

Planteamiento de una nueva metodología para el estudio del mecanismo de deterioro de la capa de balasto bajo la acción de las cargas del tráfico ferroviario (*)

Por ANDRES LOPEZ PITA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

JOAN-MANUEL ESTRADA PANADES

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Se analiza la influencia de una serie de parámetros en el deterioro de la geometría de la vía. Se estudia la respuesta del balasto mediante la aplicación de una metodología mecánico-numérica basada en su carácter de medio discreto. El modelo propuesto profundiza en el conocimiento del fenómeno de ruptura de la Ley asiento-tráfico y de la rotura de las partículas granulares de la capa de balasto.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de aumentar la velocidad comercial del transporte ferroviario que demanda la sociedad actual, exige una profundización y mejora de los conocimientos sobre el comportamiento de la vía ante esa nueva situación; en especial en relación al fenómeno de degradación de la calidad de la vía por efecto del tráfico.

El concepto de calidad geométrica de una vía va ligado directamente al concepto de tolerancia. Es preciso ante ese incremento de velocidad mejorar el índice de calidad de la vía y en consecuencia, reducir las tolerancias de los parámetros que definen esa calidad.

La aceptación de esas tolerancias en la geometría de la vía, es lo mismo que decir que de modo irremediable existen defectos que determinan directamente el estado de esa vía y su comportamiento durante su explotación comercial. Los índices de calidad que se aplican por las distintas Administraciones ferroviarias, incluyen en sus formulaciones varios parámetros de detección de la degradación de la geometría de la vía. De todos esos parámetros, el presente desarrollo se ceñirá sólo al parámetro de nivelación longitudinal.

Todos los estudios realizados en el campo de la evolución de la calidad de la vía con el tráfico,

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de julio de 1990.

tratan en lo posible de prever y determinar los ciclos de actuación de los trabajos de mantenimiento, necesarios para conservar esos niveles de calidad lo más próximos posibles al inicial.

En relación al parámetro de nivelación longitudinal o asiento, las distintas Administraciones ferroviarias han realizado diferentes planes experimentales para analizar su evolución. Asimismo, diferentes autores (J.J. López Pita, 1976) han planteado análisis teóricos sobre la evolución de ese parámetro, partiendo de las experimentaciones existentes. De las mismas, ha podido comprobarse la existencia de una relación entre el asiento permanente de la vía y el tráfico soportado (dependencia logarítmica).

Sin embargo, la determinación de los momentos de actuación de mantenimiento relacionados con la calidad geométrica, a partir de la generalización de las formulaciones anteriores, no resulta en principio inmediata. La realidad detectada es bastante compleja.

Las diferentes condiciones de montaje y de compactación del balasto, las variaciones de compacidad en la capa de balasto y en la plataforma, el espesor de la capa de balasto, la rotura de partículas granulares, la contaminación de la plataforma y del balasto, y en una palabra, la heterogeneidad resistente de la vía detectada en los ensayos experimentales, ha puesto de manifiesto la importancia cuantitativa y cualitativa de tal complejidad.

En este sentido (López Pita, 1976) reprodujo

en el laboratorio la realidad detectada por algunas Administraciones Ferroviarias (Checa y Polaca) de la existencia de un fenómeno de «ruptura» en la ley asiento-tráfico (fig. 1). Este fenómeno de ruptura es un caso singular que tiene una gran importancia a la hora de definir el mantenimiento de una línea férrea, y por lo tanto, los costes de ese mantenimiento.

Para analizar las causas que pueden originar este fenómeno de ruptura, se hace necesario estudiar la posible incidencia de los distintos elementos que forman el entramado de la vía en su aparición: carril, pequeño material o sujeción traviesa, balasto y plataforma.

Del análisis pormenorizado de cada uno de esos elementos, se deduce que es el balasto el que más puede influir en el desencadenamiento de ese fenómeno. Los demás elementos quedan muy delimitados en sus propiedades y características, por las distintas prescripciones y catálogos estructurales de definición actuales. Además, esta hipótesis está avalada por el hecho de que el nivel de tensiones que llega a las partículas de balasto está muy cercano, en muchos casos, al de rotura del material granular (López Pita, 1982).

