se han analizado diferentes fuentes de datos como elementos de reflexión:

- El huso granulométrico como elemento definitorio del medio granular en el caso de geometría aleatoria y caótica de los granos, como es el caso del balasto natural, como indicador de posibles distribuciones de los granos de balasto artificial atendiendo a su tamaño de “esferas circunscritas”
- Las alternativas en la forma de obtener o de fabricar las partículas como elemento condicionante de una posible “forma” del grano teniendo en cuenta la naturaleza del material base más probable (morteros de alta resistencia)

Se ha podido comprobar que, en el caso del balasto natural, la normativa española ha evolucionado en los últimos años a un huso más estrecho en el caso del balasto de mayor calidad (descarte de tamaños superiores 63 mm) aunque existen opiniones dispares sobre la mejora del comportamiento del balasto modificando el huso granulométrico.

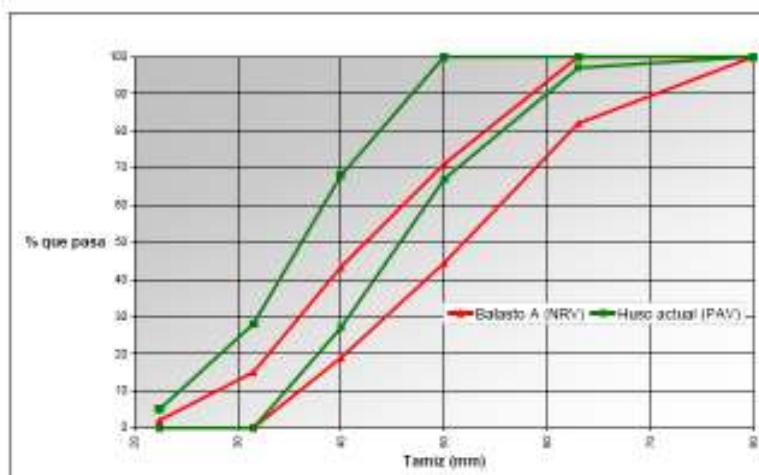


Figura 4.2 Evolución del huso granulométrico de balasto A en la normativa española



En todo caso, en el diseño preliminar de la geometría, se contempla el huso normativo y variaciones respecto de este huso de referencia, proponiendo al menos dos variaciones: una de huso más “amplio” (medio granular mejor “graduado”) y otro más estrecho (medio granular de tamaños más “uniforme”).

En la medida en que los modos de fabricación pueden ser un condicionante de “formas” del grano, se han evocado de forma muy amplia, diferentes técnicas y alternativas de producción a gran escala de granos de balasto artificial (moldeo de las partículas, con geometrías que permitan un fácil “desencofrado”, machaqueo de bloques de material con planos de fractura preferentes, “estallado” controlado de bloques de material).

En las modelizaciones del comportamiento del balasto halladas en la bibliografía existente se presentan dos tendencias, en cuanto a la forma de los granos simulados:

- generación ‘matemática’ de la forma de partículas, generalmente de formas sencillas (discos o polígonos en 2D; esferas o racimos de esferas en 3D)
- generación ‘indirecta’ por digitalización de partículas reales de balasto, creando bibliotecas de granos, en algún caso con sub-librerías específicas de granos con diversas combinaciones en cuanto a índice de forma de partículas

Para las modelizaciones del comportamiento, y ante el amplio abanico de posibilidades, se ha optado por geometrías sencillas de tipo esférico o elipsoidal, se obviará la geometría de indentaciones y de rugosidad, que se idealizará mediante el ángulo de rozamiento del medio granular, que se obtendrá calibrando adecuadamente los parámetros de los modelos que definen las fuerzas tangenciales en contacto entre partículas.

Para la realización de la campaña de ensayos, y en particular para el ensayo de LA del material artificial se ha optado por dos geometrías: la caótica derivada del machaqueo de grandes bloques de mortero y una geometría “ordenada” compuesta por granos cúbicos de 4 cm x 4 cm x 4 cm ya que esta arista de 4 cm se corresponde por un lado con el tamaño medio de grano de balasto y, por otro lado y a efectos de operatividad, con las dimensiones de las probetas normalizadas de ensayo de morteros (4x4x8 y 4x4x16).

Una definición de los requisitos mecánicos y funcionales que deberá cumplir el material artificial con el que se elabore el balasto artificial ha requerido un conocimiento completo y preciso de las características del balasto natural.

Esta tarea se ha estructurado en dos partes:

En una primera parte se ha analizado los esfuerzos y tensiones que se producen en el balasto natural en servicio y los fenómenos de degradación del mismo

En una segunda parte se ha realizado un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas del balasto natural, basadas en los datos de canteras de balasto y en una amplia campaña de ensayos del material natural, estableciéndose los umbrales de características mecánicas que debe cumplir el material artificial que se aplique en la fabricación del futuro balasto artificial. En esta tareas también se han evaluado (y comparado con los umbrales antes mencionados) las características mecánicas de los morteros de alta resistencias propuestos como material base de un futuro balasto artificial.

Los modelos que consideran la capa de balasto como un medio continuo permiten estimar una tensión media del balasto en determinados puntos. Estas tensiones bajo traviesas



varían según autores y modelos pero pueden estimarse entre 150 kPa y 300 kPa para ejes de 200 kN sin fenómenos especialmente severos de carga dinámica, siendo estos valores inferiores a las tensiones consideradas “límite” por varios autores para balasto y que oscilan entre 400 kPa (López Pita) y 500 kPa (Esveld). Por otro lado, y para contacto entre cara inferior de traviesa y capa de balasto, hay estudios que han evaluado la superficie de contacto real entre aristas de las partículas de balasto y la superficie de hormigón de la traviesa, oscilando esta superficie entre el 2% y 8% para las traviesas más usualmente utilizadas. Esto conduciría a tensiones en los contactos relativamente bajas (15 MPa), un orden de magnitud inferiores a las resistencias a compresión de la rocas utilizadas para balasto (la norma española establece un mínimo de resistencia de 120 MPa para la homologación de una cantera). Niveles de tensiones más acordes con tensiones de rotura se obtienen considerando pocos contactos por grano de balasto y superficies de contacto milimétricas.

Los diversos modelos de análisis del balasto como medio discreto no dan valores de tensiones de contacto sino de fuerzas entre partículas, pero generalmente poco significativos ya que son en general modelos basados en geometrías simplificadas.

En todo caso, las solicitaciones bajo cargas de tráfico en situación de referencia pueden ser moderadas, pero alcanzan millones de ciclos, mientras que las solicitaciones en situación degradada (falta de sustentación de la traviesa) son mucho más elevadas pero con un número necesariamente reducido de ciclos (uno o dos órdenes de magnitud) por intervención de mantenimiento, y las solicitaciones en el caso del bateo representan, en sucesivas operaciones de bateo, muy pocos ciclos de carga, pero con las solicitaciones probablemente más elevadas lo que justifica que el número de bateos a los que se puede someter a un balasto está limitado a 5-10 veces.

La investigación sobre el material artificial que debe servir de base de un balasto artificial se puede basar en dos aproximaciones diferentes que se describen a continuación:

a) La “vía natural”, entendiéndose como tal la identificación de los parámetros de comportamiento mecánico de rocas “sanas” que sirven para la producción del balasto. Estos parámetros, en una primera aproximación, serán los mínimos que deba cumplir el futuro material artificial, obviando, en un primer paso, si dichas características mecánicas son una a una necesarias o si algunas son intrínsecas al material natural pero no necesarias para su correcto comportamiento de una capa de balasto

b) La “vía analítica”, por la que se entiende la correcta interpretación de estos parámetros resistentes en el comportamiento del balasto. En este sentido sería necesario:

- diferenciar los mínimos derivados del análisis de las rocas, y que deben respetarse.
- diferenciar los mínimos derivados del análisis de las rocas que son propiedades intrínsecas de la roca y que pueden reducirse
- diferenciar aquellas características que, de forma particular, deben “potenciarse”, es decir, cuya mejora incide de forma sustancial en la mejora del comportamiento del balasto

La identificación de las características mecánicas de las rocas empleadas en la producción de balasto no es muy precisa. Se ha realizado en este sentido un esfuerzo en el análisis de los ensayos actualmente definidos para rocas y en la búsqueda de valores disponibles en bibliografía, que son de carácter muy disperso.

Habiendo focalizado el balasto artificial, por motivos económicos obvios, en la definición de las alternativas en micro-hormigones y morteros de alta resistencia, con bases cementicias



y diferentes aditivos, se han tenido en cuenta los avances en la definición de las propiedades mecánicas de los hormigones y morteros, en especial en lo referente a la energía de fractura.

Como complemento necesario, y debido al alcance limitado de los ensayos normalizados para hormigones, ha sido necesario analizar las técnicas actualmente utilizadas en la caracterización de las propiedades de los materiales cerámicos estructurales, tanto en la mejora de la caracterización de la tenacidad o energía de fractura como en la aplicación de técnicas de indentación en la evaluación de la dureza superficial.

En esta tarea se ha realizado un análisis exhaustivo de las características mecánicas de las rocas para balasto de las canteras españolas, utilizando los resultados de ensayos de control de estas canteras, que han sido una fuente de información de enorme valor.

Sin embargo, en el balasto natural, la normativa en general y la española en particular establecen caracterizaciones estructurales del material muy limitadas: la resistencia a compresión de la roca y el comportamiento del medio granular derivado de machaqueo y tamizado frente al ensayo de Los Ángeles.

Se trata, pues, en términos de ciencia de materiales, de una definición muy escasa, máxime teniendo en cuenta que el ensayo de Los Ángeles es un ensayo de carácter empírico, con fenómenos de impacto y desgaste complejos y que no sólo depende del material base sino muy sensiblemente de la geometría del medio granular.

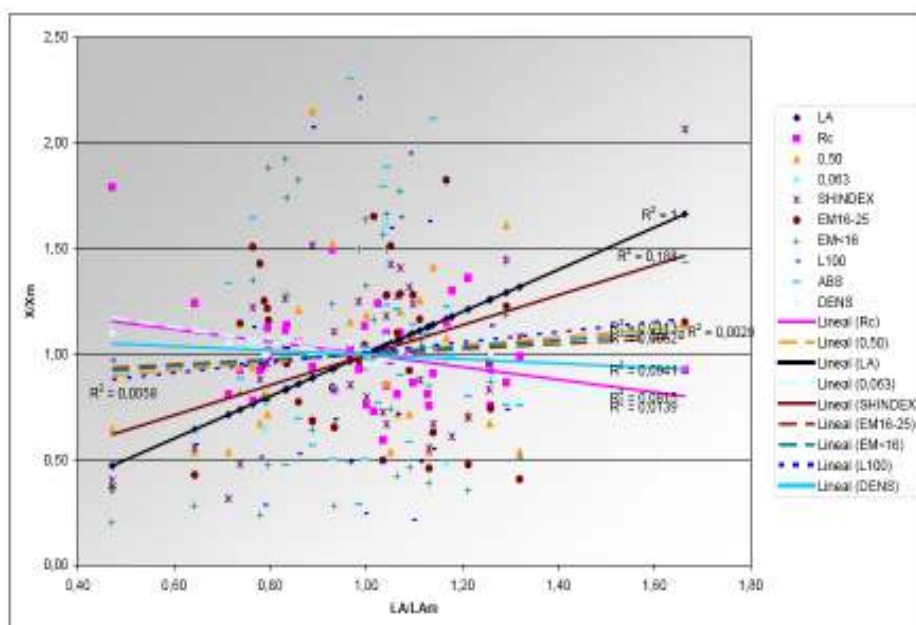


Figura 4.3 Análisis de la relación entre el coeficiente de LA y los diferentes ensayos de caracterización parámetros del balasto

Es por este motivo que se ha definido una compleja y completa campaña de ensayos, que ha abarcado rocas de tres canteras de referencia, que se ha extendido en el caso de los ensayos de dureza a otras diez canteras, que ha considerado seis morteros que han sido postulados como material base de balasto artificial o como material de comparación. Esta campaña de ensayos se ha establecido respetando rigurosamente el paralelismo en la evaluación de rocas y morteros, y estableciendo un método “cruzado” de ensayo de



geometrías caóticas y geometrías ordenadas en el caso del ensayo de LA. En el caso de la evaluación de la dureza superficial se ha establecido un nuevo protocolo de ensayo (no existente en normativa) y, para la evaluación de la resistencia a la rotura en contactos entre granos, se ha creado el Ensayo de Rotura de Vértice (ERV).

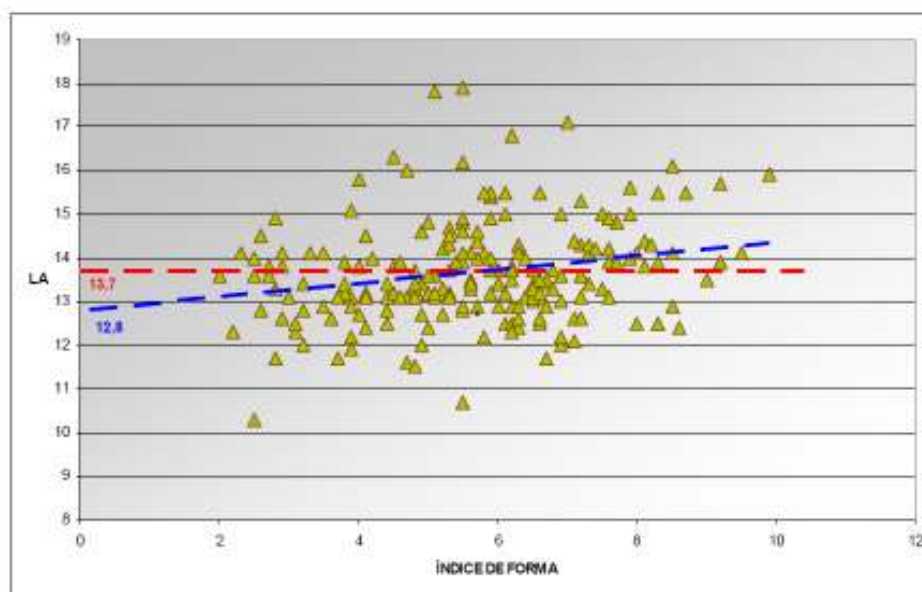


Figura 4.4 Análisis de la relación entre el coeficiente de LA y el Índice de Forma en una de las canteras de referencia estudiadas

Los parámetros mecánicos analizados han pues sido los siguientes:

- Rc: Resistencia a compresión simple
- Rt: Resistencia a tracción y flexotracción
- G: Energía de fractura
- H: Dureza superficial
- LA: Ensayo de LA
- ERV: Ensayo de Rotura de Vértice

Las principales conclusiones finales de esta tarea son:

- Que la resistencia a compresión del material artificial debe establecerse en un mínimo de 120 MPa, se trata de un mínimo normativo pero también es el valor que se obtiene de un ajuste exponencial de los valores de LA en función de la resistencia media de canteras por Franklin para $LA=14$, $R_{c,m}(F) = (69/LA)^3$. Esta resistencia puede traducirse en un $R_{c,k}$ menor del orden de 90 MPa por las razones siguientes:

-Porque se ha comprobado que las resistencias medias obtenidas por Franklin son superiores a las obtenidas por compresión simple (10 a 15%) y que las resistencias características, obtenidas por compresión simple, pueden llegar a ser entre un 20% y un 30% inferiores a las resistencias medias por Franklin

-Porque se ha comprobado que, con una geometría controlada, no existirían elementos aciculares o lajosos ($SI=0$) lo que ya permite prever una mejora del valor de LA del medio granular, que puede estimarse en un 6%.

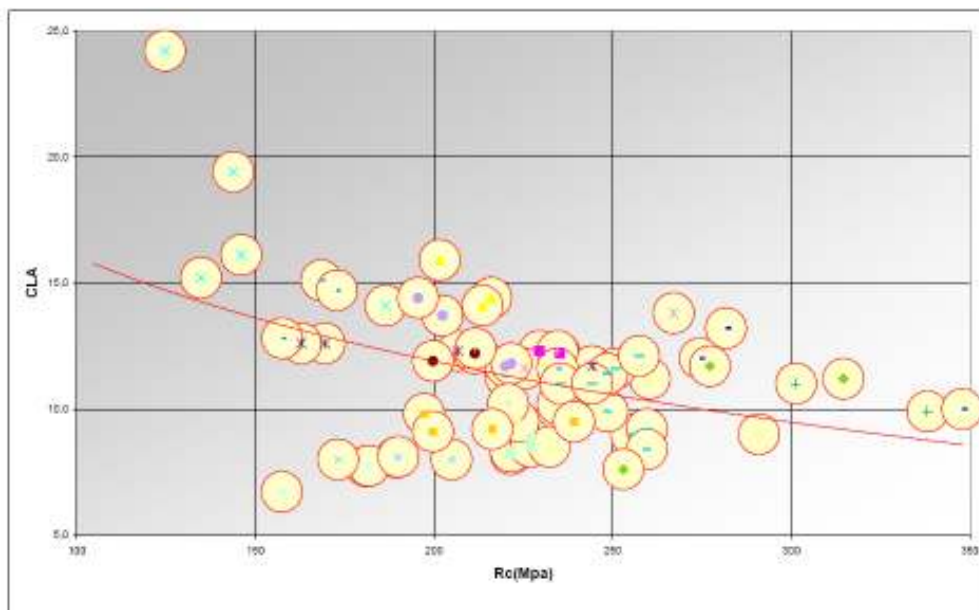


Figura 4.5 Resultados del ensayo de Los Angeles (LA) versus resistencia a compresión (Rc)

- Que las resistencias a tracción obtenidas para rocas son muy altas pero poco representativas por la ejecución de los ensayos sobre probetas de roca completamente sana y con descarte de las fisuradas. Por lo tanto no son comparables con los resultados de morteros, que muestran una resistencia a tracción aceptable y por encima de la prevista en las expresiones de la EHE.
- Que la energía de fractura del morteros es ligeramente inferior a la de las rocas pero que el ratio $G/Rc,k$ es netamente favorable en el caso de los morteros.
- Que la evaluación de la dureza superficial presenta dispersiones importantes y no se ha conseguido correlar ni con la resistencia a compresión ni con el coeficiente de LA. Sin embargo las durezas obtenidas en rocas se ajustan razonablemente a datos bibliográficos mientras que los resultados en los morteros son muy superiores a los esperados al inicio del estudio, alcanzándose valores de 100 kg/mm^2 (del orden del doble de lo previsto por datos bibliográficos para morteros convencionales) y se ha comprobado que la carbonatación aporta un incremento de la dureza H_v del orden del 15% - 20% lo que es interesante y permite alcanzar valores de H_v de 130 kg/mm^2 , que ya son comparables a los valores de H_v más bajos obtenidos para rocas de canteras de balasto
- Que los resultados de los ensayos de LA con geometría ordenada (cubos de 4 cm de arista) han permitido establecer que el valor de LA con geometría caótica es entre un 15% y un 30% superior. Por lo tanto podrían esperarse para el mortero M1c* (mortero con nano sílice "mejorado") un LA equivalente al caótico en rocas del orden 16, es decir, ya en el límite de valores de LA para líneas convencionales españolas.
- Y, finalmente, que el nuevo Ensayo Rotura de Vértice ERV ha dado resultados esperanzadores a pesar de la dispersión constatada en las curvas F-d obtenidas y a pesar de que es necesario muchos más datos de ensayo para confirmar su validez. Sin embargo, la normalización de las curvas del ERV y la integral como indicador de la energía de rotura $G(ERV)$ han permitido obtener valores con una correlación muy razonable entre $G(ERV)$ y el valor de LA lo que podría permitir completar la aproximación necesariamente limitada del ensayo de LA.