En base a lo anterior, el objetivo básico del presente trabajo ha sido el profundizar en el conocimiento de determinación de los parámetros que pueden originar el mencionado fenómeno de ruptura de la ley general asiento-tráfico, teniendo en cuenta para ello de forma esencial, la heterogeneidad que presenta la capa de balasto en la realidad de la vía, heterogeneidad tanto

geométrica como resistente, y la rotura de las partículas granulares que forman la capa de balasto.

El carácter innovador del presente trabajo se basa, más que en el propio tema objeto de estudio, en el planteamiento u óptica del mismo. Las metodologías de resolución empleadas hasta el momento en el ámbito de la investigación ferroviaria, aplican al sistema balasto-plataforma las teorías del continuo, adaptando las características y propiedades del mismo al sistema objeto de estudio. En el presente trabajo, se ha aplicado una metodología basada en la mecánica de los medios discretos o granulares, que reproduce el sistema real de forma más aproximada.

Para ello, se ha partido de una revisión de todo el estado actual de conocimientos sobre las características del balasto en cuanto a sus propiedades, la mecánica general de los medios granulares en sus características geométricas particulares y en el comportamiento del contacto entre partículas discretas, las leyes de tensión-deformación en el contacto, las características de los medios granulares frente a rotura, y las sollicitaciones que actúan en el balasto debidas al tráfico ferroviario.

2. DETERMINACION DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA BALASTO-PLATAFORMA BAJO LA ACCION DE LAS CARGAS QUE LE TRANSMITEN LAS TRAVIESAS

2.1. Leyes de tensiones en el interior de la capa de balasto. Análisis de la rotura de las partículas granulares

Uno de los problemas fundamentales a resolver, para poder evaluar la influencia de los factores que provocan la aparición del fenómeno de ruptura, es la determinación de la forma de propagación en el interior del balasto de las tensiones que le transmiten las traviesas.

En este sentido todas las metodologías seguidas hasta ahora, se han basado inicialmente en formulaciones empíricas o cuasi-empíricas. Sólo a partir de los años sesenta se empezaron a desarrollar formulaciones teóricas, que asimilaban el medio granular (balasto) como un medio, cuyo comportamiento se rige por las leyes de la mecánica del continuo.

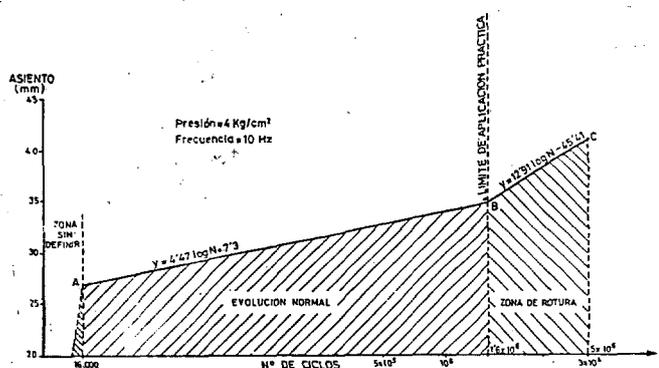


Fig. 1. Fenómeno de ruptura en la ley asiento-tráfico. Evolución del asiento de la capa de balasto bajo carga dinámica en laboratorio.

En el primer período, fueron las investigaciones realizadas por Talbot (1920) las primeras en tratar de determinar la forma de trabajo de los materiales granulares. Siguiendo esa línea de investigación, Milosevic (1971) suponía que la presión en cada punto de la traviesa se transmite en el interior del balasto en forma de un cono de distribución, cuyas generatrices son hipérbolas.

Dadas las limitaciones de esta línea de investigación en la obtención de resultados, a mediados de los años sesenta se empezaron a aplicar las teorías elásticas. La hipótesis fundamental de este método se basaba en suponer que el sistema balasto-plataforma es un semi-espacio indefinido de Boussinesq. La aplicación de esta teoría presentaba ciertas limitaciones para evaluar el estado tensional existente en el sistema balasto-plataforma. Para solucionar este problema el profesor Eisenmann (1969, 1974) propuso la adopción de un sistema bi o tricapa para el conjunto balasto-plataforma, e introdujo la formulación de Heukelom, ampliamente usada en el ámbito de la carretera.