Figura 4.6 Probetas de roca en cubos de 4 cm de arista para ensayo de LA con geometría “ordenada”

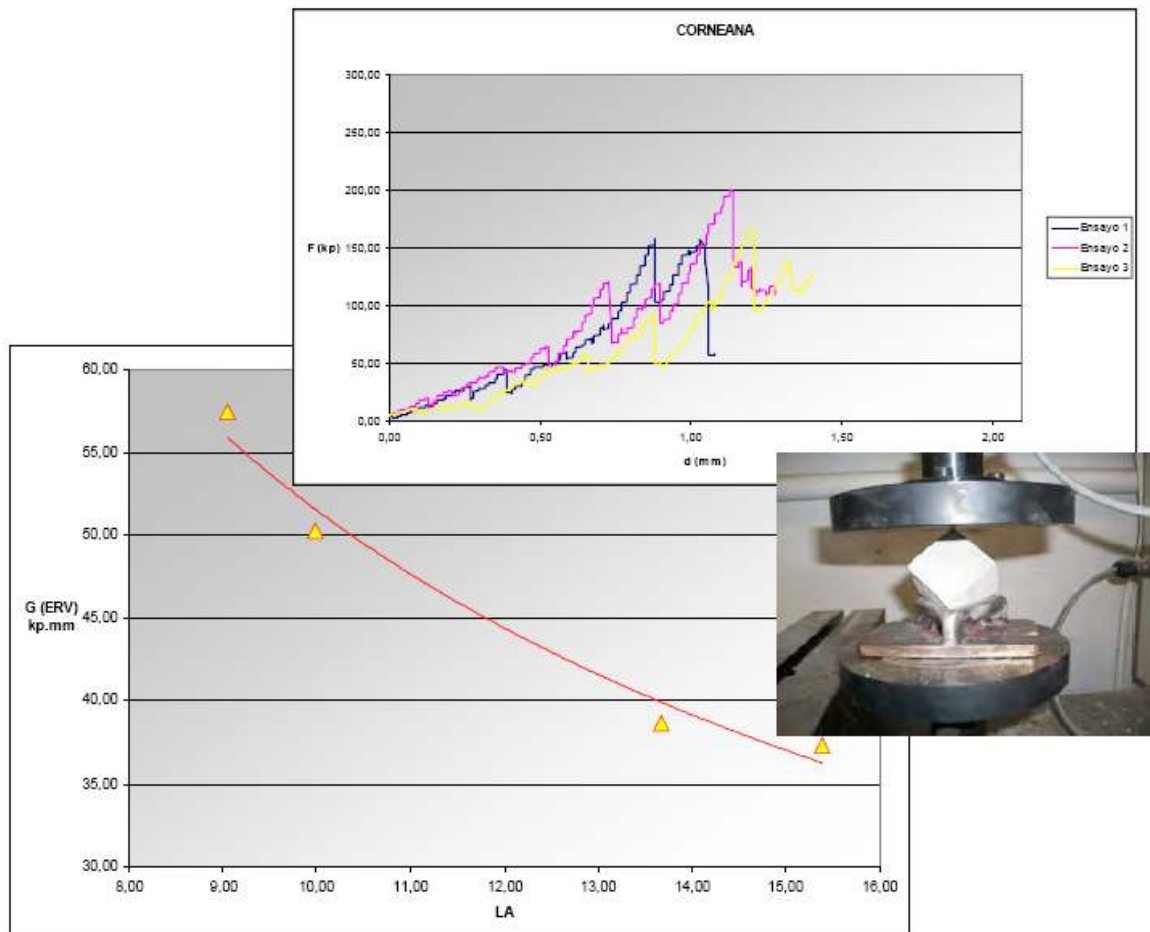


Figura 4.7 Ensayo de Rotura de Vértice. Gráfica F-d y correlación de la energía de rotura con LA



El ensayo de LA es aceptado de forma generalizada como ensayo de evaluación de la idoneidad del balasto natural para soportar las solicitaciones bajo cargas de tráfico y derivadas de operaciones de puesta en obra y de mantenimiento (bateo y estabilización).

El ensayo de LA es un ensayo extendido y de utilidad reconocida e indudable por su robustez y simplicidad de realización. Sin embargo no puede considerarse como una reproducción acelerada del daño que va a sufrir el balasto en servicio y es un ensayo que presenta ciertas limitaciones:

- El ensayo implica una serie de fenómenos complejos de rozamiento e impacto que son muy difícilmente asociables con parámetros mecánicos habituales en ciencia de materiales
- Es un ensayo muy sensible a la geometría y al estado del material (microfisuraciones) pero no es posible cuantificar estos factores dentro del resultado del ensayo
- Puede resultar una hipótesis aventurada.

Parece muy conveniente que se complemente el ensayo con una evaluación de la granulometría después del ensayo, de forma que se pueda evaluar las roturas por fisuras o microfisuras en los granos de balasto.



4.3 INVESTIGACIÓN RELATIVA A MATERIALES APLICABLES EN LA PRODUCCIÓN DE BALASTO ARTIFICIAL

Uno de los objetivos de la investigación es componer un material que, desde el punto de vista de las propiedades físicas y químicas, pueda sustituir al actualmente utilizado como balasto, es decir un “balasto artificial”. El reto es conseguir que un material formado por un agregado de partículas simulara el comportamiento de una piedra natural, que se ha formado a través de muchos años y en condiciones, en algunos casos de presión y temperatura extremadamente singulares.

No solo se trata de obtener el material, sino también que, tanto los materiales como el procedimiento no interfieran la viabilidad del objetivo por razones de coste y/o dificultad técnica.

El primer paso es definir los parámetros técnicos básicos que debe cumplir . El primer requisito que se establece es una resistencia elevada y una adherencia entre las partículas que permita reducir al mínimo la pérdida del material por el bateo al que debe ser sometido en servicio.

La primera propuesta fue la preparación de un hormigón polimérico. Se asegura así tanto la resistencia, como la compacidad y además la dureza superficial.

Otras dos cuestiones básicas para la viabilidad son:

- Para facilitar la fabricación se requiere una reología fluida (similar a la del hormigón autocompactante).
- Un tamaño de árido máximo entre 4 y 8 mm que permita fabricar piezas que puedan cumplir el rango de tamaño del balasto natural y al mismo tiempo el requisito de que una pieza pueda alienar mas al menos tres áridos del tamaño máximo.

A estas dos premisas técnicas se une una consideración de tipo logística y económica: la utilización de autoclave y la necesidad de acopio próximo al emplazamiento de la obra encarecían y dificultaban en exceso el empleo del nuevo material.

A partir de todos los requisitos anteriores, empieza la fase experimental del proyecto. En ella hay dos objetivos a conseguir, elevadas resistencias con pequeños tamaños de áridos y mejorar la interfase entre los agregados y la matriz conglomerante.

Teniendo en cuenta las limitaciones en el caso de impuestas en el tamaño máximo de árido se procede a comparar como primer punto el comportamiento mecánico entre morteros y microhormigones.

Se prepara una amplia batería de morteros y hormigones con diferentes tipo y diferentes proporciones de adiciones. Se prepararan microhormigones a partir de un tamizado del árido hasta un tamaño máximo de 8 mm. Y se estudian hormigones autocompactantes con diferentes adiciones.

Todas las muestras se someten tanto a ensayos mecánicos, como a ensayos microestructurales. Necesitamos conocer la influencia por una parte del tamaño del áridos en las propiedades mecánicas, por otra la influencia de la adición tanto en la interfase como en las características del gel formado. Se lleva a cabo un modelo de hidratación que permita escalar el material de la escala micro, a la macro, pudiendo tener una herramienta para diseñar el material.



Comparados los comportamientos mecánicos de los morteros y hormigones preparados con limitaciones, se plantea la posibilidad de llegar a unos valores adecuados de prestaciones, respecto a la prestación solicitada partiendo solamente de morteros. Si se consiguen los resultados previstos, estaremos quedándonos del lado de la seguridad, pues el aumento del tamaño de árido reduce la interfase y aumenta la resistencia superficial.

No puede tratarse de un mortero convencional, puesto que las prestaciones tanto mecánicas, como de desgaste que se le solicitan son elevadas. Los resultados muestran que, si bien conseguir hormigones de elevadas resistencias es actualmente algo que consiguen si dificultad los laboratorios especializados, obtener resultados similares en morteros implica el uso de adiciones activas mucho más específicas, por lo que se inicia la preparación y análisis de diferentes dosificaciones de morteros preparados con nano adiciones.

Campaña experimental

Materiales

Aridos: Arena y Grava tamizada

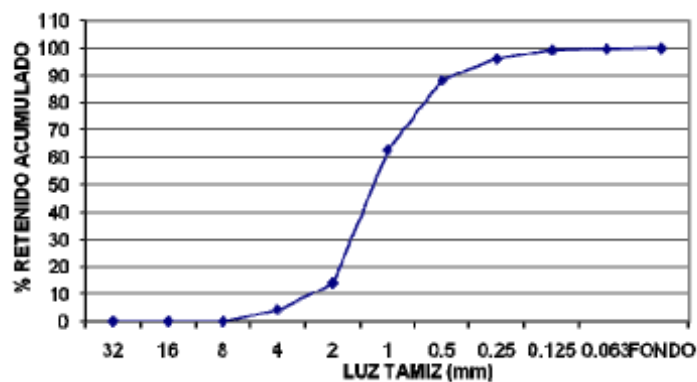


Figura 4.8 Curva granulométrica de la arena

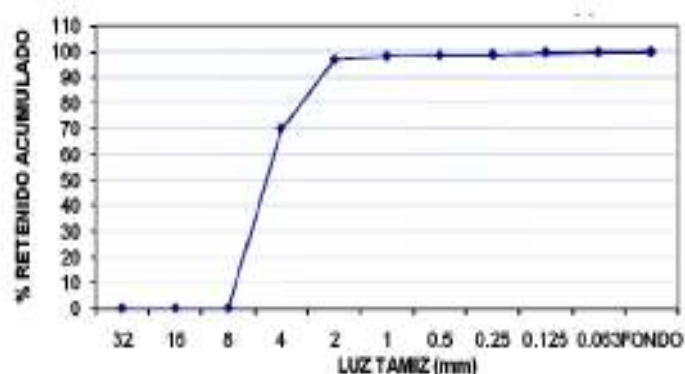


Figura 4.9 Curva granulométrica de la grava



Cemento: CEM I 52.5 r/sr

Las normas correspondientes a los ensayos aplicados al cemento son:

- Resistencia a compresión: UNE-EN 196-1
- Principio y fin de fraguado: UNE-EN 196-3
- Análisis químico: UNE-EN 196-2
- Finura: UNE 80122:1991 (EN-196-6)

Adiciones:



Figura 4.10 Escorias



Figura 4.11 Cenizas volantes



Figura 4.12 Humo de sílice español



Figura 4.13 Humo de sílice noruego

Rocas naturales:

Parte de la caracterización del material a desarrollar pasa por la comparación de las propiedades obtenidas con las rocas naturales que hay en la naturaleza, puesto que se trataba de buscar un material artificial que simule el comportamiento de una roca natural como es el Balasto. En ese sentido, se seleccionan canteras distribuidas por la geografía española.

Se seleccionan tres tipos de roca para la campaña experimental. Las rocas seleccionadas son un granito de la cantera La Curva que se denominó de cantera de comparación. Una roca de naturaleza corneana de calidad alta (Cantera de Aldeavieja). Y una roca ofítica de calidad muy alta correspondiente a la cantera de San felices.

Dosificaciones:

Agua	Cemento	Cv	Grava	Arena	Sp2	Mv
11.4	22	3.4	39	39	0.5	0.05

Tabla 4.1 Dosificación en kg de HAC2 con un 15% de contenido en peso de cemento de cenizas volantes



Morteros:

Nº		Nombre	a/c (%)	Agua (g)	Cemento (g)	Arena (g)	Adición (g)
M1 M10	MB	SIN ADICION	0.5	225	450	1350	0
M2	M3	20% Escorias de alto horno	0.5	225	360	1350	90
M12	M2	5% Micro silice	0.5	225	450	1327.5	22.5
M13	M1c	5% Nano silice	0.5	225	450	1327.5	22.5
M20	M1C*	5% Nano silice	0.38	161	450	1350	22.5

Tabla 4.2 Dosificación morteros diseñados para ensayos

Los resultados mecánicos obtenidos para las muestras con adiciones, muestran que si bien se mejora y se obtienen buenos morteros, los resultados están muy lejos de obtener el objetivo propuesto. Los valores más altos se obtienen reduciendo la relación agua/material cementante.

La resistencia a compresión se determina según la Norma UNE-EN 12390-3.

La resistencia a flexotracción se determina según la Norma UNE-EN 12390-5.

La Tabla 4.3 muestra los valores obtenidos para la resistencia a compresión y tracción de los morteros ensayados, en MPa, a edades características.



	Probeta	Rc (MPa)
Rocas Naturales	R1c	197
	R1c	201
	R2	213
	R3	225
Probetas Artificiales 7 días	M 1 c	94
	M 1 c	92
	M 1 c	94
	M 1 c	91
	M 2	52
	M 2	51
	M 3	47
	M 3	47
	M 4	44
	M 4	44
	M B	50
	M B	48
	M 1 c*	83
	M 1 c*	95
Probetas Artificiales 28 días	M 1 c	105
	M 1 c	104
	M 1 c	102
	M 1 c	104
	M 2	75
	M 2	75
	M 3	71
	M 3	70
	M 4	71
	M 4	71
	M B	58
	M B	57
	M 1 c*	98
	M 1 c*	104
Probetas Artificiales 90 días	M 1 c	112
	M 1 c	110
	M 1 c	109
	M 1 c	108
	M 2	78
	M 2	78
	M 3	72
	M 3	71
	M 4	76
	M 4	75
	M B	62
	M B	61
	M 1 c*	108
	M 1 c*	104

Tabla 4.3 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión



Una vez ensayada la proporción que mejores resultados aporta se pasa a ensayar dosificaciones que mejoren las prestaciones mecánicas por reducción del contenido de agua y se estudia el efecto que la temperatura y las condiciones de curado originan en la muestra.

Los resultados obtenidos en el comportamiento resistente para el mortero M20 a los siete días se muestran en la Tabla 4.4. En la tabla, H corresponde a curado en horno, C a curado en cámara y B curado en baño de disolución saturada de Ca(OH)₂.

T (°C)	t (Días)	Carga rotura flexión (kN)	R flexión (MPa)	Carga rotura comp. (tn)	R. compresión (MPa)	R Media comp. (Mpa)	R. Media flexión (MPa)	R. media comp. (MPa)
H 118°C	7	5,50	12,88	13,50	14,20	84,38	88,75	86,56
H 118°C	7	6,05	14,18	13,00	15,10	81,25	94,38	87,81
C 22°C	7	3,98	9,34	15,70	14,00	98,13	87,50	92,81
C 22°C	7	3,75	8,80	15,00	14,90	93,75	93,13	93,44
B	7	3,57	8,37	15,00	15,10	93,75	94,38	94,06
B	7	4,00	9,38	15,00	15,30	93,75	95,63	94,69
B	7	3,79	8,88	16,05	14,08	100,31	88,00	94,16

Tabla 4.4 Resistencias mecánicas en MPa a los siete días del mortero M20

El estudio mecánico no se limita a compresión y tracción. Se realizan también ensayos de energía de fractura y se diseña un ensayo “ensayo de vértice” para tratar de evaluar la resistencia de carga de la punta de los cubos preparados.



Figura 4.14 Esquema de los ensayos realizados para rotura de vértice

Hay sin embargo dos aspectos más en lo relativo al comportamiento del balasto que es necesario destacar.

Uno de los más característicos es el comportamiento frente al ensayo de Los Ángeles. La necesidad de bateo del material implica que en servicio va a sufrir un gran desgaste por el



choque entre las distintas partículas del material, por eso consideramos de vital importancia mejorar la adherencia entre los distintos constituyentes del mismo.

El ensayo se ha llevado a cabo siguiendo la normativa correspondiente en cuanto al peso y número de vueltas, pero utilizando los mismos cubos obtenidos de las probetas de los morteros preparados. De la misma forma se ha realizado el ensayo de comparación para probetas de distintas rocas naturales. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5.

Material	CLA (%)
M1	15,37
M17	15,2
M20	12,5
Corneana	8,1
Granito	10,3
Ofita	7

Tabla 4.5 Resultados del ensayo de los Ángeles Norma UNE-EN 1097-2.

Como puede observarse, los valores obtenidos para M20 ya se acercan al valor de la roca con peros coeficiente de LA (granito).

Con respecto a las características durables del material, uno de los parámetros que mas influencia tiene es porosidad. Pero no solo la porosidad total, la distribución de tamaño de poro puede explicar en mayor medida el comportamiento durable del material. En este sentido, el material propuesto reduce sensiblemente, tanto la porosidad como la distribución de tamaño de poros accesibles.

La figura muestra la variación de la distribución porosa de morteros al adicionar nano sílice.

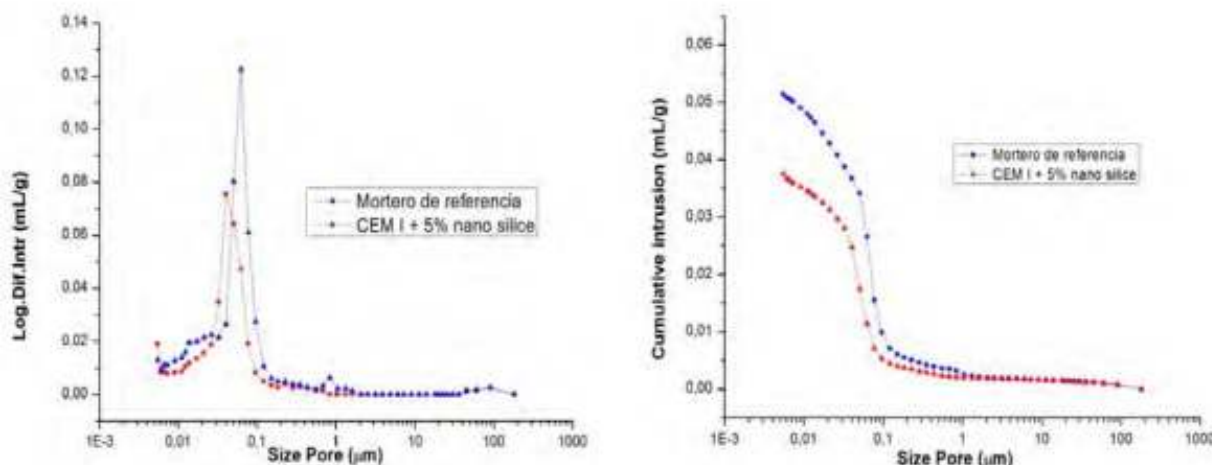


Figura 4.15 Distribución porosa y volumen de mercurio total intruído acumulado (proporcional a la porosidad total de la muestra)

Esta distribución porosa claramente debe mejorar los resultados durables y así lo muestran los resultados obtenidos. La mejora en este comportamiento es evidente en algunos de los ensayos mas característicos de durabilidad: penetración de cloruros y comportamiento frente hielo/deshielo.

Uno de los iones agresivos que con mayor facilidad, debido a su tamaño y movilidad, penetra en los materiales cementicios es el cloruro. Básicamente la resistencia del material



a la penetración de iones agresivos se mide midiendo el coeficiente de difusión o/y la resistividad.

Se midieron también la resistividad de las probetas estudiadas. Encontrándose, como cabía esperar, un aumento muy significativo de la misma cuando se adicionan nano partículas.

En la tabla siguiente se recogen como referencia la variación de los valores de resistividad entre la muestra de referencia y el mortero propuesto.

Mortero	Resistividad Eléctrica (Ω m)	Resistividad Eléctrica (kΩ cm)	Penetrabilidad de cloruros (ASTM C1202)
CEM I	184,03	18,40	Baja
CEM I + 5% de nano sílice	426,12	42,61	Muy Baja
CEM I + 5% de nano sílice	426,12	42,61	Muy Baja

Tabla 4.6 Valores de resistividad de la dosificación propuesta y el mortero de referencia.

El comportamiento frente hielo deshielo, puede constituir en un material que deba someterse a cambios bruscos de temperatura un límite en su aplicación. El ensayo se realiza siguiendo la norma UNE-EN 12390-1:2009. Como puede observarse los resultados han sido significativamente mejorados en el mortero propuesto, tal como cabía esperar habida cuenta de las características microestructurales del material.

En la Figura 4.16 se muestran la variación de los resultados de pérdida de masa para los distintos materiales en los diferentes ciclos y el esquema del ensayo realizado.

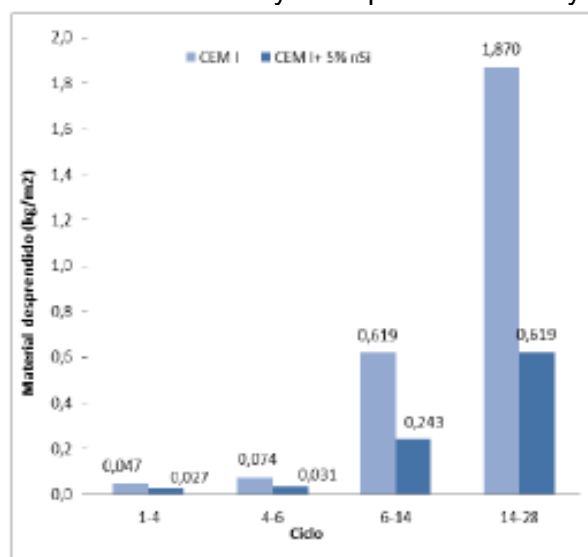


Figura 4.16 Resultados de pérdida de peso en los distintos ciclos y esquema del ensayo

Otro de los aspectos que caracteriza al Balasto como material es la dureza superficial. Es en este aspecto donde se considera que los valores obtenidos son más limitados. Se realizan ensayos de dureza superficial de las distintas muestras de rocas naturales y de los



morteros propuestos. En ningún caso el material artificial alcanza los valores de referencia de las rocas. Los valores obtenidos son aproximadamente un 30% inferiores a los de las rocas naturales más blandas, basalto y serpentina. Los morteros seleccionados se someten a un proceso de carbonatación acelerada en cámara con humedad controlada del 65%. Consiguiendo con ello un aumento de la dureza de aproximadamente el 20% respecto al mortero no carbonatado.

En la Tabla 4.7 se muestra un esquema comparativo de los valores de dureza encontrados.

Material	Descripción	Dureza Vickers (kg/mm ²)
Roca	Granito	383
	Cuarcita	215
	Basalto	133
Mortero	Referencia	82
	CEM I + 5% nano sílice	107
	CEM I + 5% nano sílice carbonatado	122

Tabla 4.7 Resultados de dureza



4.4 INVESTIGACIÓN SOBRE TÉCNICAS DE PREFABRICACIÓN APLICABLES

La necesidad de buscar nuevas soluciones sostenibles para las plataformas ferroviarias, ha impulsado la presente investigación con el propósito de prefabricar balasto artificial con morteros o microhormigones en base a cemento a través de un sistema de prefabricación.

Hasta la fecha no se tiene constancia de ningún estudio realizado con el fin de sustituir balasto natural por una piedra artificial, por lo que la investigación debe empezar prácticamente de cero y debe comenzar por definir qué propiedades se le debe exigir al material que sirva de sustituto al balasto natural, tanto a nivel mecánico como geométrico. Para definir estas características no sólo se deben tener en cuenta las exigencias técnicas del material, sino también las posibilidades tecnológicas de fabricación del balasto artificial, siendo probablemente más condicionante la capacidad de fabricación a un precio competitivo que las propiedades del material.

Ante esta falta de experiencias previas y tras las investigaciones previamente realizadas, se ha considerado que podrían aplicarse dos técnicas para la prefabricación de balasto en base cemento: la prefabricación a partir de moldes y la prefabricación como trituración de un bloque de hormigón.

Una vez analizadas técnicamente ambas propuestas, se ha realizado una valoración económica, para así conocer la viabilidad de la implantación.

4.4.1 Producción de balasto artificial mediante moldes

Esta línea de investigación lo que busca es generar balasto partiendo del principio de que el hormigón es una roca artificial que puede ser moldeada en función de las necesidades estructurales y funcionales. Un claro ejemplo de esto es la gran variedad de elementos prefabricados que tienen infinidad de formas y tamaños, así tenemos desde adoquines hasta placas alveolares.

Armonizándose una serie muy elevada de sistemas de prefabricación, tanto en procesos como en lo relacionado a la tecnología existente, esta investigación busca la obtención de balastos poco homogéneos en cuanto a la forma, pero que cumplan con las características de resistencia y durabilidad exigidas a los balastos naturales.

El sistema que se plantea emplear es el de prefabricación con moldes abiertos que consiste en verter el hormigón fresco dentro de cada uno de los moldes por su cara superior la cual carece de tapa o cierre. Una vez se ha vertido el hormigón se procede a su compactación, bien mediante el vibrado del molde bien mediante un sistema de compresión del hormigón. En el caso de que se utilice un hormigón autocompactante, esta etapa es prescindible.

Como el tamaño de la pieza prefabricada es reducido, es más rentable desplazar los moldes y mantener fija la manguera de vertido. De esta manera se consigue una fabricación en serie de elementos de hormigón ejecutados con mayor celeridad, redundando por lo tanto en un menor coste. Un esquema tipo de este sistema de prefabricación es el siguiente:

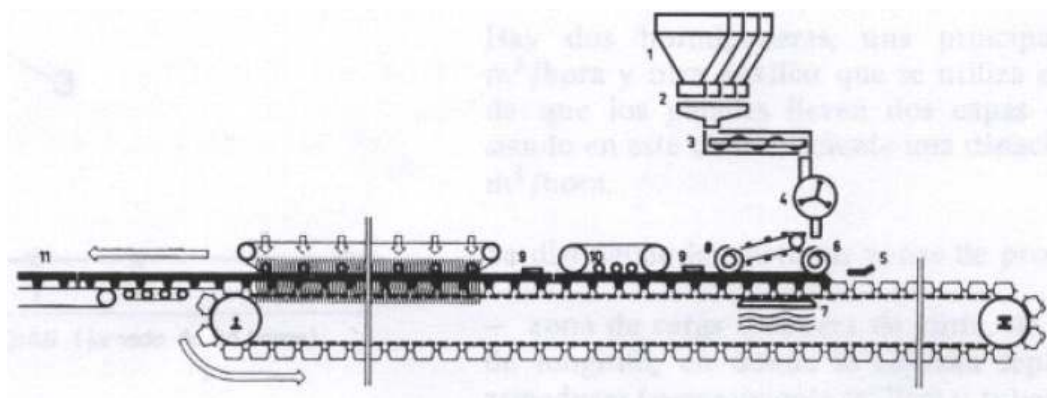


Figura 4.17 Esquema de prefabricación con moldes abiertos y móviles

El proceso de curado del hormigón puede realizarse dentro del molde o cuando este se haya vaciado. En ambos casos, el curado del hormigón depende del tipo de material que se haya utilizado en el molde y de los requisitos finales exigidos a la pieza prefabricada. Es aquí donde la investigación se abre hacia dos subgrupos: curado rápido y curado lento, en donde la elección de uno u otro dependerá del tamaño de la serie que se desea producir, y de los costes marginales que representan.

Si se utilizan procesos acelerados tales como el curado en túnel de vapor, mantas eléctricas, soleras térmicas, etc., el ciclo de curado se estudiará en función del tipo de elemento (dimensiones de la sección transversal) y del tipo de cemento. En cualquier caso, la temperatura en el hormigón no superará los 70°C, la fase de enfriamiento no debe ser brusca para evitar la aparición de microfisuras superficiales, y debe existir siempre una fase de reposo previa a la de calentamiento. En los procesos de curado en los que se alcanzan temperaturas entorno a los 70 – 72 ° C no existe ningún inconveniente el empleo de los siguientes materiales: acero, plástico o madera, y en el caso que se realice un curado a vapor el material más recomendado es el acero.

Se describe a continuación el esquema de una planta de balasto artificial

En el diseño de una planta de prefabricación de balasto artificial mediante moldes se ha partido de una planta de prefabricación de adoquines y baldosas. Ahora bien, existen dos diferencias significativas que hay que adaptar para poder prefabricar balasto para ferrocarril:

- En la fabricación de balasto no hay entre capas debido a la aleatoriedad de la caída de las piedras durante la formación de la banqueta o reemplazo del balasto.
- El acabado de los adoquines o baldosas es completamente diferente al del árido de balasto. Las piedras de balasto, a priori, no necesitan tratamiento superficial. Únicamente se precisa que todas estén libres de partículas finas, por lo que el único tratamiento que hay que realizar es el lavado.

Establecidas esas diferencias, una propuesta de esquema de fabricación de balasto artificial en base cemento a partir de moldes es el siguiente:

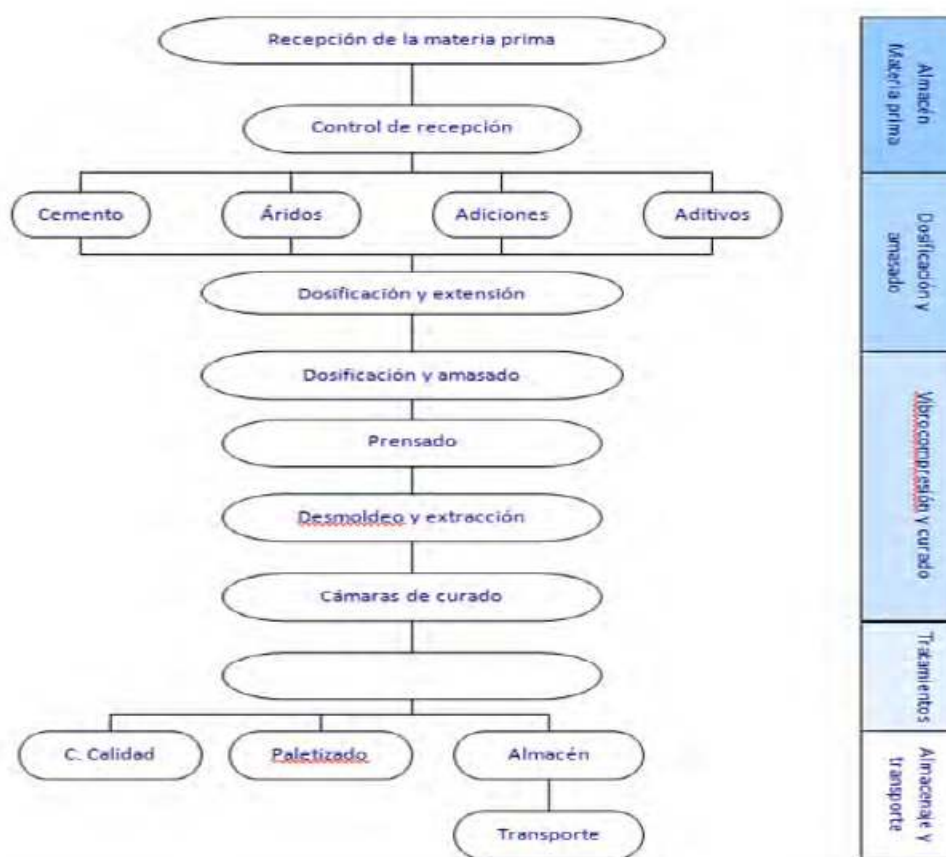


Figura 4.18 Esquema del proceso de fabricación de balasto artificial

4.4.2 Producción de balasto mediante el machaqueo de bloques

Para esta solución hay que fabricar previamente bloques de hormigón, semejantes a los que se fabrican para las escolleras de los puertos, sin embargo, las características mecánicas requeridas serán distintas ya que en el caso de las escolleras el factor más relevante es el peso específico del hormigón, mientras que en el balasto artificial debe cumplir una serie de prescripciones geométricas y geotécnicas más exigentes durante el servicio y por tanto debe alcanzar unos valores elevados de resistencia para que el proceso de trituración no mengüe demasiado las características mecánicas del hormigón. Las investigaciones permitirán determinar si el hormigón a fabricar debe ser exclusivamente hormigón en masa o si es necesario incluir refuerzos de fibras ya sea de acero, vidrio, carbón, nylon, etc, ya que permiten obtener un material más homogéneo, con una resistencia a tracción más elevada, retracción más controlada, rotura más tenaz, y además mayor resistencia a la fatiga e impacto, dos fenómenos a los que el balasto está sometido continuamente.

El cemento y/o adiciones que se tengan que usar estarán condicionadas por el tipo de ambiente al que se va a estar sometido el balasto, sin embargo, a priori, este no es un factor que condicione la fabricación de los bloques, aunque si que puede tener una implicación en cuanto a los sistemas de curado empleados.



Los bloques de hormigón para balasto deben seguir el proceso que tradicionalmente hacen las rocas empleadas en la obtención del balasto. El proceso es el siguiente: los bloques son introducidos en las machacadoras de mandíbulas de apertura fija, luego pasan a los molinos de impactos o de conos, luego siguen la selección ajustada a los rangos de husos establecidos en las prescripciones técnicas para el suministro y utilización de balasto. Luego se procede al acopio del material para transportarlo a destino.

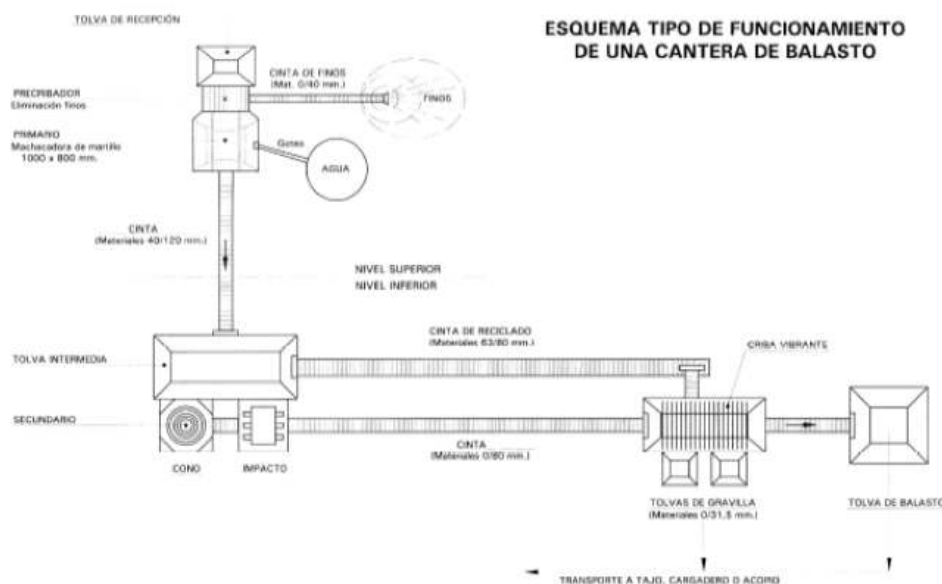


Figura 4.19 Esquema del funcionamiento de una cantera de balasto. Fuente: Pliego de prescripciones técnicas para el suministro y utilización de balasto

En el proceso de fabricación de balasto a partir de bloques de hormigón hay dos partes claramente diferenciadas, por un lado está la planta encargada de la prefabricación de los bloques de hormigón y, por otro, la planta de balasto. Estas deben estar localizadas próximas entre sí y con vías para la circulación de dumpers que permitan el transporte de manera eficiente.

Este documento se centra en la planta de balasto, es decir, definir su disposición en planta y la maquinaria que se debe emplear.

Para determinar la capacidad de producción de la planta de bloques de hormigón se han establecido dos hipótesis de diseño, por una parte se ha tomado como punto de partida la capacidad de producción mensual de las plantas de balasto y por otra se ha partido de la capacidad de producción de bloques de hormigón.

Finalmente, se analizará el consumo anual de balasto por parte de ADIF, para así determinar de cuál es la producción media necesaria para cubrir esa demanda.

Se describe a continuación el proceso de trituración

Al igual que en una planta de machaqueo de áridos naturales, en una planta de fabricación de balasto artificial deberían existir tres etapas diferenciadas en función del tamaño del material que ingresa en la trituradora y el que sale de la misma.



En la trituradora primaria el tamaño máximo de la roca es de 1500 mm aunque el óptimo está entorno a los 900 mm, que es el tamaño óptimo para el bloque de hormigón que debemos machacar.

Habitualmente la relación de reducción es 6, por tanto, a la salida de la trituradora el tamaño de las rocas estará en torno a 150 mm. Si el tamaño fuera mayor, se recircularían las rocas para ser reducidas al tamaño deseado a través de un circuito cerrado, mientras que las de menor tamaño y que estuvieran entre 40 y 125 mm serían transportadas y almacenadas en el stock de regulación.

Por otro lado, las rocas de tamaño entre 0 – 40 mm se acopiarían para utilizarlas como árido reciclado.

Del stock de regulación se llevaría el material a la trituradora secundaria. En esta fase la relación de reducción no debe ser mayor a 5. Finalmente, el material 0-100 mm procedente de la trituración secundaria llegaría al puesto de criba, en la que hay unas bandejas para las siguientes granulometrías:

- 60 – 100 mm, que mediante una cinta transportadora regresaría a la tolva de alimentación del puesto de cribado.
- 30 – 60 mm: este rango de husos es el que está establecido en las prescripciones técnicas del balasto. En plantas de balasto cuya producción mensual es de 30.000 m³, la producción es de 250 t/h.
- 0 – 30 mm, tamaño que corresponde a las zahorras o áridos que posteriormente se emplearán en otros usos de la construcción, como por ejemplo para la fabricación de hormigones con árido reciclado.

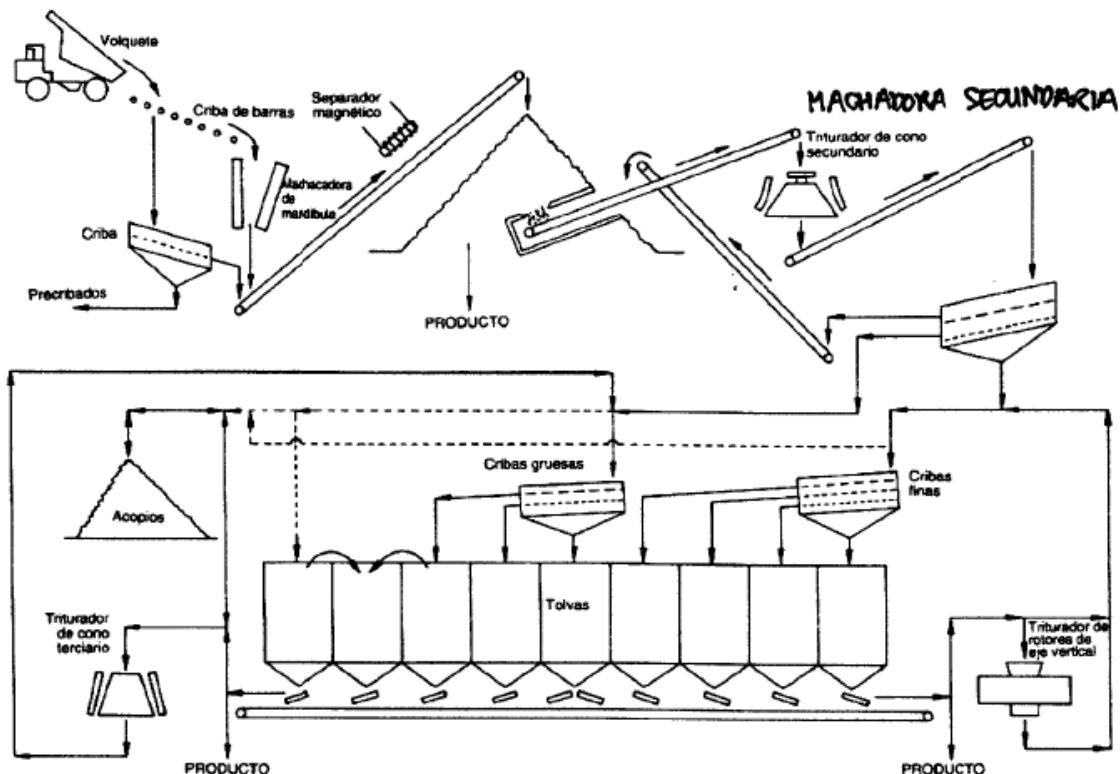


Figura 4.20 Esquema de la planta de balasto artificial a partir de bloques de hormigón



Figura 4.21 Elementos de una planta de trituración de árido

4.4.3 Elección del método productivo óptimo.

El sector de los prefabricados de hormigón se ha caracterizado tradicionalmente por dar una respuesta rápida y económica a los problemas que han surgido en el sector de la construcción, siempre y cuando haya existido un mercado amplio que permitiera una amplia repetitividad y, en consecuencia, un descenso de los costes de construcción. En este sentido, los productos prefabricados de hormigón cubren una amplia gama de necesidades tanto estructurales como funcionales y estéticas.

Desde un punto de vista estrictamente técnico, el balasto artificial debe cumplir con las condiciones establecidas en las prescripciones técnicas en lo referente a resistencia a compresión, resistencia a la abrasión, resistencia al impacto (fractura), granulometría, geometría y muy especialmente durabilidad.

La producción de un balasto artificial abre un abanico de posibilidades geométricas extremadamente amplio: distribución estadística de tamaños primaria asimilable, con matices, a un huso granulométrico, mezclas de geometrías de granos, geometría de un grano descompuesta en tres niveles de forma (o geometría base), indentaciones (o anfractuosidad) y rugosidad (o textura). Incluso dentro de las limitaciones de una producción industrial, el problema de la optimización de la geometría del medio granular es extremadamente complejo y en este caso se tiene que limitar a la definición de geometrías sencillas necesarias para el desarrollo del programa experimental y de simulaciones informáticas.

Existen dos técnicas o alternativas de producción a gran escala de granos de balasto artificial:

- Moldeo de las partículas, con geometrías genéricas que permitan un fácil “desenclavado”

Los puntos fuertes de este proceso de producción son:

- Es una fabricación completamente limpia, lo que podría reducir considerablemente la presencia de finos.
- Inalteración de las prestaciones mecánicas del hormigón como consecuencia del proceso de fabricación.