A pesar de ello, esta metodología reproduce con dificultad la compleja realidad del sistema. Así, si se considera la sección transversal de una capa de balasto en la vía, se aprecia la presencia de tres zonas claramente diferenciadas, con valores de módulos de elasticidad diferentes, como mostraba Cabos (1977) (López Pita, 1981) (fig. 2). Esta propiedad limitaba la aplicación de las teorías elásticas, por lo que resultaba necesaria la utilización de nuevas metodologías.

En este sentido, López Pita y Oteo (1977)

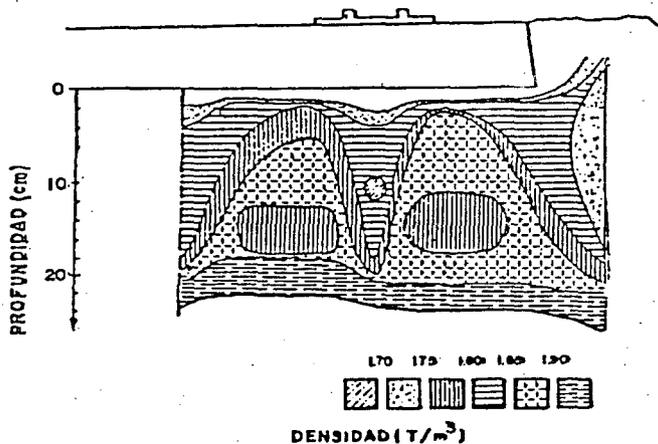


Fig. 2. Distribución del grado de compactación del balasto bajo las traviesas.

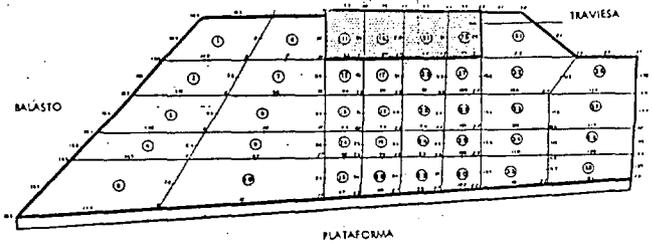


Fig. 3. Análisis de la deformabilidad de la vía por elementos finitos.

aplicaron por primera vez en la investigación ferroviaria, el método de los elementos finitos al sistema balasto-plataforma. Efectuaron una discretización de la sección transversal de la forma indicada en la figura 3, y asignaron valores del módulo de elasticidad variables a cada una de las zonas detectadas por Cabos. Esta misma línea de investigación ha sido seguida por otros autores, como Yang y cols. (1984), siendo de aplicación en la actualidad.

La aplicación del método de los elementos finitos ha permitido por primera vez, estudiar el comportamiento aleatorio del balasto y su incidencia en el deterioro de la calidad de la vía férrea (Alonso y López Pita, 1980), introduciendo para ello un tratamiento estadístico de los resultados obtenidos por ese método. Esta metodología permite estudiar el carácter aleatorio del módulo de deformación del balasto, pudiendo incluso analizar la influencia de la diferente elasticidad de las traviesas. El programa generaba al azar los módulos de elasticidad de cada elemento, en que se discretizaba el sistema traviesa-balasto-plataforma.

Si la determinación de las leyes de tensiones en el interior de la capa de balasto resulta muy difícil, con la aplicación de las metodologías aplicadas hasta el momento en la investigación ferroviaria, más complejo es aún el análisis de la rotura de las partículas granulares que la forman. Los resultados obtenidos de las investigaciones efectuadas por Schubert (1978) sobre la influencia de la rotura de las puntas de las partículas en el asiento de la capa de balasto, o de la aplicación de la teoría del semi-espacio de Boussinesq utilizando el plano de Mohr-Coulomb como criterio de rotura, no permiten reproducir la compleja realidad de la progresiva modificación que en sus características experimenta la capa de balasto (relleno de los huecos existentes por el material fino procedente de esa rotura, por ejemplo).

2.2. Análisis crítico de las metodologías aplicadas en la investigación ferroviaria

El balasto es un medio granular compuesto por partículas distintas geométricamente que se movilizan independientemente unas de otras, e interaccionan sólo en los puntos de contacto. Ofrece por ello, tanto en sus características como en su comportamiento, un carácter discreto como medio, presentado una compleja respuesta bajo condiciones de carga y descarga.