- Control continuo de las características de los materiales y rápida detección de algún fallo.
- Considerable disminución del consumo energético durante el proceso de fabricación, haciendo más sostenible la obtención de balasto.
- En caso usar la solución de molde perdido, se puede disminuir el consumo de agua ya que esta podrá ser reciclada para volverla a emplear en diversas ocasiones en el curado del hormigón.

Por otro lado, las incertidumbres son:

- Dificultad en la fabricación de moldes de dichas dimensiones.
- Inversión inicial elevada, especialmente en el caso de los moldes de acero.
- Susceptibilidad de las formas, cualquier deformación que se produzca en el molde, ya sea como consecuencia de algún golpe o por fenómenos térmicos, afectará el cumplimiento de las normas, y además dificultará el proceso de desmoldeo.

-Fabricación de balasto a partir del machaqueo de bloques prefabricados de hormigón de grandes dimensiones.

Los puntos a favor de esta solución son:

- La fabricación de los bloques de hormigón de grandes dimensiones es una técnica que se emplea en otros campos de la ingeniería civil, por ejemplo en las escolleras de los diques o contradiques de los puertos, para colocarlas en el manto, por lo que es una técnica madura, se dispone de maquinaria adecuada y se conocen requisitos técnicos y costes.
- La maquinaria de la planta de trituración no deben ser “reinventadas” pues sencillamente habrá que realizar los ajustes pertinentes de acuerdo a la dureza y resistencia que tenga el hormigón. Lo que si será necesario realizar es la búsqueda de disminución de material de rechazo, ya que las limitaciones de finos serán más restrictivas.
- Existiría la posibilidad de fabricar balasto in situ mediante el uso de trituradoras móviles, lo que se traduciría en una mejora considerable de la productividad.

Las principales incertidumbres que surgen en la aplicación de este proceso de fabricación son:

- El uso energético que tiene la fabricación del bloque de hormigón así como la trituración del mismo, puede no estar en la línea de la eficiencia energética deseada.
- El proceso de la trituración, generará irremediablemente una cantidad de material de desecho, además el coste unitario del material es muy elevado respecto de las rocas empleadas para balasto. Esto repercute negativamente en la eficiencia económica del proceso. No obstante, para que el proceso sea sostenible, todo el material que haya sido rechazado podrá ser reutilizado posteriormente.
- Creación de microfisuras en el hormigón como consecuencia de los esfuerzos a los que se somete al hormigón durante la trituración de los bloques.

Es posible extender estos estudios al machaqueo de bloques de material con planos de fractura preferentes, a técnicas de estallado controlado de bloques de material o a técnicas especiales de extrusión.

Por otro lado se debe analizar técnicas de curado de las partículas, particularmente orientadas al incremento de la dureza superficial.

Las incertidumbres del proceso no se podrán superar a menos que se ejecute un proyecto piloto que permita la fabricación de balasto artificial mediante ambos procedimientos y permita analizar las características del producto final, comparándolas con las prescripciones técnicas de ADIF. Este proyecto piloto permitiría determinar qué línea de investigación cuenta con más probabilidades de tener éxito desde un punto estrictamente técnico.



4.4.4 Análisis de viabilidad económica.

Metodología

Para obtener las principales variables a tener en cuenta en la construcción y operación de las plantas de prefabricados y balasto, se han realizado encuestas a las plantas de producción de balasto y adoquines así como encuestas a empresas encargadas de diseñar y construir instalaciones de balasto natural.

La información obtenida ha sido complementada con el análisis de los precios del suelo siendo necesario visitar diversas páginas de Internet especializadas en la venta de suelos de uso industrial y consultar la información disponible en el portal de la Dirección General del Catastro.

Resultados del proceso de producción basado en machaqueo de bloques de hormigón

Instalaciones

En este punto están incluidos los costes de la instalación completa de las maquinas necesarias para obtener balasto (trituradoras, cribadores y cintas transportadoras) así como sus correspondientes estructuras. Además, incluye el coste de la nave industrial y maquinaria que se precisa para la prefabricación de bloques de hormigón.

Las fábricas de balasto están compuestas por maquinaria en el primario, secundario y terciario, por tanto, ascendiendo la inversión en estas instalaciones a 5 millones de euros, valor obtenido a partir de las encuestas realizadas a empresas encargadas del diseño y construcción de plantas de balasto. Por su parte la planta de bloques de hormigón precisa de una inversión de 1 millón de euros, valor estimado a partir de las publicaciones de la Revista Cemento–Hormigón sobre renovación y construcción de plantas de prefabricación.

Transporte

Los camiones adecuados para transportar los bloques son los Dumpers Extraviales de 65t, además para colocar los bloques en los camiones se precisa de una pala cargadora, la cual debe ser manipulada a través de un maquinista.

Para esta propuesta se ha determinado el uso de dos camiones y una pala cargadora. En consecuencia, el número total de operarios debe ser de 3. El precio de dos camiones y una pala cargadora ha sido facilitado por las empresas de venta de maquinaria pesada para la minería y de diversos portales de venta de camiones de estas características. Consecuentemente, para este punto se ha tomado un valor de 1.304.000 euros.

Terreno

La localización de estas plantas debe ser sobre suelo que esté calificado para actividades industriales. Por tanto, según la actual Ley de suelo se enmarca dentro del suelo urbano de uso industrial.

El precio del metro cuadrado de suelo depende de múltiples variables, siendo las principales la relacionada con la Comunidad Autónoma a la que pertenece y la proximidad al núcleo urbano. Consecuentemente se han establecido para esta propuesta los precios correspondientes a zona urbana de uso industrial alejada del núcleo urbano.

La superficie de terreno necesaria es de 2 hectáreas (20.000 m²) para la parte correspondiente a la trituración de los bloques. A esta superficie hay que añadirle 0,2 hectáreas para la planta de prefabricación de los bloques. Por tanto, en total se necesitan 2,2 hectáreas. En el terreno debe haber zonas dispuestas para el acopio de la materia prima necesaria para la fabricación del hormigón, así como para los productos finales, es decir el balasto artificial y aquellos materiales de tamaño inferior a 31,5 mm.



Para determinar la horquilla de precios se ha tomado como referencia la Comunidad de Madrid, consecuentemente para los cálculos se han fijado los siguientes valores 100€, 150€ y 200 €.

Obra civil

En este apartado se incluyen las obras de cimentación de la planta de prefabricación y de las estructuras metálicas que soportan cada una de las máquinas (tritadoras, cribadores, cintas transportadoras). Por otra parte también están incluidas las obras necesarias para la explanación de los caminos internos, dichas vías no requieren superficies pavimentadas, sino que únicamente se debe realizar un proceso de compactación sobre suelo estabilizado con cemento.

El precio de las obras civiles se ha obtenido a raíz de la información suministrada por las empresas encargadas de proyectar instalaciones de balasto. El precio sugerido ha sido de 1,5 millones de euros.

Talleres

Estos costes están vinculados con la necesidad de disponer unas instalaciones menores para las labores de mantenimiento y reparación de la maquinaria, así como puestos de primeros auxilios para los posibles accidentes laborales que se puedan presentar.

Se ha establecido que la inversión para talleres es un 10% de los capítulos de instalaciones y transporte.

El número de operarios necesarios para los talleres es tres.

Costes de operación

Durante la operación de la planta se van a producir una serie de costes fijos y variables, así como directos e indirectos.

Costes directos:

Para los costes directos se ha incluido:

- Amortización;
- Personal de la planta;
- Consumo eléctrico;
- Hormigón;

-Amortización

Según la tabla de coeficientes de amortización, el período que se debe fijar para este tipo de instalaciones es de 20 años. Por simplicidad de cálculos se ha escogido un sistema lineal de amortización.

-Personal

Como se ha indicado anteriormente, para cada una de las partes del proceso productivo se requiere una serie de operarios encargados del buen funcionamiento de la planta. Para esta propuesta se ha establecido la necesidad de 14 trabajadores.

Los salarios base de los trabajadores varían en función de la Comunidad Autónoma, sin embargo, para este estudio se han tomado como referencia los salarios fijados por el convenio colectivo para el sector de la construcción de la Comunidad de Madrid.

-Electricidad

Durante la explotación de la planta de balasto artificial el consumo energético tiene una importancia significativa por los costes que representan, por ello se ha realizado un análisis del consumo de dos plantas de producción de balasto. La primera consiste en una instalación de 600 kw de potencia con una producción total de 350 t/h (balasto + zahorras



+ material granular fino). La segunda planta tiene una instalación de 1300 kW de potencia con una producción de 800 t/h (balasto + resto).

Para el cálculo se ha supuesto que las máquinas trabajan 2.000 horas al año.

El precio de la electricidad fijado para estas instalaciones ha sido de 9 céntimos por kilovatio hora. Por lo tanto el gasto anual de electricidad es de 135.000 € para el primer año de operación.

-Hormigón

El precio del hormigón fijado para los cálculos es de 80 € / m³, ya que en la propia planta se produce el hormigón, no obstante, este debe ser de los denominados especiales debido a que deberá cumplir una serie de características físicas y mecánicas específicas.

Costes indirectos

El Plan General Contable establece una serie de cuentas para los servicios exteriores, es decir ajenos a la propia producción de los productos

Los costes indirectos se han dividido en:

- Mantenimiento y reparación;
- Otros.

-Mantenimiento y reparaciones

El mantenimiento así como la reparación de la maquinaria tiene especial significancia en el correcto funcionamiento de las instalaciones por lo tanto ha necesitado un análisis separado del resto de costes indirectos.

La bibliografía disponible sobre los costes de funcionamiento de la maquinaria recomienda establecer un 10 % de la amortización de las instalaciones. Adicionalmente, las encuestas realizadas recomiendan hacer 1 hora de mantenimiento por día de trabajo. Consecuentemente, debido a las características de esta propuesta se ha decidido establecer un 15 % (postura conservadora) de la amortización anual.

-Otros

En este punto se engloban varios costes no vinculados directamente con la producción como son:

- Adquisición y / o reparación de ordenadores;
- Mobiliario de oficina;
- Servicios de limpieza;
- Comercialización de los productos;
- Servicios bancarios y seguros;
- Etc.

La bibliografía disponible sobre proyectos recomienda establecer una relación entre los costes directos e indirectos a través de la siguiente ecuación:

$$C_{\text{indirectos}} = K \cdot C_{\text{directos}}$$

Donde K es el coeficiente que relaciona los costes directos con los indirectos Para esta propuesta se ha tomado un valor de K igual 7%, debido a que existen dos plantas, por una parte la de fabricación de los bloques de hormigón y por otra la de producción de balasto a través de las instalaciones primarias, secundarias y terciarias.



Resultados económicos

Inversión inicial

Para la inversión inicial ha sido preciso realizar un análisis con tres escenarios, distinguiéndose entre ellos el precio del metro cuadrado de suelo. Los precios están condicionados por la Comunidad Autónoma a la que pertenecen, zona en la que se encuentra y planes de ordenación territorial previstos. Todo ello brinda una amplia variabilidad a los precios del suelo sin embargo, para seguir adelante con el estudio se han fijado tres precios referenciales: 100 € -150 €- 200 €

A partir de los cuales se ha procedido a realizar el análisis:

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Instalaciones (A)	6.000.000,00 €	6.000.000,00 €	6.000.000,00 €
Suelo (B)	2.200.000 €	3.300.000 €	4.400.000 €
Superficie (ha)	2,2	2,2	2,2
Precio (€/m ²)	100	150	200
Obra civil (C)	1.500.000 €	1.500.000€	1.500.000€
Transporte (D)	1.304.000€	1.304.000€	1.304.000€
Talleres (E)	1.130.400 €	1.130.400 €	1.130.400 €
%(A+D)	10%	10%	10%
TOTAL	11.734.400,00 €	12.834.400,00 €	13.934.400,00 €

Tabla 4.8 Inversión total inicial bloques de hormigón

Operación

Una vez calculada la inversión inicial se procede a realizar el cálculo del coste de producción de un metro cúbico de balasto.

Para el cálculo de la producción de balasto artificial se ha considerado que existe un aprovechamiento del 70 % del bloque de hormigón.

La producción media de las canteras suministradoras de balasto es de 20.000 – 25.000 m³ de balasto/mes, aunque algunas canteras llegan a producciones de 30.000 m³. Además, las canteras que suministran balasto obtienen semanalmente mediante voladura entorno a 6.000 m³ y 8.000 m³ de roca. Por lo tanto, podemos concluir que aproximadamente el 70% del material extraído se aprovecha para la fabricación de balasto, mientras que el 30 % restante se emplea en otros usos de la construcción.

Teniendo esos valores como criterios básicos de dimensionamiento de la capacidad de producción de la planta de balasto artificial, se obtiene que para producir 20.000 m³ de balasto al mes es necesario producir más de 250 bloques a la hora, valor que supera notablemente la capacidad de producción de cualquier planta de prefabricado.

Una planta de prefabricación de bloques de hormigón puede producir entre 10 y 20 bloques de hormigón a la hora, siendo el volumen de cada bloque 0,70m³ aproximadamente. Así, con estos valores se pueden llegar a producir entre 750 y 1.500 m³ de balasto artificial al mes.

Los resultados obtenidos para la planta de balasto artificial a partir de bloques de hormigón son los siguientes:



Bloques de Hormigón		
Producción anual de balasto		12.000
Aprovechamiento		70%
Producción anual de hormigón		17.143
Costes directos		2.520.806,10 €
Amortización (20 años)		586.720,00 €
Personal (18 Trabajadores)		427.657,52 €
Electricidad		135.000,00 €
Producción hormigón (80 € / m ³)		1.371.428,57 €
Costes indirectos		264.464,43 €
Mantenimiento y Reparaciones	15%	88.008,00 €
Otros	7%	176.456,43 €
Total producción		2.785.270,52 €
m ³ balasto artificial		232,11 €

Tabla 4.9 Resultados propuesta bloque de hormigón

Resultados del proceso de producción basado en moldes

Instalaciones

En este caso la inversión que se tenga que realizar para las instalaciones será análoga a la que se realizaría para una planta de fabricación de adoquines. La inversión establecida para este apartado es de 1,5 millones de euros.

Moldes

Para esta propuesta se requiere la fabricación de moldes especiales que permitan obtener las piedras de las dimensiones que estén dentro de los husos fijados por las prescripciones técnicas del balasto. Como se ha mencionado en distintas partes de este estudio, las dimensiones son de la escala de mm y por tanto hay que conocer el coste de diseño y fabricación que se requiere para cada uno de los tamaños buscados.

Para el análisis teórico de los costes de fabricación de los moldes, ha sido necesario realizar unas estimaciones en las que se ha tomado como base las publicaciones en línea (online) de los Precios de la Construcción (PREOC), dichos precios incluyen la mano de obra, maquinaria y transporte de las planchas hasta la fábrica, en este caso a la de balasto artificial. El precio fijado para cada plancha es 15 € (100ud. de planchas en total).

Para esta alternativa no se ha considerado la inversión en transporte interno debido a que no hay que realizar el traslado interno de materiales de cantera o bloques de hormigón.

Terreno

La maquinaria e instalaciones necesarias para esta alternativa tienen menores dimensiones que las indicadas para la fabricación a través de bloques de hormigón. Por ello estas plantas pueden estar situadas en las mismas zonas en las que existen en la actualidad plantas de adoquines.

La superficie de terreno necesaria para estas instalaciones es de 1 hectárea (10.000 m²). El precio del metro cuadrado de suelo depende de múltiples variables, siendo las



principales la relacionada con la Comunidad Autónoma a la que pertenece y, la proximidad al núcleo urbano. Consecuentemente se han establecido para esta propuesta los precios correspondientes a zona urbana de uso industrial próxima al núcleo urbano.

En el terreno debe haber zonas dispuestas para el acopio de la materia prima para la fabricación del hormigón, así como para el producto final, es decir el balasto artificial.

Para determinar la horquilla de precios se ha tomado como referencia la Comunidad de Madrid, consecuentemente para los cálculos se han fijado los siguientes valores 200 €, 250€ y 300€

Obra Civil

En este punto se incluyen las obras de cimentación de la planta de prefabricación, las edificaciones para las instalaciones, almacenes, etc. La inversión fijada para la obra civil es de 500.000 €

Talleres

Estos costes están vinculados con la necesidad de disponer unas instalaciones menores para las labores de mantenimiento y reparación de la maquinaria, así como puestos de primeros auxilios para los posibles accidentes laborales que se puedan presentar. Después de realizar el análisis de proyectos de fábricas de prefabricados se ha establecido que este coste de inversión es un 10% del capítulo de instalaciones.

Costes de operación

Costes directos

Para los costes directos se ha incluido:

- Amortización;
- Personal de la planta;
- Consumo eléctrico;
- Hormigón;

-Amortización

Según la tabla de coeficientes de amortización, el período que se debe fijar para este tipo de instalaciones es de 18 años. Por simplicidad de cálculos se ha escogido un sistema lineal de amortización.

-Personal

Como se ha indicado anteriormente, para cada una de las partes del proceso productivo se requiere una serie de operarios encargados del buen funcionamiento de la planta. Para esta propuesta se ha establecido la necesidad de 10 trabajadores (5 operarios, 3 personas del departamento administrativo, 2 operarios de mantenimiento y taller). Los salarios base de los trabajadores varían en función de la Comunidad Autónoma, sin embargo, para este estudio se han tomado como referencia los salarios fijados por el convenio colectivo para el sector de la construcción de la Comunidad de Madrid.

-Electricidad

Durante la explotación de la planta de balasto artificial el consumo energético tiene una importancia significativa por los costes que representan.

Para esta alternativa se ha tomado como base de referencia el consumo energético de la maquinaria empleada para fabricar adoquines (136 kw).

Para el cálculo se ha supuesto que las máquinas trabajan 2.000 horas al año. El precio de la electricidad fijado para estas instalaciones ha sido de 9 céntimos por kilovatio hora. Por lo tanto el gasto anual de electricidad es de 24.480 € para el primer año de operación.



-Hormigón

El precio del hormigón fijado para los cálculos es de 80 € / m³, ya que en la propia planta se produce el hormigón, no obstante, este debe ser de los denominados especiales debido a que deberá cumplir una serie de características físicas y mecánicas específicas.

Costes indirectos

El Plan General Contable establece una serie de cuentas para los servicios exteriores, es decir ajenos a la propia producción de los productos.

Los costes indirectos se han dividido en:

- Mantenimiento y reparación.
- Otros.

-Mantenimiento y reparaciones

El mantenimiento así como la reparación de la maquinaria tiene especial significancia en el correcto funcionamiento de las instalaciones por lo tanto ha necesitado un análisis separado del resto de costes indirectos.

La bibliografía disponible sobre los costes de funcionamiento de la maquinaria recomienda establecer un 10 % de la amortización de las instalaciones. Para este caso se ha tomado el valor recomendado debido a que solamente existe la maquinaria propia de la planta de prefabricación, mientras que en la propuesta de los bloques es preciso disponer de la maquinaria para la trituración y cribado, así como las cintas transportadoras empleadas en cada una de las etapas.

-Otros

En este punto se engloban varios costes no vinculados directamente con la producción como son:

- Adquisición y / o reparación de ordenadores.
- Mobiliario de oficina.
- Servicios de limpieza.
- Comercialización de los productos.
- Servicios bancarios y seguros.
- Etc.

La bibliografía disponible sobre proyectos recomienda establecer una relación entre los costes directos e indirectos a través de la siguiente ecuación:

$$C_{\text{indirectos}} = K \cdot C_{\text{directos}}$$

Donde K es el coeficiente que relaciona los costes directos con los indirectos. Para esta propuesta se ha tomado un valor de K igual 5%, ya que a diferencia del caso de los bloques de hormigón, el balasto se produce en una sola planta, la de prefabricación y por tanto los costes indirectos se reducen así como su peso sobre los costes totales.

Resultados económicos

Inversión inicial

Para la inversión inicial se ha realizado un análisis con tres escenarios, distinguiéndose entre ellos el precio del metro cuadrado de suelo. Los precios del suelo están condicionados por la Comunidad Autónoma a la que pertenecen, zona en la que se encuentra y planes de ordenación territorial previstos. Todo ello brinda una amplia variabilidad a los precios del suelo sin embargo, para seguir adelante con el estudio se han fijado tres precios referenciales: 200 € -250 € -300 €

A partir de los cuales se ha procedido a realizar el análisis:



Instalaciones (A)	1.500.000,00 €	1.500.000,00 €	1.500.000,00 €
Suelo (B)	2.000.000,00 €	2.500.000,00 €	3.000.000,00 €
Superficie (ha)	1	1	1
Precio (€/m ²)	200	250	300
Moldes	1.395,00 €	1.395,00 €	1.395,00 €
Obra civil (C)	500.000,00 €	500.000,00 €	500.000,00 €
Talleres (E)	150.000,00 €	150.000,00 €	150.000,00 €
%(A)	10%	10%	10%
TOTAL	4.151.395,00 €	4.651.395,00 €	5.151.395,00 €

Tabla 4.10 Inversión total inicial moldes

Operación

Una vez calculada la inversión inicial se ha procedido a calcular el coste de producción de un metro cúbico de balasto.

Una planta adoquinera tipo, puede llegar a producir unas 1.800m² de adoquines diarios, lo que corresponde a 52.000 ud. de adoquín diarios aproximadamente.

Si se toma como referencia dicha producción diaria, dado el volumen promedio de una piedra de balasto, se fabricarían algo más de 3 m³ de balasto al día (alrededor de las 60.000 ud. de piedras de balasto artificial al día, o lo que es lo mismo, 20.000ud.piedra/m³ balasto).

A diferencia de los bloque de hormigón, en esta propuesta el aprovechamiento del hormigón producido es del 100%.

Los resultados obtenidos para la planta de balasto artificial a partir de moldes son los siguientes:

Moldes		
Producción balasto		600
Aprovechamiento		100 %
Producción de hormigón		600
Costes directos		591.638,06 €
Amortización (18 años)		286.188,61 €
Personal (10 trabajadores)		232.969,45 €
Electricidad		24.480,00 €
Producción hormigón 80 € / m ³		48.000,00 €
Costes indirectos		64.117,14 €
Mantenimiento y Reparaciones 10%		28.618,86 €
Otros 6,0%		35.498,28 €
Total producción		655.755,21 €
m ³ balasto artificial		1.092,93 €

Tabla 4.11 Resultados propuesta moldes



4.4.5 Revisión estudio económico

Si nos limitamos a tomar los resultados económicos obtenidos en el apartado anterior (232,11 E/m³ de balasto por machaqueo de bloques de hormigón y 1.092,93 E/m³ de balasto mediante moldes), llegamos a la sencilla conclusión de que la producción de balasto artificial en base cemento está todavía muy alejada de los requisitos productivos exigibles para poder aplicar este tipo de tecnología en la construcción de infraestructuras ferroviarias reales. Desde un punto de vista puramente económico, ambas soluciones presentan costes muy por encima del precio actual de mercado del balasto natural, situado entre los 15 y los 25 euros por m³.

Desde la presente tesina, planteamos que dicho estudio económico posiblemente se haya quedado a mitad de camino en la valoración del coste productivo de dichos materiales, ya que en él no se ve reflejada la realidad productiva de nuestro país, es decir, el entramado industrial existente.

Los motivos propuestos los podemos resumir en los dos siguientes apartados:

-Se ha podido comprobar en el apartado anterior, que si consideramos la producción de balasto artificial partiendo desde cero, la inversión económica inicial es sumamente cuantiosa. La necesidad de invertir en suelo, instalaciones, obra civil, talleres etc. considerando la creación de una nueva industria hace que dicho coste económico alcance cifras tal, que se requiera una amortización superior a la considerada aceptable para estos casos (20 y 18 años respectivamente), dada la producción anual de balasto artificial planteada como aceptable en una industria de este tipo.

De esta manera, consideramos necesario partir de la red de industrias ya existente en nuestro país. De todos es sabido el desarrollo que el sector de la construcción vivió en España con anterioridad, creando una auténtica malla industrial, tanto en el sector de la construcción de prefabricados, plantas de hormigón, de áridos, etc.

Por lo tanto, creemos poder afirmar que debemos iniciar el proceso de fabricación de balasto artificial a partir de la infraestructura industrial existente, de tal manera que la inversión necesaria inicial se vea reducida, manteniendo un periodo de amortización asumible, consiguiendo así que el coste por m³ se reconduzca a valores más aceptables.

-Igualmente, afirmamos que dado el sistema productivo y económico actual, es obligación por parte de la industria la diversificación en los productos a fabricar, si se pretende que dicha industria se encuentre en condición de competitividad suficiente para superar los ciclos económicos y productivos que se viven en la sociedad actual.

Aplicando este fenómeno al coste productivo, lo que se produce es el reparto de costes entre todos los productos que se producen, sobre todo, de los conocidos como indirectos. Es decir, los costes de mantenimiento y reparaciones, considerados como un porcentaje de la amortización anual, se ven reducidos, a la vez que los gastos tomados como "otros" (adquisición y / o reparación de ordenadores, mobiliario de oficina, servicios de limpieza, comercialización de los productos, servicios bancarios y seguros) se encuentran ya amortizados o en su caso repercutidos entre los diferentes productos.

Finalmente, existe otro apartado que consideramos de vital importancia para finalizar el estudio económico de viabilidad en la producción de balasto artificial y que observamos que no se ha tenido en cuenta.

Dado que parece confirmado que es posible alcanzar reducciones importantes de los costes de mantenimiento de la geometría de la vía con el nuevo material, puesto que un



diseño de un balasto artificial con un ángulo de rozamiento alto es posible y permite reducir las deformaciones bajo ciclos de carga, estaríamos retrasando de forma importante los procesos de degradación y por lo tanto las necesidades de intervención. En resumen, disminuiríamos los costes de mantenimiento.

Es decir, es posible que una inversión más cuantiosa durante la fase de inicio al crear la infraestructura mediante balasto artificial en lugar del natural, se vea recuperada con el paso de los años al reducir los costes de mantenimiento. Esta mejora económica, a día de hoy, es difícil de cuantificar dado que no disponemos todavía de resultados específicos que nos permitan considerar a ciencia cierta el mejor comportamiento frente a desgaste por parte del balasto artificial. A pesar de ello, consideramos que este aspecto si es necesario tenerlo en cuenta tanto a nivel teórico como en aplicación numérica, aunque sea aplicado mediante hipótesis, ya que, al fin y al cabo, la búsqueda de una mejora del comportamiento por parte del balasto es el eje principal para la realización del proyecto de balasto artificial, y en su ausencia, posiblemente dicho proyecto quedaría en el olvido.

A continuación, trataremos de presentar, basándonos en los criterios expuestos anteriormente, el reajuste económico que consideramos posible en la fabricación de balasto artificial.

Resultados del proceso de producción basado en machaqueo de bloques de hormigón-Revisión económica

Instalaciones

En este caso, y tal y como hemos expuesto con anterioridad, partiremos de una de las múltiples plantas de árido existentes, de tal manera, que únicamente consideraremos un porcentaje de inversión destinado a la adquisición de maquinaria específica necesaria o a la adecuación de la maquinaria ya existente.

Consideramos así, un porcentaje de un 25% de la inversión completa estimada para creación de instalaciones. (1.250.000E).

Por lo que se refiere a las instalaciones necesarias para la creación de la planta de hormigón, si que tomamos la inversión completa (1.000.000E), dado que ésta es inexistente en la planta de áridos expuesta como ejemplo.

Transporte

Dado que es obvio que en una planta de áridos actual ya existen medios de transporte (dumperes, palas etc.) para el transporte de materiales, igualmente que en el caso anterior tomaremos un porcentaje del 25% de la inversión considerada completa. (326.000E)

Terreno

En este apartado, consideramos únicamente la adquisición del espacio necesario para la planta de bloques de hormigón, 0,2 hectáreas. A esta superficie necesaria, le aplicamos el precio medio del m² (150E/m²)

Obra civil

Igualmente, en este aspecto, consideramos únicamente la inversión en obra civil necesaria para la planta de los bloques de hormigón. Tomaremos un porcentaje del 25% de la inversión tomada como completa. (375.000E)

Talleres

Del mismo modo que en cálculos precedentes, el coste asignado a talleres se establece en un 10% del capítulo de instalaciones y transporte. (257.600E)



Costes de operación

Durante la operación de la planta se van a producir una serie de costes fijos y variables, así como directos e indirectos.

Costes directos:

Para los costes directos se ha incluido:

- Amortización;
- Personal de la planta;
- Consumo eléctrico;
- Hormigón;

-Amortización

Mantenemos el criterio, 20 años de periodo de amortización mediante sistema lineal por simplicidad de cálculos.

-Personal

En este caso, vamos a tomar únicamente el 50% del personal considerado como necesario del planteado en el caso de muestra.

Esto se debe a que al tratarse de una planta ya en funcionamiento, a pesar de la apertura de una nueva línea de trabajo, se debería evitar la duplicidad de puestos de trabajo. (213.828,76E)

-Electricidad

Para el coste en electricidad, mantenemos la valoración del modelo propuesto, ya que en este caso, la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos de producción de balasto artificial es la considerada como necesaria e indispensable.

-Hormigón

En lo que respecta al consumo de hormigón, estamos en desacuerdo en considerar únicamente un aprovechamiento del 70% del material invertido. Siendo conscientes de las pérdidas en forma de rechazo que se producen durante la fase de fabricación, y dado que se trata de una planta de áridos, es básico que dicho material sobrante pueda ser reutilizado para el mismo proceso o en todo caso, para la fabricación de subproductos. Planteamos un aprovechamiento del 95%.

Costes indirectos

El Plan General Contable establece una serie de cuentas para los servicios exteriores, es decir, ajenos a la propia producción de los productos.

Los costes indirectos se han dividido en:

-Mantenimiento y reparación.

-Otros.

Igual que en el modelo propuesta, se considera como costes de mantenimiento y reparaciones el 15% de la amortización anual y por lo que respecta al apartado de "otros", un 7% de los costes directos.



Resultados económicos

Inversión inicial

	Escenario
Instalaciones (A)	2.250.000 €
Suelo (B)	300.000 €
Obra civil (C)	375.000 €
Transporte (D)	326.000 €
Talleres (E)	257.600 €
Total	3.508.600 €

Tabla 4.12 Inversión total inicial bloque de hormigón (ajuste)

Operación

Bloques de hormigón	
Producción anual de balasto	12.000
Aprovechamiento	95%
Producción anual de hormigón	12.631,57
Costes directos	1.534.784,36
Amortización (20años)	175.430,00
Personal	213.828,76
Electricidad	135.000,00
Producción hormigón (80E/m3)	1.010.525,60
Costes indirectos	133.749,41
Mantenimiento y reparaciones	26.314,50
Otros	107.434,91
Total producción	1.668.533,77
E/m3 balasto artificial	139,04

Tabla 4.13 Resultados propuesta bloque de hormigón (ajuste)

Comprovamos como hemos reducido el precio en un 40,09% (93,07E).

Pero tal y como hemos comentado al inicio del apartado, nos falta un aspecto a considerar para valorar el coste de la inversión en balasto artificial a la hora de crear una infraestructura ferroviaria.

Se trata de la disminución de los costes necesarios de mantenimiento, debido al mejor comportamiento del balasto artificial bajo los ciclos de carga permitiendo una menor deformabilidad. Dado que no disponemos de resultados específicos, consideraremos una reducción en los costes de mantenimiento del 40% (el 40% de los costes totales de mantenimiento de una línea como la Madrid-Sevilla de alta velocidad corresponden al mantenimiento de la geometría: estabilizado, perfilado, bateo).

De forma general el coste de mantenimiento de vía se estima en una banda definida por 9.000 y 15.000 euros anuales por km de vía (López Pita y Robusté, 2002).



En 1km de vía, podemos considerar la necesidad de unos 600m³ de balasto. El coste de dicho material, considerando balasto natural alcanzaría los 12.000E. Empleando balasto artificial, el coste del material sería de 83.424E aproximadamente. El incremento de coste de un material a otro sería de 71.424E.

Dado que la diferencia en el coste de mantenimiento de 1km de vía con balasto natural (12.000E) a una vía con balasto artificial (7.200E) sería de 4.800E anuales, tardaríamos unos 15 años en amortizar el material, considerando un periodo de vida útil del balasto natural de 30 años.

Resultados del proceso de producción basado en moldes. Revisión económica

Instalaciones

En este caso, la base de trabajo será una de las múltiples plantas de prefabricados existentes, de tal manera, que únicamente consideraremos un porcentaje de inversión destinado a la adquisición de maquinaria específica necesaria o a la adecuación de la maquinaria ya existente.

Consideramos así, un porcentaje de un 25% de la inversión completa estimada para creación de instalaciones. (375.000E).

Moldes

Por lo que respecta a la creación de los moldes necesarios para la fabricación del balasto artificial, tomaremos el 100% de la inversión considerada como necesaria, ya que parece obvio que nuestra empresa de prefabricados no disponga de los moldes con las características necesarias para este proceso de fabricación.(1.395E)

Terreno

En este apartado, consideramos únicamente la adquisición del espacio necesario para la ampliación de la planta industrial, es decir, consideramos que parte de la superficie actual de la planta puede ser aprovechada para la fabricación del producto pero que si que es posible que sea necesaria una parte de ampliación para la ubicación de las instalaciones más específicas de producción. Tomamos un porcentaje de un 25% de la inversión completa estimada. (2.500m²) A esta superficie necesaria, le aplicamos el precio medio del m² (250E/m²)

Obra civil

Igualmente, en este aspecto, consideramos únicamente la inversión en obra civil necesaria para la ampliación de superficie considerada (125.000E), es decir, un 25% de la inversión considerada completa.

Talleres

Del mismo modo que en cálculos precedentes, el coste asignado a talleres se establece en un 10% del capítulo de instalaciones. (37.500E)

Costes de operación

Durante la operación de la planta se van a producir una serie de costes fijos y variables, así como directos e indirectos.

Costes directos:

Para los costes directos se ha incluido:

- Amortización;
- Personal de la planta;
- Consumo eléctrico;



-Amortización

Mantenemos el criterio, 20 años de periodo de amortización mediante sistema lineal por simplicidad de cálculos.

-Personal

Al igual que en el caso anterior, vamos a tomar únicamente el 50% del personal considerado como necesario del planteado en el caso de muestra, evitando así la duplicidad en los puestos de trabajo.

-Electricidad

Igual que para el caso de fabricación por machaqueo de bloques de hormigón, en la cuestión del coste en electricidad, mantenemos la valoración del modelo propuesto, ya que en este caso, la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos de producción de balasto artificial es la considerada como necesaria e indispensable. (24.480E)

-Hormigón

El precio del hormigón fijado para los cálculos es de 80 € / m³, ya que en la propia planta se produce el hormigón, no obstante, este debe ser de los denominados especiales debido a que deberá cumplir una serie de características físicas y mecánicas específicas. El rendimiento es del 100%.

Costes indirectos

El Plan General Contable establece una serie de cuentas para los servicios exteriores, es decir, ajenos a la propia producción de los productos.

Los costes indirectos se han dividido en:

-Mantenimiento y reparación.

-Otros.

Igual que en el modelo propuesta, se considera como costes de mantenimiento y reparaciones el 10% de la amortización anual y por lo que respecta al apartado de "otros", un 5% de los costes directos.

Resultados económicos

Inversión inicial

	Escenario
Instalaciones (A)	375.000 €
Suelo (B)	625.000 €
Moldes	1.395 €
Obra civil (C)	125.000 €
Talleres (E)	37.500 €
Total	1.163.895 €

Tabla 4.14 Inversión total inicial por moldes (ajuste)



Operación

Moldes	
Producción anual de balasto	600
Aprovechamiento	100%
Producción anual de hormigón	600,00
Costes directos	253.625,56
Amortización (18 años)	64.660,83
Personal	116.484,73
Electricidad	24.480,00
Producción hormigón (80E/m3)	48.000,00
Costes indirectos	19.147,36
Mantenimiento y reparaciones	6.466,08
Otros	12.681,28
Total producción	272.772,92
m3 balasto artificial	454,62

Tabla 4.15 Resultados propuesta por moldes (ajuste)

Comprovamos como hemos reducido el precio en un 58,40% (638,31E).

Pero tal y como hemos comentado al inicio del apartado, nos falta un aspecto a considerar para valorar el coste de la inversión en balasto artificial a la hora de crear una infraestructura ferroviaria.

Se trata de la disminución de los costes necesarios de mantenimiento, debido al mejor comportamiento del balasto artificial bajo los ciclos de carga permitiendo una menor deformabilidad. Dado que no disponemos de resultados específicos, consideraremos una reducción en los costes de mantenimiento del 40% (el 40% de los costes totales de mantenimiento de una línea como la Madrid-Sevilla de alta velocidad corresponden al mantenimiento de la geometría: estabilizado, perfilado, bateo).

De forma general el coste de mantenimiento de vía se estima en una banda definida por 9.000 y 15.000 euros anuales por km de vía (López Pita y Robusté, 2002).

En 1km de vía, podemos considerar la necesidad de unos 600m³ de balasto. El coste de dicho material, considerando balasto natural alcanzaría los 12.000E. Empleando balasto artificial, el coste del material sería de 272.772E aproximadamente. El incremento de coste de un material a otro sería de 260.772E.

Dado que la diferencia en el coste de mantenimiento de 1km de vía con balasto natural (12.000E) a una vía con balasto artificial (7.200E) sería de 4.800E anuales, tardaríamos unos 54 años en amortizar el material, considerando un periodo de vida útil del balasto natural de 30 años.

Tanto en el caso de la producción por machaqueo de bloques como en el caso del encofrado por moldes, hemos observado como se puede reducir el precio, tomando como base productiva una infraestructura industrial existente y competitiva.

A pesar de ello, los precios obtenidos con esta revisión, no pueden competir con el precio actual del balasto natural. En el caso de la fabricación por machaqueo de bloques, quintuplicamos el precio respecto al balasto natural mientras que en el caso de la fabricación mediante moldes, prácticamente lo obtenemos 18 veces más caro.



Así, con este primer estudio, podemos concluir que la línea de trabajo más óptima a priori, considerando el ámbito económico, es la fabricación por machaqueo de bloques, básicamente debido a la baja capacidad de producción diaria de una planta tipo prefabricados (un solo m³ de balasto requiere de 20.000ud de piedras prefabricadas).

A pesar de estos inconvenientes, existen otras valoraciones que permiten pensar que la investigación debe continuar.

Por un lado, y tal y como hemos comentado con anterioridad, debemos constatar que con una mejora específica del comportamiento del balasto artificial frente a la degradación, que pueda permitir aumentar su vida útil, puede producir en un futuro que el precio de este nuevo material, que a día de hoy consideramos excesivo, alcance un valor competitivo, si somos capaces de reducir así los elevados costes de mantenimiento actuales.

Otro aspecto que no debemos olvidar, es que el precio del balasto natural está aumentando de forma progresiva, de forma paralela a las restricciones medioambientales que se van implantando a la extracción de áridos naturales y al aumento de la distancia de transporte desde el punto de obtención del material al punto de trabajo. De esta manera, esta visión de futuro nos tiene que hacer plantear la necesidad de buscar nuevas alternativas.

Finalmente, y entendemos que como aspecto clave e indispensable, se requiere de un estudio más estricto y preciso del proceso de fabricación, para lo cual una experiencia piloto supervisada por las partes implicadas en el proceso (productores y administración), permitiría elaborar un esquema real del proceso productivo obteniéndose así la respuesta a la viabilidad económica del proyecto.



4.5 CONCLUSIONES.

El balasto artificial es un primer paso en la investigación de un material granular artificial que pueda sustituir a medio plazo el balasto natural, aplicable en la construcción y renovación de líneas.

Al ser un “material de diseño” debería conducir a mejoras sustanciales en el comportamiento de la capa de balasto, adaptando el mismo a las condiciones de explotación, y, en especial a las exigencias de líneas con condiciones especialmente exigentes (velocidad, cargas, clima, entorno contaminante, etc.)

A la vista del volumen de la producción de balasto en líneas de nueva construcción y la necesidad de su renovación periódica, el impacto económico y ambiental del desarrollo de este nuevo material puede ser muy importante.

Aunque se encuentre en estos momentos en fase de investigación preliminar, los resultados obtenidos son alentadores, en particular en el desarrollo del material base ya que la elección de morteros de alta resistencia como material “piloto” para balasto artificial ha sido finalmente confirmada como una elección acertada.

A pesar de parecer un objetivo juzgado difícilmente alcanzable al inicio de la investigación, se ha logrado el objetivo de obtener y ensayar morteros de alta resistencia que, a modo de “piedra artificial”, están en el umbral cuantificado y justificado para ser aplicados en la producción de granos de balasto artificial.

Parece confirmado que es posible alcanzar reducciones importantes de los costes de mantenimiento de la geometría de la vía con el nuevo material puesto que un diseño de un balasto artificial con un ángulo de rozamiento alto es posible y permite reducir las deformaciones bajo ciclos de carga y retrasar de forma importante los procesos de degradación y por lo tanto las necesidades de intervención.

Por otro lado, el análisis del estado del arte en el conocimiento del balasto natural ha permitido, como se verá en futuros proyectos de investigación, avanzar en el conocimiento de este material, inferir ciertas limitaciones y por lo tanto oportunidades de mejora en su conocimiento y caracterización.

Las futuras líneas de trabajo deben buscar ampliar el conocimiento sobre el balasto natural en todos los aspectos pero de forma urgente en el aspecto experimental: es posible obtener más datos de los ensayos actuales (granulometría después de ensayo de LA) y es posible, con un coste razonable, aumentar la frecuencia de ciertos ensayos (resistencias Franklin), y ampliar el control con ensayos sencillos (dureza superficial) y más complejos (compresión, flexotracción, fractura vértice) aunque estos últimos impliquen la muy difícil labor de elaboración de probetas de roca de las canteras de balasto.

El Ensayo de Rotura de Vértice o el de dureza superficial desarrollados en este trabajo invitan a ahondar en la búsqueda de nuevos ensayos de caracterización que permitan mejores predicciones del comportamiento del medio granular y definir parámetros de contacto entre partículas en los programas de simulación.

Aunque los resultados en cuanto al material (morteros de alta resistencia) son alentadores, se debe seguir esta línea de investigación buscando mayores resistencias, pero, sobre todo, mayores durezas superficiales.

Los resultados de la investigación indican que un balasto artificial puede contribuir a infraestructuras ferroviarias con menor coste de ciclo de vida a medio o largo plazo pero la posibilidad de orientar su diseño puede convertirlo en una opción en aquellos casos en que tipologías “rígidas” como la vía sobre placa no sean aplicables y en los que sea necesario



afrentar condiciones especialmente severas (riesgos muy altos de contaminación del balasto, condiciones climáticas extremas, cargas de tráfico excepcionales, etc.).

En el aspecto económico, la primera exigencia que se le debiera exigir a un hipotético mercado de balasto artificial en base cemento es un volumen suficiente que permita adoptar economías de escala y reducir los costes de fabricación por unidad producida.

El consumo de balasto ha sido creciente durante la década 2001-2010 en gran parte por las obras acometidas de Alta Velocidad y las operaciones de mantenimiento de la red convencional. Este crecimiento tiende a estabilizarse, pero se espera que el consumo anual de balasto en España se sitúe en aproximadamente 5 millones de m³. Este consumo, en principio, puede justificar la utilización de balasto artificial en base cemento siempre y cuando el precio del producto se incremente como consecuencia de unas limitaciones mayores en la extracción de áridos naturales.

Los precios valorados en el apartado anterior no permiten que la producción de balasto artificial en base cemento sea sostenible a día de hoy, en comparación con el precio de mercado actual del balasto natural.

Por otro lado, hemos podido observar que con un análisis más ajustado a la realidad industrial productiva, los costes considerados inicialmente se han visto reducidos considerablemente. Como consecuencia de ello, podemos concluir que las líneas de trabajo se han tendido de forma óptima, pero que realmente se requiere de un estudio más detallado, y posiblemente, de dar un paso más allá hacia la experimentación real por parte de las propios interesados del sector (industria productora, administración) para poder concluir de forma fehaciente la viabilidad económica del proyecto balasto artificial.





CAPÍTULO 5:

OTRAS TECNOLOGÍAS:

XITRACKR Y ELASTOTRACKR

5.1 XITRACKR

En lo que respecta al agregado de poliuretanos sobre el balasto, se diferencian dos tipos de actuaciones: la primera consiste en agregar un riego de poliuretano sobre la capa de balasto formando de esta manera una especie de red, mientras que la segunda consiste en recubrir las partículas de balasto de poliuretano y luego realizar el montaje de vía.

El estudio de los riegos de poliuretano sobre las infraestructuras ferroviarias ha sido llevado a cabo desde el año 2004 en el Reino Unido por parte del profesor Meter Woosward, de la Universidad Heriot-Watt (Escocia). El nombre comercial de este producto es “Xitrackr” y se ha ido ensayando en diversas ocasiones. El producto consiste en colocar una mezcla de poliuretano líquido mediante una aplicador sobre la superficie de la capa de balasto (Fig. 5.1 y 5.2), el cual se va escurriendo sobre la misma y alcanza su curado en aproximadamente 10 segundos.

Luego de pasada una hora de su aplicación, la mezcla adquiere un 90% de la resistencia óptima. Una vez completado el curado el balasto adquiere una resistencia en las tres dimensiones formando una red que mantiene a las partículas de balasto en perfectas condiciones ya que amortigua el contacto entre las mismas evitando el desgaste y la



erosión. Como se aprecia en la figura 5.22, la aplicación no alcanza a llenar el volumen de huecos existentes en el balasto aunque si dificultado.



Figura 5.1 Riego de Poliuretano sobre capa de balasto Xitrackr



Figura 5.2 Piedras rociadas con Poliuretano Xitrackr

Luego de pasada una hora de su aplicación, la mezcla adquiere un 90% de la resistencia óptima. Una vez completado el curado el balasto adquiere una resistencia en las tres dimensiones formando una red que mantiene a las partículas de balasto en perfectas condiciones ya que amortigua el contacto entre las mismas evitando el desgaste y la erosión. Como se aprecia en la figura 5.3, la aplicación no alcanza a llenar el volumen de huecos existentes en el balasto aunque si dificultado.

Este tipo de solución, se ha empleado en el Reino Unido principalmente en puntos críticos, donde eran necesarias tareas de mantenimiento frecuentes, ya sea debido a la mala calidad de la plataforma o a la diferencia de rigidez existente en los puentes. Los resultados obtenidos han sido muy buenos, pero al igual que el “Balasto Artificial” el coste de ejecución es elevado, lo que hace al producto atractivo solo en casos puntuales.



Figura 5.3 Probeta de balasto Xitrackr

5.2 ELASTOTRACKR

La otra alternativa a la aplicación de poliuretano sobre balasto la ha desarrollado la empresa BASF mediante un producto llamado “ElastotrackR”. Como se ha mencionado anteriormente, la idea de éste producto está basada en recubrir cada una de las partículas del balasto en poliuretano (Fig.5.4) y luego formar la capa de balasto con las partículas ya recubiertas. Este producto ha sido utilizado recientemente en la línea de pasajeros entre Wu y Guang (China) con el objetivo de reducir el vuelo de balasto, el ruido y el desgaste del mismo, y en puntos singulares en Estados Unidos pero ambos sin resultados aún visibles.



Figura 5.4 Balasto recubierto en poliuretano. Elastotrackr

El investigador Marcus S. Dersch, de la Universidad de Illinois ha realizado pruebas de resistencia cortante sobre este producto con el fin de determinar los beneficios obtenidos a partir del empleo del mismo frente al del balasto sin tratar.

Luego de pasados 14 días, al alcanzar el curado, la capa de balasto con poliuretano adquiere resistencias a cortante del orden de 1,5 veces de las que tiene el balasto tradicional, adquiriendo ángulos de fricción internos y cohesiones mayores que el balasto sin tratar. Para reducir los tiempos de curado se utilizan catalizadores que logran obtener resultados óptimos de resistencia pasadas las 6 horas. Uno de los inconvenientes que



presenta este producto radica en que en las primeras horas de curado la resistencia del conjunto disminuye, ya que el recubrimiento actúa como un lubricante y disminuye el rozamiento entre rocas.

5.3 ANÁLISIS DE LAS INNOVACIONES.

Luego de introducidas las innovaciones con base de poliuretano que existen en torno a la capa de balasto, pretenderemos sacar una serie de conclusiones aplicadas a las mismas. El hecho de que existan contemporáneamente varios estudios que se centren en mejorar las características del balasto actual indica la necesidad e importancia que ello tiene en los tiempos que vienen.

Además, se debe destacar de las experiencias mencionadas, los buenos resultados obtenidos en el campo de la resistencia y del desgaste del balasto. Los aumentos de resistencia obtenidos en la aplicación de Xitrackr y Elastotrackr, alientan a seguir en las líneas de investigación de mejorar el balasto tradicional frente a la opción de cambiarlo.

Asimismo, la utilización del poliuretano como protección de los granos les aporta una mayor durabilidad.

A pesar de ello, existen una serie de factores que hacen a estos productos poco atractivos para la implantación en líneas enteras.

En lo que respecta a Xitrackr, la estructura mallada que compone el poliuretano junto con las piedras hacen que no sea factible realizar el bateo de la vía. Esto se traduce en la imposibilidad de reparar defectos de alineación una vez aplicado el riego, y por consecuente, la necesidad de renovar por completo el tramo que se encuentra afectado.

Siendo que los tendidos ferroviarios no presentan homogeneidad en sus plataformas, es inevitable que a medida que el tráfico aumente, los defectos en la vía comiencen a aparecer. El hecho de tener que renovar por completo la sección dañada hace que este tipo de tecnología sea muy costosa. Además, estos riegos disminuyen la porosidad y por tanto la permeabilidad de la vía, lo que traduciría en problemas en la nivelación de la plataforma.

En cuanto a la aplicación de Elastotrackr, al encontrarse en su etapa inicial de implantación se tienen muy pocos resultados visibles. De la información publicada, se puede visualizar la falta de ensayos exigidos por normativa, ya que solo se ha ensayado bajo corte directo pero no se han publicado ningún otro tipo de ensayos necesarios para cumplir con los requisitos existentes en las infraestructuras ferroviarias. Otra desventaja que presenta éste producto es el largo tiempo de curado necesario para adquirir resistencias admisibles, lo que se traduce en la necesidad de aumentar el coste del producto aplicando catalizadores, que aún así implican 6 horas de fraguado como mínimo.

Siendo conscientes de las ventajas y debilidades que aportan estas innovaciones al mundo ferroviario, se ha optado por seguir las líneas de investigación de agregación de materiales al balasto existente, con la idea de aportar nuevas ideas que hagan posible la implantación de este tipo de avances en las vías.



CAPÍTULO 6: UNA NUEVA PROPUESTA: EL NEOBALAST

6.1 NECESIDAD DEL PROYECTO NEOBALAST

Hemos podido comprobar al principio de la tesina como el balasto natural desempeña un importante papel en el comportamiento de una vía frente a las acciones tanto verticales como transversales, además de ser la tipología más adecuada para la reducción del ruido y de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario debido a su flexibilidad y a su capacidad de amortiguamiento.

Aún así, la solución de vía con balasto cuenta con desventajas que pueden resumirse en la necesidad de operaciones de mantenimiento de la geometría de la vía relativamente frecuentes y una vida útil relativamente corta. La lógica de mejora ha producido que a lo largo de los últimos años se hayan iniciado proyectos para la sustitución o mejora de las propiedades de dicho material, ya que a la vista del volumen de producción de balasto en líneas de nueva construcción y la necesidad de su renovación periódica, el impacto económico y ambiental del desarrollo de estas alternativas podría ser muy importante. Podemos decir que el cumplimiento de los objetivos marcados por dichos proyectos ha sido dispar, pero concluimos, que a día de hoy, no se ha encontrado el material capaz de sustituir de forma genérica al balasto natural.



La vía en placa, como alternativa más extendida al balasto natural a día de hoy, y a pesar de su mejor comportamiento frente a la degradación, no ha sido capaz de sustituir de forma clara a la piedra natural. Sus elevados costes de construcción, y su peor comportamiento frente a las vibraciones y ruidos, han sido sus principales puntos débiles. Por otro lado, no hay que esconder que la vía en placa ha sufrido una evolución muy positiva en relación a estos últimos aspectos (ruido y vibraciones) mediante la aparición de nuevas tecnologías que han permitido mejoras, y que por lo tanto, no podemos descartar que en un futuro, el comportamiento de la vía en placa pueda llegar a equipararse al de la vía en balasto.

Quizás, el contexto económico en el que se encuentre en cada momento la sociedad, se convierta realmente en juez y parte de la toma de decisión de ejecutar una vía en balasto o en placa.

Estas inseguridades y necesidades sin respuesta son las que han generado que la investigación y el desarrollo de productos para la sustitución o mejora del balasto natural no se haya detenido.

Una de las investigaciones más trabajadas a día de hoy es el proyecto balasto artificial. Como hemos visto, se trata de un primer paso en la investigación de un material granular artificial que pueda sustituir a medio plazo el balasto natural, aplicable en la construcción y renovación de líneas. El trabajo debe centrarse en este momento de la investigación en la búsqueda de mayores resistencias, pero, sobre todo, de mayores durezas superficiales. Otro aspecto clave para el desarrollo del proyecto es la viabilidad económica de la producción de dicho material, que a día de hoy, y tal y como hemos visto en el capítulo 4, no es competitiva frente al balasto natural.

Otro punto débil sería la escasa reducción del impacto medioambiental que tiene la producción de balasto artificial, ya que la extracción de áridos en cantera seguiría siendo necesaria para la producción de dicho material, dada la fabricación de los microhormigones y morteros de alta resistencia que dan forma a este nuevo producto.

Puesto que la sustitución directa del balasto natural por otros materiales no ha cumplido los objetivos propuestos, iniciamos la vía de la modificación y mejora del material en cuestión. No sustituimos, sino que buscamos mejorar el producto.

Las alternativas mediante agregados de poliuretanos mostradas en el capítulo 5 han sido un primer paso para valorar las ventajas de la agregación de materiales al balasto existente, a pesar de sus debilidades (imposibilidad de reparación de defectos mediante bateo, disminuciones de permeabilidad de la vía, tiempos de curado etc).

De esta manera, una vez realizados los análisis de todos estos proyectos desde ángulos y campos de conocimiento diversos (tecnología, productividad, economía), surge la necesidad de dar un paso más en la investigación, mejora y desarrollo del balasto natural, obteniendo como resultado el proyecto "neobalast" o balasto de altas prestaciones.

Dicho proyecto busca dotar de mayores prestaciones al balasto mediante un nuevo tratamiento superficial (recubrimiento formado por un aglomerante más partículas de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso-NFU), alargando así la vida útil del balasto, mejorando sus prestaciones antivibratorias y frente a ruido, además de reducir el impacto ambiental por uso de material procedente de canteras.



6.2 ÁMBITO DE IMPACTO DE LA SOLUCIÓN

Recientemente se ha publicado el contrato que contempla el suministro y transporte de 264.000 toneladas de balasto en función de las necesidades de las bases de mantenimiento. De esta manera, Adif ha licitado el contrato para el suministro y transporte de balasto destinado al mantenimiento de líneas de alta velocidad para el periodo 2013-2014, por un importe de 6.534.433 euros.

El contrato, cuyo objetivo es mantener los parámetros fundamentales de la explotación ferroviaria en los niveles correctos, se ha dividido en quince lotes que corresponden a diferentes bases y subbases de mantenimiento de líneas de alta velocidad. Las necesidades de suministro de balasto para cada lote se han calculado en función de los siguientes parámetros: longitud de la doble vía a mantener, evolución geológica y geotécnica de la infraestructura, número de instalaciones comprendidas en el tramo (estaciones, puestos de banalización y puestos de adelantamiento y estacionamiento de trenes) y frecuencia de paso de trenes.

El total de 264.000 toneladas métricas de balasto de tipo 1 destinados a diferentes bases y subbases de mantenimiento y puntos de suministro se distribuye de la siguiente forma:

Centro	Toneladas	Importe en euros
Base de Brihuega	12.000	225.523
Base de Calatayud	16.000	442.519
La Cartuja	24.000	854.136
Puigverd	24.000	490.787
Base de Vilafranca	20.000	411.216
Base de Mora	12.000	153.053
Base de Calatrava	6.000	108.503
Base de Hornachuelos	12.000	231.200
Base de Antequera 1	6.000	444.523
Base de Olmedo	6.000	124.784
Base de Villarubia	24.000	459.395
Subbase de Gabaldón	24.000	828.421
Base de Requena	24.000	916.586
Base de Monforte del Cid	24.000	567.264
Base de Sant Feliu de Buixalleu	20.000	276.518

Tabla 6.1 Distribución por bases del balasto previsto para líneas de alta velocidad 2013-2014

La magnitud de las cantidades, tanto en tonelaje como en importe económico, del consumo de balasto en las líneas de alta velocidad españolas para este año 2013, nos lleva a la idea del gran impacto económico y de mejora ambiental que tendría la implantación de este nuevo material, debido a la reutilización de recursos que se generaría, disminuyendo la explotación de canteras y reduciendo las emisiones ambientales derivadas del transporte.



A toda esta valoración, se le debería añadir la red ferroviaria convencional, cuya longitud se sitúa entorno a los 11.750 km de vía. A diferencia de la línea de alta velocidad, de la cual si que disponemos el consumo previsto, en este caso no existen datos claros de la cantidad de tramo de vía con balasto que se someterá a renovación este año. A pesar de esta falta de información, no por ello queda oculta la revolución técnica y económica que supondría la implantación de esta nueva tecnología ferroviaria.

6.3 COMPONENTES DEL NEOBALAST

Luego de ya mencionada la problemática existente en torno a la acelerada degradación de la capa de balasto, y las alternativas que se han ido generando en torno a este inconveniente, proponemos un nuevo producto que tiene grandes expectativas de solucionar la problemática actual de manera respetuosa con el medioambiente y la sociedad.

Este producto consta de tres materiales que lo componen para lograr los objetivos planteados, estos materiales son: el caucho reciclado, el poliuretano y la piedra que conforma el balasto. La combinación de estos materiales consiste en rodear el grano de balasto de un ligante que garantice que el caucho triturado se adhiera a la superficie de la piedra generando un nuevo grano que resiste la abrasión y aumenta la vida útil de la capa de balasto (Fig. 6.1).

Neumáticos fuera de uso y el caucho reciclado.

En España se generan unas 300.000 toneladas al año de neumáticos fuera de uso (NFU). Este enorme volumen de residuos, junto con la normativa al respecto promulgada por la UE, ha llevado al Ministerio de Medio Ambiente a elaborar el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso. El Plan cita a la obra pública como instrumento de reciclado prioritario, siempre que la utilización de materiales del reciclado de NFU sea técnica y económicamente viable.



Figura 6.1 Primeras muestras de NEOBALAST

El total de NFU generados en España (2004), se gestionaba de la siguiente manera: el 12,2 por 100 se destinaba a recauchutado (recauchar o recubrir las grietas de los neumáticos usados con más caucho); el 13,9 por 100 a reciclaje; el 17,2 por 100 a



valorización energética y la mayor parte, el 50,3 por 100, a vertido, abandono o depósito en vertedero. Si tomamos la comparativa respecto a la UE presentada en la tabla 6.1, se puede apreciar fácilmente el amplio margen para aumentar el reciclaje que hay en este ámbito.

Año 2004	UE de los 15		España	
	NFU (t)	%	NFU (t)	%
Generación	2.796.000	100	305.718	100
Recauchutado	325.000	12	37.173	12,2
Reciclado de material	852.000	30	42.500	13,9
Valorización energética	901.000	32	52.500	17,2
Vertido	414.000	15	153.787	50,3
Exportación y reutilización	304.000	11	19.758	6,4

Tabla 6.2 Modalidades de tratamiento de los NFU en España y la UE de los 15 Fuente : AER y BLIC

La posibilidad de recubrir las piedras del balasto con caucho triturado aportaría un mayor ángulo de rozamiento entre partículas, disminuyendo además la trituración y desgaste de las mismas, lo que se traduce en una mayor durabilidad y la disminución de tareas de mantenimiento sobre la capa de balasto.

La combinación del ferrocarril, uno de los medios de transporte más respetuosos con el medio ambiente, junto con la reutilización del caucho reciclado en la infraestructura ferroviaria, justifican de sobremanera el interés que surge en el desarrollo del presente proyecto, tanto para las sociedades actuales como las futuras, considerando la época en vivimos donde los recursos cada vez son más escasos y la necesidad de cuidar el entorno en el que vivimos es vital.

Balasto.

Como hemos mencionado a lo largo del presente documento, las vías en balasto representan casi la totalidad de las vías existentes alrededor del mundo, por lo que cualquier mejora introducida en este ámbito puede alcanzar una repercusión considerable, por más pequeña que esta sea, debido a la gran cantidad de toneladas de piedra que se utilizan para la construcción de tendidos ferroviarios.

La intención de prolongar la vida útil de este material en la vía proviene de la necesidad de disminuir la extracción de rocas nuevas de cantera y de este modo minimizar la problemática de la escasez de materiales con características adecuadas para su uso como balasto en infraestructuras ferroviarias. A mayor durabilidad, menor necesidad de materiales y además el recubrimiento del balasto puede mejorar ciertas propiedades de algunos materiales que no pueden ser usados actualmente (básicamente balasto reciclado y áridos que no cumplen al 100% las especificaciones técnicas).

Poliuretano.

El empleo de poliuretanos sobre rocas es utilizado en la protección de costas con resultados muy buenos, por lo que su utilización dentro del mundo ferroviario es una alternativa de no menor interés.

La necesidad de contar con un elemento que garantice la unión del caucho con la piedra de manera eficaz y prolongada hacen vital la utilización el poliuretano. Este tipo de ligantes



permite, además de unir la piedra con el caucho, eliminar el problema de inflamabilidad que presenta el caucho por sí mismo y contribuir en el rozamiento entre piedras, dotando a la capa de balasto de una mayor resistencia y durabilidad.

6.4 VALIDACIÓN DEL PROYECTO

6.4.1. Ensayos de laboratorio.

En lo que respecta a los ensayos a realizarle a las partículas de balasto en laboratorio, las distintas administraciones coinciden en su mayoría en la realización de ensayos. Los más destacados en este sentido son:

- Ensayo de Los Ángeles
- Ensayo Deval
- Análisis petrográfico
- Resistencia al impacto
- Análisis de forma
- Resistencia a la erosión

Detallando la función de cada uno de estos ensayos se tiene:

Ensayo de Los Ángeles.

Este ensayo determina la resistencia a la rotura de la roca natural. Una muestra de unos 10 kg se introduce en un cilindro junto a varias bolas de acero. Este cilindro gira 1.000 veces sobre su eje a una velocidad de 33 rpm. Tras el ensayo la muestra es tamizada en una criba de 1,6 mm de malla. El valor de Los Ángeles se determina con:

$$CLA = \frac{m}{M} \times 100$$

Ec 11

Donde,

m: peso de la fracción tamizada

M: peso de la muestra

Cuanto más alto sea CLA, menos será la resistencia a la abrasión del material.

Ensayo Deval.

El ensayo Deval determina la resistencia al desgaste de materiales rocosos. Para determinar la resistencia a la abrasión, en SNCF y otras administraciones se introduce el balasto junto a bolas de acero y agua (ensayo Deval húmedo) en cilindros inclinados de 200 mm de diámetro. Tras 10.000 revoluciones se tamiza el contenido del cilindro y se analiza. La muestra analizada, con una granulación de 25/50 mm, debe pesar 7 kg tras su lavado y secado. Tras el ensayo, la muestra se tamiza con una criba de 1,6 mm.

El valor Deval se calcula mediante:

$$DH = \frac{2800}{m}$$

Ec 12

con m: peso de la fracción tamizada (g)



Análisis petrográfico.

El análisis petrográfico consiste en el pulido de la muestra para determinar su composición mineralógica (tipo, porcentaje en volumen y tamaño de las partículas). En las muestras de basalto se realiza un ensayo de cocción para comprobar la resistencia de quemaduras. A esto se añade el análisis de la estructura cristalina, de los poros y de las fisuras si hubiere.

Resistencia al impacto.

La resistencia al impacto consiste en medir la fragmentación de una muestra bajo cargas por impacto. La muestra a analizar estará seca y tendrá una granulación estándar (35,5-45 mm). La muestra se introduce en un recipiente cilíndrico y se la impacta con una masa estándar, de 50 kg, veinte veces desde una altura de 380 mm sobre la muestra. Luego se tamiza y se determina el porcentaje de trituración sobre el total.

Análisis de forma.

La forma de las partículas se determina mediante un calibre especial de modo que no superen una relación entre longitud y grosor de 1:3. Este análisis tiene por objetivo evitar las partículas lamosas dentro de la capa de balasto.

Resistencia a erosión.

La resistencia a la erosión del balasto se determina con un ensayo de cristalización por cocción en una solución salina. Igual de importante es el ensayo de absorción de agua. Mediante estos dos ensayos se comprueba la resistencia del balasto ante agresiones ambientales, climáticas o químicas.

La tabla 4.2 realiza una breve comparativa de las normativas utilizadas en España en la antigüedad y en la actualidad a modo de referencia para el presente proyecto.



ENSAYO	NORMATIVA ASOCIADA	
	ANTIGUA	ACTUAL
	N.R.V. 3-4-0.0: 1987 N.R.V. 3-4-0.2: 1996 P.R.V. 3-4-0.0: 1996	UNE-EN 13450: 2003 ORDEN FOM 1269: 2006
Toma de muestras	N.R.V. 3-4-0.2: 1996	UNE-EN 932-1 UNE-EN 13450 Anexo A y B
Granulometría	N.R.V. 3-4-0.2: 1996 Tamices de abertura circular. Serie: 80, 71, 63,45, 31,5, 25 y 20 mm.	UNE-EN 13450 ORDEN FOM 1269 UNE-EN 933-1 Tamices de abertura cuadrada. Serie: 80, 63, 50, 40, 31,5, y 22,4 mm.
Limpieza. Partículas finas	N.R.V. 3-4-0.2: 1996 Tamiz UNE de 0,63 mm.	UNE-EN 933-1 Tamiz UNE 0,5 mm. ORDEN FOM 1269
Limpieza. Polvo	N.R.V. 3-4-0.2: 1996 Tamiz UNE 0,063 mm.	UNE-EN 933-1 Tamiz UNE 0,063 mm. UNE-EN 13450 ORDEN FOM 1269
Forma de las Partículas. Índice de lajas	No se considera	UNE-EN 933-3
Forma de las Partículas. Índice de forma	N.R.V. 3-4-0.2:1996. Elementos aciculares y lajosos.Peine móvil	UNE-EN 933-4 Calibre Vernier ORDEN FOM 1269
Forma de las Partículas. Espesores mínimos	N.R.V. 3-4-0.2:1996	UNE-146147, Anejo b
Forma de las Partículas. Longitud máxima	Similitud con exigencia N.R.V. 3-4-0.2:1996 sobre dimensión máxima de elementos aciculares (80mm).	UNE-EN 13450 ORDEN FOM 1269
Composición. Homogeneidad	N.R.V. 3-4-0.2:1996 Inhomogeneos aquellos cuyo CLA essuperior al 20%.	ORDEN FOM 1269 Inhomogeneos los que su CLA supera el límite de su categoría
Composición. Petrográfica	No se considera	UNE- EN 932-3
Composición. Difracción -RX	No se considera	No se considera
Composición. Componentes perjudiciales	No se considera	UNE-EN 13450 ORDEN FOM 1269
Resistencia a la fragmentación. Método de los Ángeles	UNE 83-116-90 /NLT 149. Granulometría F (Tamices UNE 25-50mm.)	UNE- EN 1097-2 UNE-EN 13450 ANEJO C
Resistencia a la fragmentación. Método de Impacto	No se considera	UNE- EN 1097-2 UNE-EN 13450 ANEJO D
Resistencia al desgaste. Coeficiente Micro-Deval	No se considera	UNE- EN 1097-1 UNE-EN 13450 ANEJO E
Resistencia a la Meteorización. Densidad-Absorción de agua	UNE 83134	UNE- EN 1097-6
Resistencia a la Meteorización. Ensayo Hielo-Deshielo	No se considera	UNE-EN 1367-1 UNE-EN 13450 ANEJO F



Resistencia a la Meteorización. Ensayo Sulfato-Magnésico	UNE 7136 de acuerdo a las modificaciones de la P.R.V. 3-4-0.0	UNE-EN 1367-2 UNE-EN 13450 ANEJO G
Resistencia a la Meteorización. Sonnenbrand	No se considera	UNE-EN 1367-3
Resistencia a la Meteorización. Estudio Petrográfico	No se considera	UNE-EN 932-3
Resistencia a Compresión Simple (roca de origen)	UNE 22950-1:1990	No se considera
Resistencia a Carga puntual (roca de origen)	UNE 22950-5:1996	No se considera

Tabla 6.3 Normativa Española actual y antigua.

6.4.2 Ensayo in situ.

Dentro del proyecto presente, se destaca la aplicación piloto en una obra durante 7 meses con el objetivo de observar el comportamiento del mismo bajo cargas. Este período de aplicación se fijan los siguientes objetivos:

1. Puesta en obra del material en un tramo de vía.
2. Observación del comportamiento del mismo ante el paso de tráfico y cargas.
3. Establecer planning de observación a largo plazo.

Puesta en obra en tramo de prueba

-Para la selección del tramo de prueba se tendrá en cuenta alguna de las bases de mantenimiento de Adif. Se realizará una puesta en obra del balasto obtenido en las tareas anteriores.

- Se debe observar si existen variaciones en la puesta en obra de este material respecto al balasto tradicional. El manejo de este material debe disminuir las molestias por ruido que suele haber en la colocación del balasto tradicional.

También disminuye la generación de polvo.

Comportamiento del material in situ

- Se observará y ensayará el material in situ. Se le aplicarán cargas que simulen los tráficos y, los mantenimientos. En caso de no haber tráfico suficiente para obtener resultados, será necesaria la utilización de un estabilizador que los simule.

- Para poder observar y ensayar el comportamiento del material ante cualquier evento hay que comprobar la reacción en mantenimientos, cuando se utilizan perfiladoras y bateadoras.

Observación a largo plazo

- Para unos resultados más fiables puede establecerse un plazo de observación, esperando que las cargas, tráficos y condiciones climatológicas pasen realmente. Si esto se prolonga siempre puede completarse con los resultados observados en la subtarea anterior, simulando las cargas con un estabilizador.



6.4.3 Modelo de simulación.

Con el objetivo de contar con una herramienta de contraste de los resultados a obtener durante los ensayos, se empleará un modelo de simulación en Plaxis que intente describir el comportamiento de la estructura de vía, el cual, será calibrado a medida que se realicen los ensayos y se obtengan mediciones de campo, en el tramo experimental. La figura 6.2 representa un tipo de modelización de la capa de balasto mediante esferas de distinto tamaño.

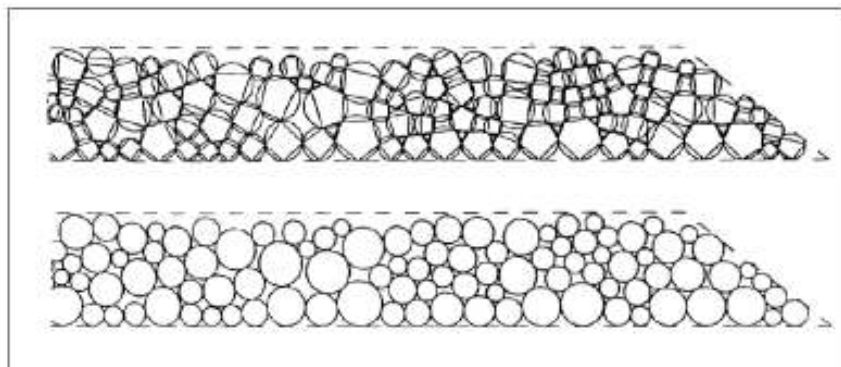


Figura 6.2 Modelización de la capa de balasto para análisis de simulación. (Fuente: A. López Pita)

6.5 MEJORAS INTRODUCIDAS POR NEOBALAST. DESARROLLO.

El proyecto de desarrollo que se presenta, busca dotar de mayores prestaciones al balasto. La fricción entre las diferentes partículas del balasto van desgastando sus caras perdiendo paulatinamente parte de las principales propiedades requeridas a la banqueta de balasto (principalmente la estabilidad lateral y asentamientos verticales), teniendo que proceder a acciones periódicas de bateo y en última instancia a su renovación parcial/total. Además la atrición del balasto natural durante su vida útil va contaminando también de finos la banqueta, haciendo que ésta pierda sus propiedades (Fig. 6.3). El objetivo principal del proyecto será tratar el balasto para conseguir mayor durabilidad y así, poder reducir los costes de explotación y mantenimiento, siendo esto aplicable a las líneas ferroviarias existentes y futuras.

Otro objetivo importante es dotar al balasto de mayores prestaciones, no sólo a nivel de durabilidad como en el punto anterior, sino a nivel de comportamiento frente a ruido y vibraciones. De todos es sabido la importancia que ha ido tomando este aspecto en las infraestructuras ferroviarias (al ir incrementando las velocidades máximas también se están generando mayores esfuerzos dinámicos que se traducen en mayor ruido y vibraciones) desarrollando elementos a incorporar en la sección de vía como mantas elastoméricas, suelas bajo traviesa, placas de asiento, etc. Al introducir en la mezcla-envoltorio del balasto partículas de caucho (provenientes de neumáticos reciclados), el comportamiento en este aspecto debe mejorar de forma ostensible, por lo que se espera poder reducir alguno de los elementos anteriormente citados.

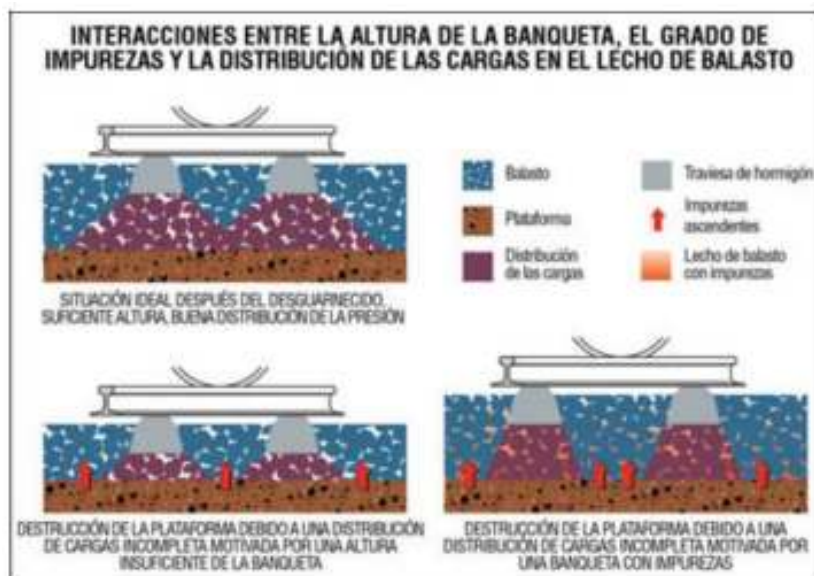


Figura 6.3 Distribución de cargas en el balasto en función de las impurezas. (Fuente: ALAF)

También se pretende mejorar la concienciación medioambiental, por lo que la búsqueda de materiales debe ir reduciendo el uso de canteras, se traduce en aprovechar y reutilizar todos aquellos recursos al alcance de la industria.

En España, ya se utilizan materiales reciclados como árido, sin embargo, el reaprovechamiento de los recursos es todavía escaso en nuestro país y deficiente en términos de calidad. Plan.

Entre los beneficios más importantes introducidos por neobalast se destacan:

- La disminución del ruido
- La posibilidad de corregir geoméricamente la vía mediante bateo
- La disminución de las vibraciones producidas por el paso de los trenes
- El menor deterioro del balasto y por consecuencia la mayor durabilidad de la vía
- El menor coste de mantenimiento
- La conservación de la permeabilidad de la capa de balasto para escurrir el agua de lluvia
- Un aumento considerable de la resistencia a cortante
- La posibilidad de reutilizar NFU contribuyendo al plan impulsado por el Ministerio de Medio Ambiente.
- La posible reutilización de balasto reciclado y de áridos de rechazo
- La disminución del vuelo de balasto y de los daños que este ocasiona
- Tiempo de curado

El proyecto de neobalast o balasto de altas prestaciones se encuentra a día de hoy en una fase de desarrollo inicial, por tanto, todo este conjunto de mejoras que se cree que puede proporcionar este nuevo material se encuentran todavía en una fase previa a la obtención de resultados específicos y concretos.

Por lo tanto, a continuación, pretendemos desde la presente tesina mostrar la justificación técnica o punto de partida para el trabajo de desarrollo de las diferentes virtudes que nos puede proporcionar dicho material, y que sirva de base de referencia para la obtención de resultados:



Disminución del ruido.

Para tener una idea del posible impacto que puede causar la utilización de NFU en su utilización sobre las vías en balasto, nos basaremos en el reciente uso del caucho para la construcción de firmes.

Su empleo en mezclas bituminosas ha permitido reducir el nivel sonoro de rodadura.

En distintos países europeos, así como en EEUU y Canadá, se ha medido un menor nivel sonoro con el empleo de mezclas con el betún caucho. Las reducciones observadas son del orden de 3 a 4 dB(A) respecto a las mezclas bituminosas convencionales. Las primeras medidas de sonoridad de la rodadura sobre superficies que contienen NFU realizadas en España están en línea con estas experiencias. Así, el CEDEX realizó medidas del ruido de rodadura en diversos tramos de una autopista mediante el método de proximidad (CPX). Los resultados obtenidos indican que la mezcla bituminosa fabricada con un ligante con NFU presenta reducciones de entre 2 dB ($v=50$ km/h) y 4 dB ($v=110$ km/h) respecto a una mezcla tradicional.

De este modo, se puede prever que el efecto del recubrimiento de las piedras con caucho triturado, podría tener un resultado muy positivo en lo que respecta al ruido que produce el paso de los trenes.

Esta mejora podría incluso evitar las obras de aislación sonoras necesarias en las poblaciones cercanas a las líneas de alta velocidad, donde el ruido que se produce con el paso de trenes excede los decibelios admisibles.

Corrección de geometría mediante bateo.

A diferencia de productos que generan una malla semirrígida entre el balasto y el riego de polímeros, el empleo del neobalast no condiciona la posibilidad de batear la vía para corregir los defectos geométricos que en esta se originan, ya que conserva la estructura del balasto tradicional en cuanto a que las piedras no se encuentran ligadas y por tanto no se impide la inmersión ni el movimiento de los bates.

El hecho de poder conservar el mantenimiento convencional de las vías, evita que se necesiten otras metodologías más costosas o la necesidad de cambiar por completo la sección afectada.

Disminución de las vibraciones.

Como se ha expuesto anteriormente, se ha demostrado que la influencia de las vibraciones en el asiento de la capa de balasto es determinante en líneas que presenten velocidades superiores a los 150 km/h.

El interés por acotar las vibraciones generadas en este tipo de líneas es creciente en estos días. Asimismo, la utilización del caucho como elemento para reducir las vibraciones en los distintos sectores es creciente, abarca desde pequeños elementos hasta maquinaria agrícola y de obras públicas.

La aplicación de placas de asiento elásticas, suelas bajo traviesa y mantas de caucho (Fig. 6.4) para reducir vibraciones han dado muy buenos resultados en las vías sobre balasto. La aplicación de estas mantas de caucho han llegado a reducir entre 15 dBV y 25 dBV (CDM) de las vibraciones existentes en las capas de balasto.

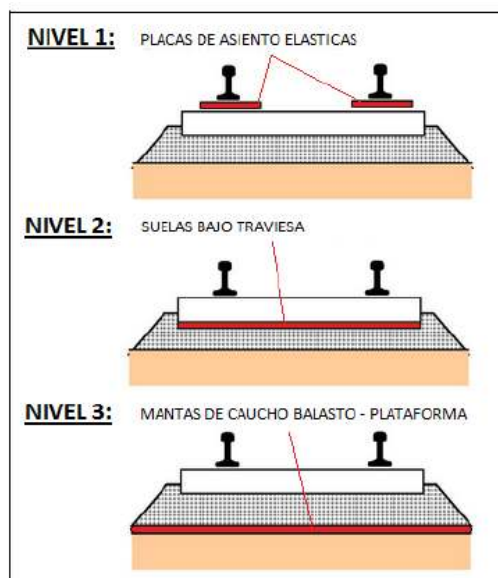


Figura 6.4 Elementos para reducción de vibraciones. (Fuente: KRRI)

Los buenos resultados obtenidos al emplear a los NFU como aislantes vibratorios ponen de manifiesto la importancia que puede llegar a tener la implantación del neobalast en los tendidos ferroviarios.

Menor deterioro del balasto y mayor durabilidad de la vía.

Analizando la generación de las irregularidades en la vía, recordando la ecuación propuesta por Sato, tenemos:

$$S = \alpha T^{-0.31} M^{1.1} L^{0.21} P^{0.26} V^{0.98}$$

Ec 13

La cual representa el aumento de irregularidades en la vía con el paso del tiempo (S) en función de: el tonelaje soportado por la vía (T), parámetro de la resistencia vertical de la vía (M), la continuidad de los carriles (L), la calidad de la infraestructura (P) y la velocidad de circulación (V).

El papel del balasto dentro de esta ecuación se ve reflejado en los parámetros que contemplan la resistencia vertical de la vía (M) y el que representa la calidad de la vía (P).

Si se realiza el ejercicio de comparación entre el balasto tradicional y el neobalast en lo que refiere a la generación de irregularidades en la vía, se deduce que la mejora en los parámetros M y P, introducida por el neobalast, se traducirá en una menor generación de irregularidades (S) y por lo tanto una mayor durabilidad de la vía.

Permeabilidad de la capa de balasto.

Analizando los antecedentes existentes de la utilización de poliuretano en el balasto, tal y como hemos visto en el capítulo anterior, produce que nos encontremos con un factor limitante en cuanto a la corrección de irregularidades en la vía mediante el bateo.

La formación de mallas de poliuretano y balasto impiden realizar bateos, por lo que al deteriorarse la vía se debía renovar la capa por completo.



La aplicación de neobalast en este sentido no presenta ningún tipo de limitaciones, ya que al momento de ser necesarias intervenciones en la vía, al no estar las partículas de balasto aglomeradas entre sí, y mantener la estructura original del balasto natural, es posible introducir los bates de la bateadora para recuperar la geometría que garantice una correcta circulación.

Aumento de capacidad portante de la capa.

Tomando como consideración el aumento del ángulo de fricción interno de la capa de balasto al implantar neobalast y el método basado en la carga de hundimiento de una zapata para considerar las tensiones admisibles de la capa de balasto, según se recomienda para las líneas de alta velocidad, se arriba a la conclusión de que las tensiones que podría soportar la capa serán mayores.

Esto se puede ver fácilmente analizando la siguiente expresión:

$$q_a = q_c / 3$$

$$q_c = 1,3 c N_c + \varphi D_\varphi N_q + 0,6 \varphi R N_\varphi$$

Ec 14

Siendo,

q_a : carga admisible

$D_\varphi = 0$ (Travesía sobre balasto)

$C = 0$ (cohesión nula)

R : Radio equivalente de la traviesa (para RS vale = 26 cm)

Por lo que la expresión queda como

Donde φ es el ángulo de fricción interna del balasto. Basándonos en los resultados obtenidos por otras tipologías de recubrimiento de balasto mediante poliuretano de aumento del ángulo de fricción interna a través de los ensayos realizados, se puede garantizar el aumento del ángulo de rozamiento en neobalast, ya que el recubrimiento aplicado a las piedras no será solo poliuretano, sino que contará con un agregado de caucho, el cual tiene un alto coeficiente de rozamiento.

Se observa entonces, que al aumentar el ángulo de fricción interna el valor de N_φ asciende lo que se traduce en un aumento de la resistencia de la capa.

Reutilización de NFU contribuyendo al plan impulsado por el Ministerio de Medio Ambiente.

Uno de los grandes logros, y sino el más importante, de neobalast radica en la contribución que tiene el presente proyecto en el plan impulsado por el Ministerio de Medio Ambiente de reutilización de neumáticos fuera de uso.

La posibilidad de incorporar caucho triturado dentro de la infraestructura ferroviaria presenta un gran atractivo considerando los kilómetros de vía en balasto existentes en el mundo y la posibilidad de utilizar una menor cantidad de piedra de cantera. Para tener una noción aproximada del ahorro de piedra por kilómetro se cita el siguiente razonamiento:

Suponiendo que el tamaño medio de los granos de balasto se sitúa en torno a los 50 mm, y que las partículas no tienen geometría plana, sino mas bien volumétrica, se asemeja a los granos a una esfera de diámetro 50mm para la piedra convencional y una esfera de 51 mm para la piedra recubierta de caucho.



Calculando los volúmenes de ambas se obtiene:

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 = 65,45 \text{ cm}^3 \quad V_{NB} = \frac{4}{3} \pi r_{NB}^3 = 69,45 \text{ cm}^3$$

Ec 15

De lo que se puede deducir que el volumen antes ocupado por un grano de balasto se incrementará en un 6% al recubrirlo de caucho y la porosidad de la capa no variará dado que la forma de las partículas no se modifica sino que se escala.

Por consiguiente, de las 264.000 toneladas de balasto que tiene previsto ADIF utilizar para mantenimiento en el año 2013-2014, se podrían ahorrar en torno a las 16.000 toneladas que se verían reemplazadas por el caucho que rodea la piedra. Siendo que la inversión en este caso sería de 6,5 millones de euros, el ahorro posible sería aproximadamente de 400.000 €.

Una medida de esta índole tiene un doble impacto positivo a nivel ambiental: por un lado atenúa la extracción de roca de cantera, lo que es altamente positivo en términos de daños hacia el medio, y por el otro reutiliza un residuo que hoy en día se encuentra en gran parte en vertederos generando contaminación.

Reutilización de balasto reciclado y de áridos de rechazo.

La mejora citada de las propiedades resistentes de la capa de balasto con la implantación de neobalast, hacen pensar en la posibilidad de mejorar las condiciones del balasto reciclado y de este modo permitir la reutilización de materiales que hoy en día no cumplen el 100% de las especificaciones técnicas.

Disminución del vuelo de balasto y de los daños que este ocasiona.

En la actualidad, el vuelo de balasto es uno de los graves problemas con el que se enfrentan las líneas de alta velocidad. El paso de trenes a velocidades superiores a los 300 km/h produce el levantamiento de las piedras superficiales que componen el balasto causando daños en la infraestructura (Fig. 6.5).



Figura 6.5 Vuelo de balasto



Se han realizado pruebas con el tren ICE-3 de Siemens de la DB en Bélgica y Francia sobre este problema. Los resultados obtenidos han sido: abollamiento de ejes y de dispositivos de frenos en el material rodante, y deterioro del carril y de aparatos de vía en lo que respecta a la infraestructura. Todo esto ha llevado a limitar la velocidad del ICE-3 a 250 km/h en unidades simples y a 230 km/h en doble tracción. En España, se ha comprobado en ensayos dinámicos de alta velocidad realizados con los trenes de la serie 102 (TALGO-Bombardier) a velocidades superiores a 280 Km/h y específicamente por encima de los 300/320 km/h también se ha comprobado que se produce levantamiento de balasto.

Con la aplicación de neobalast en las infraestructuras ferroviarias, el daño que se produciría sería sin dudas menor, dado que el recubrimiento de caucho sobre la piedra amortiguaría los impactos y, de esta manera, disminuirá el deterioro que hoy día se produce por causa del vuelo de balasto.

Asimismo el mayor ángulo de rozamiento adquirido por la capa de balasto haría más difícil el desprendimiento de partículas de la capa por causa del flujo de aire que produce el paso de trenes a altas velocidades. Esto se debe al mayor rozamiento que existe entre partículas de caucho, con coeficiente de rozamiento estático (μ_e) en torno a 1, frente al rozamiento del balasto tradicional, que tiene un coeficiente de rozamiento estático (μ_e) cercano a 0,3.

Rápido tiempo de curado.

La aplicación de poliuretanos sobre el balasto presenta un inconveniente y es el tiempo de curado necesario para adquirir buenas resistencias en la capa. En los ensayos realizados por Dersch, se ha establecido un tiempo de curado del producto de 14 días, momento en el que la capa adquiriría una resistencia aceptable. Dado que el tiempo es una de las variables que más costes genera dentro del mundo de la construcción, un largo tiempo de curado se traduce en un mayor coste.

En las primeras muestras realizadas de neobalast se han tomado los tiempos de curado que se requieren para obtener el producto final. El tiempo de curado es de 6 horas a 23°C lo que sitúa al tiempo de curado del neobalast unas 50 veces más rápido que otros productos. De esta manera se podría realizar el recubrimiento de las partículas el mismo día de empleo de construcción de las líneas, lo que evitaría costes de almacenaje innecesarios.

Menores costes de mantenimiento y ambientales.

Como se ha mencionado a lo largo del capítulo 2, el deterioro del balasto se traduce en operaciones de mantenimiento necesarias para restablecer la calidad geométrica de la vía. Estas operaciones significan para el ferrocarril un coste significativo que podría atenuarse. Con los beneficios descritos a lo largo del éste apartado, que aporta neobalast, existe una reducción de costes de mantenimiento y ambientales notables. Los factores que mayor incidencia tienen en esta reducción de costes son:

- La mayor durabilidad de la capa de balasto
- El ahorro que se genera en cantera al reducir la extracción de roca,
- Los menores daños producidos por el vuelo de balasto
- La utilización de los neumáticos fuera de uso (NFU)

Entre otros beneficios aportados se destacan la reducción de ruido, el cual implica costosas obras de protección sonoras en las zonas urbanas, y la atenuación de las vibraciones, que frecuentemente conlleva la necesidad de incorporar mantas de caucho lo que encarece la construcción de los tendidos notablemente.



CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

7.1 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Tras varias décadas donde las inversiones en infraestructuras viarias predominaban sobre las ferroviarias, la creciente conciencia ambiental de la sociedad ha propiciado un cambio de dirección hacia el ferrocarril. Así lo demuestran las nuevas directrices europeas en materia de transporte, que presentan el ferrocarril como uno de los medios de transporte más sostenibles y, por tanto, con más futuro.

Aparte de la vía en placa, no existe en el mercado una alternativa a la vía en balasto. La tipología de la vía sobre balasto existe desde los inicios del mundo del ferrocarril, sin embargo su nivel de evolución ha sido muy reducido. Cualquier innovación que se consiga, su impacto será muy importante por los miles de kilómetros de vía en esta tipología en todo el mundo.

Su futuro mantenimiento genera cada vez más un problema tanto a nivel económico como de materiales cuando se trata de reponer el material desgastado. También el balasto desguarnecido, cuando se renueva una vía, supone miles de toneladas de material inerte que deben llevarse a vertederos o reutilizarse.



Con las líneas de investigación aquí presentadas se busca ampliar las prestaciones del balasto y de otros materiales sustitutorios que cumplan los requisitos para funcionar en la capa de balasto de las líneas ferroviarias, y que en su obtención y utilización se minimice el impacto ambiental.

La flexibilidad de la capa de balasto y su capacidad de amortiguamiento hacen que el balasto sea la tipología más adecuada para la reducción del ruido y de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario.

La alternativa de la vía en placa supone pasar de un material granular (balasto) a otro monolítico de hormigón (prefabricado o realizado in-situ) y renunciar por lo tanto a las ventajas del balasto citadas en el párrafo anterior, consiguiendo como alternativa unos menores costes de mantenimiento.

Los métodos aquí propuestos representan por lo tanto una solución alternativa, que a nivel prestacional se situaría entre la vía con balasto natural y la vía en placa, incorporando las cualidades del balasto y mejorando las prestaciones en cuanto a durabilidad, resistencia y del comportamiento frente a ruidos y vibraciones.

El objetivo del proyecto “neobalast”, es desarrollar un balasto de altas prestaciones mediante un nuevo tratamiento superficial (recubrimiento formado por un aglomerante más partículas de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso-NFU). Por un lado balasto, ya sea natural, artificial, o reciclado (procedente de desguarnecidos de vía), o bien áridos de rechazo en canteras.

Entre las mejoras que se buscan está alargar la vida útil del balasto, mejorar prestaciones antivibratorias, reducir impacto ambiental por uso de material procedente de canteras, etc.

El fin es producir un balasto ferroviario de características controladas y prestaciones mejoradas respecto del balasto de origen natural usado en la actualidad.

Este proyecto es complementario a los que hemos comentado a lo largo de la tesina pues añade otros tipos de ventajas y propiedades:

- La principal ventaja es conseguir el alargamiento de la vida útil del balasto.
- También se pretende mejorar las prestaciones antivibratorias y antirruído, por lo que se podría reducir considerablemente el uso de mantas elastoméricas o suelas en bases de traviesas, etc.
- También sería beneficiosa la reducción de costes en explotación de canteras, transporte de material y apertura de vertederos.
- Reciclado de balasto: se aprovecha balasto que no cumple granulometría; se le da un nuevo uso; antes podía reaprovecharse sólo como árido para plataformas o rellenos.
- Nuevo uso de NFU en capas de balasto. En otros estudios y proyectos se ha utilizado en capas de subbalasto u otros firmes.
- La solución propuesta sería totalmente compatible con las diferentes alternativas de balasto prefabricado, aumentando sus prestaciones y mejorando uno de los puntos débiles como es la resistencia superficial.

Para el desarrollo de este nuevo material, se ha tomado una base científica técnica y teórica lo suficientemente sólida como para creer en la buena dirección tomada por el proyecto.

La experiencia obtenida con los otros trabajos e investigaciones descritos en la presente tesina, nos debe servir como ejemplo para avanzar en el conocimiento y en las limitaciones



de nuestro material, y por lo tanto en las oportunidades de mejora en su conocimiento y caracterización.

Así, las próximas líneas de investigación asociadas al neobalast deben encaminarse hacia los siguientes puntos:

-Determinar la metodología que permita la elaboración de un balasto de altas prestaciones tratando balasto de origen natural o artificial, balasto reutilizado o árido de rechazo.

-Establecer la metodología que permita la utilización de neumáticos fuera de uso con ligantes de distintas calidades y tipologías, para la obtención de materiales con características aptas y de altas prestaciones para su uso en capas de balasto de plataformas ferroviarias.

-Determinar las propiedades físicas y mecánicas del árido utilizado y de su recubrimiento con ligante y partículas de neumáticos fuera de uso para su uso como balasto.

-Valorar el impacto ambiental por reducir el uso de material procedente de cantera de cantera y por reciclar materiales como los NFUs.

-Desarrollo del ligante óptimo para el recubrimiento que llevará a conseguir un balasto de altas prestaciones.

-Optimización de los procesos para obtener las diferentes mezclas que mejoren las prestaciones del balasto.

-Adaptación de los procesos de fabricación al producto óptimo creado.

-Investigación y estudio de adición a las partículas de NFUs y al balasto y, ensayos sobre los mismos para optimizar el producto y mejorar las prestaciones globales.

-Avances en el conocimiento del balasto y su comportamiento conjunto en la banqueta.

-Desarrollo de nuevas tipologías estructurales.

-Desarrollo de metodología de fabricación y aplicación del balasto de altas prestaciones.

-Estudio e identificación de metodologías para la introducción de las escorias dentro de la cadena de producción para la fabricación de capas granulares para los usos establecidos en la capa de forma y el subbalasto.

-Prueba piloto en obra del balasto de altas prestaciones y validación.

-Verificación –con sucesivas adaptaciones- de la idoneidad del neobalast para líneas de Alta y Muy Alta Velocidad.

Las incertidumbres propias de los procesos de investigación como el que nos ocupa, no se podrán superar de forma completa a menos que se ejecute un proyecto piloto que permita la fabricación y experimentación real o mediante simulación, que nos permita analizar las características y el comportamiento del producto final, comparándolas con las prescripciones técnicas de ADIF. Para ello, tanto la administración correspondiente como



las empresas del sector se han comprometido a unir esfuerzos para el cumplimiento de este objetivo.

Podemos concluir así que el proyecto “neobalast” mostrado en la presente tesina es una muestra más de la tendencia tomada dentro del ámbito del ferrocarril, basada en la búsqueda y mejora de la infraestructura ferroviaria en virtud de un desarrollo técnico y económico sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Desarrollo recién iniciado, pero con mucho camino por recorrer para alcanzar el objetivo marcado.



CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



BIBLIOGRAFÍA

- ALIAS, J. y VALDES, A. (1990). La vía del ferrocarril. Editorial Bellisco.
- ARREGI, X. (2010). Estudio técnico, económico y financiero de viabilidad de una planta de áridos en la mancomunidad de Urola Medio, Guipúzcoa. EPSEB-UPC, 2010.
- BARRON, I. (2007). Vías con y sin balasto. ¿Opciones alternativas o complementarias?. I Jornadas Internacionales sobre Nuevas Tecnologías y técnicas constructivas en el sector ferroviario. Bilbao. Enero.
- BERGADA, M. (2010). La transició de via en balast a via en placa. Tesina ETSECCPB-UPC, 2010.
- BERGHAUS, E. (1964). Historia del ferrocarril. Ediciones Zeus, Barcelona.
- CARRIL (1992). "Alta Velocidad Española". Revista Carril nº 38, 3-55.
- CASAS, C. et al. (2004). Importancia en el deterioro de la vía de las líneas de alta velocidad de las vibraciones inducidas en la capa de balasto. VI Congreso de Ingeniería del Transporte. Zaragoza, 141-146, ISBN 84-609-1360-0.
- COMSA. (2012). Nuevo balasto de altas prestaciones con árido reciclado y tratamiento superficial con residuos valorizados. Proyecto Neobalast. (<http://www.comsaemte.com/>)
- CRUZ ABAD, J. (2009). Superestructura de vía. Seminario de FFCC de Alta Velocidad. <http://www.iir.es/>
- DÍAZ DE VILLEGAS, J.M.G. (2001). Ferrocarriles. Apuntes de clase. Universidad de Cantabria.
- ECHEVERRI, A. (2001). Apuntes sobre alta velocidad ferroviaria.
- EISENMANN, J. (1977). Adaptación de la vía sobre balasto a altas velocidades. Simposio sobre Dinámica Ferroviaria, AIT, 125-141.
- EISENMANN, J. (1995). La vía sobre losa, una alternativa a la vía clásica sobre balasto. (Traducción española de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, del original alemán).
- FCH.,UPM., INGENCIBER., OFICEMEN/IECA., FFE. (2012). Proyecto balasto artificial. (<http://www.balastoartificial.com/>)
- FONSECA TEIXEIRA, P. (2003). Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de las vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical. Tesis Doctoral ETSECCPB-UPC, 2003.
- FORTIN, J.P. (1982). La déformée dynamique de la voie. Revue Generale des Chemins de Fer, Février, 93-102.
- GAYON, F et al. (1998). 150 años de infraestructura ferroviaria. Mantenimiento de Infraestructura de RENFE. Fundación de los Ferrocarriles españoles. ISBN 84-88675-57-7.



HUNT, G.A. (2000). Eurobalt optimizes ballasted track. Railway Gazette Internacional. December, 813-816.

INECO-TYFSA. (2003). Foro del Ferrocarril y del Transporte. Seminario "Via. Instalación y Mantenimiento", (Junio de 2003).

KRUSE, H. et al. (2001). Tratamiento del balasto como un sistema de cuerpos múltiples con ligaduras variables. Eisenbahingenieur, 2/2001, 30-34. (Traducción española TE 6570/01).

LICHTBERGER, B. (2002). Dynamic stabilization keeps geometry in shape. Railway gazette Internacional. July, 374-377.

LICHTBERGER, B. (2007). Manual de vía, Eurailpress, ISBN 978-3-7771-0362-4.

LÓPEZ PITA, A. (1976). Un nuevo método para la determinación del espesor de balasto. Revista AIT. Diciembre, 77-89

LÓPEZ PITA, A. (1976). El coeficiente de balasto y su aplicación al estudio de la mecánica de una vía férrea. Revista AIT nº 12. Agosto, 67-77.

LÓPEZ PITA, A. (1978). El diseño integral del sistema balasto-plataforma (catálogo de secciones estructurales). Revista AIT, nº 23, 8-24.

LÓPEZ PITA, A. (1984). Calidad, conservación y renovación de vía, Curso de Ferrocarriles. Tomo I. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

LÓPEZ PITA, A. (1988). El desarrollo de nuevas infraestructuras en el ferrocarril. SEOPAN, 181 págs.

LÓPEZ PITA, A. (1994). El ferrocarril en el sistema de transporte español. Cemafe, 218 págs.

LÓPEZ PITA, A. (2001). La rigidez vertical de la vía y el deterioro de las líneas de alta velocidad. Revista de Obras Públicas, 3415, 7-26.

LÓPEZ PITA, A. (2006). Infraestructuras ferroviarias. Edicions UPC.

LÓPEZ PITA, A. (2008). Explotación de líneas de ferrocarril. Edicions UPC.

LORENZO, R. (2010). Vía en placa: proceso constructivo en entornos metropolitanos. Tesina ETSECCPB-UPC, 2010.

LOSADA, M. (1987). Curso de Ferrocarriles. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

LOZANO, P. (2004). El libro del tren. Oberon Vía Libre, ISBN 84-96052-84-2

MELIS, M. (2006). Terraplenes y balasto en alta velocidad ferroviaria Revista de Obras Públicas, Marzo, nº 3.464,7-36.



MINISTERIO DE FOMENTO (1999). Recomendaciones para el proyecto de plataformas ferroviarias. ISBN 84-498-0411-6.

OLIVEROS, F. et al. (1977). Tratado de Ferrocarriles I. Vía. Editorial Rueda. ISBN 84-7207.005-0.

PUEBLA, J. y GILABERT, M. (1999). LA vía sobre balasto y su comportamiento elástico. III Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. Barcelona, 811-817. ISBN 84-605-9799-7.

RENFE (1982). Infraestructura de alta velocidad española. Gestion de Infraestructura.

RENFE (2000). Mantenimiento de Infraestructuras. UN de mantenimiento.

RIESSBERGER, K. (2002). Vía más sólida sobre balasto. Eisenbahn Technische Rundschau, Vol.51 , 183-192.

ROMERO, F. (2010). Análisis de una vía con traviesas cuadro. Tesina ETSECCPB-UPC, 2010.

SATO, Y. (1998). Theoretical Analyses on Vibration of Ballasted Track. Quaterly Report, vol.29, nº 1, 30-32.

VEIT, P. (2002). Strategies de maintenance de la voie. Rail Internacional. Juin, 2-10.