Los planteamientos desarrollados hasta el presente en la investigación ferroviaria, analíticos o teóricos y experimentales, han ido dirigidos a establecer leyes constitutivas del medio discreto en términos de parámetros del continuo, como tensiones, deformaciones o relación de vacíos. Esos valores de los parámetros del continuo no existen en cada punto porque el medio es discreto, por lo que deben considerarse valores ficticios.

En muchos casos, las tensiones y deformaciones (ficticias) interiores a la capa granular estudiada se deducen de las medidas de las cargas y desplazamientos del contorno. Sin embargo, dado que en general el comportamiento discontinuo y no homogéneo se presenta en su interior, sin que este fenómeno se manifieste en el contorno, estas metodologías no pueden detectar el modo de comportamiento integral del medio granular-balasto.

El desarrollo de una metodología numérica que considere en su formulación el carácter discreto del medio balasto, permite acometer el estudio del comportamiento del medio granular, teniendo en cuenta las discontinuidades interiores del mismo. Para ello, debe considerar el medio balasto como un conjunto de elementos individuales en contacto, planteando el problema bajo la óptica de una microestructura real. Así, se evita el tener que simular el medio discreto como un medio continuo representativo, de propiedades y comportamientos idénticos.

Un planteamiento basado en estos principios permite una aproximación al medio real y el estudio de aspectos difícilmente alcanzables hasta este momento desde un punto de vista teórico, como heterogeneidad, aleatoriedad, porosidad, contaminación y rotura intergranular.

Este artículo plantea este nuevo enfoque, y desarrolla una metodología basada en el mismo.

3. APLICACION DE UN MODELO DISCRETO PARA REPRODUCIR EL COMPORTAMIENTO DEL BALASTO. ANALISIS NUMERICO

El análisis desarrollado se puede subdividir en dos partes. En primer lugar, se ha diseñado un modelo de generación aleatoria de la capa de balasto, mediante la colocación de partículas granulares en contacto y siguiendo una curva granulométrica al azar de un huso granulométrico tipo. De este modo se han ido simulando banquetas de balasto de distintos espesores, de los que se han estudiado una serie de parámetros de identificación como medio granular y discreto. El más importante de ellos ha sido el de la porosidad.

A continuación, se ha desarrollado un modelo mecánico-numérico para estudiar la respuesta de la capa de balasto bajo un proceso de carga. Para ello, se ha aplicado el método de los elementos discretos (D.E.M.) adaptado a las condiciones de contorno específicas, y al cual se ha introducido un criterio de rotura de las partículas granulares. Se ha estudiado la influencia que determinados factores ejercen en la respuesta tenso-deformacional del sistema, y en el porcentaje de rotura de partículas de un balasto de tipo calizo o silíceo, según el caso.

3.1. Generación aleatoria de la capa de balasto

La generación aleatoria de la capa de balasto se ha aplicado para una banqueta de balasto de dimensiones estándar (sección trapezoidal de 4.750 x 4.000 x 300 mm.), apoyando sobre ella una traviesa bibloque. La plataforma se ha considerado horizontal y la banqueta simétrica. El esquema seguido se ha desarrollado desde un punto de vista bidimensional.

Se han simulado las partículas granulares reales por dos tipos de elementos: esféricos y angulosos. El caso real estaría comprendido entre esas dos variantes, más próximo a la simulación de las partículas angulosas.

Se han despreciado los posibles fenómenos de inercia, fuerzas de masa, de atracción y de repulsión en la colocación de las partículas. Se ha aplicado un modelo de decantación física, en el que una nueva partícula no afecta a la posición de las anteriores.

El huso granulométrico empleado en el des-

arrollo, se ha definido a partir del huso granulométrico exigido en la normativa de RENFE (N.R.V. 3-4-0.0., 1987). Del mismo, se han ido escogiendo curvas granulométricas al azar, incluidas en el intervalo de valores fijados por aquel. Dado que en la práctica se aplican curvas granulométricas por peso, para su aplicación en el desarrollo de generación aleatoria, ha sido necesaria su conversión a curvas granulométricas por número de partículas.

Para una serie de tamices superpuestos, el análisis granulométrico conduce a obtener una curva de distribución de tamaños $-F_p(D)$, pudiéndose representar también por su derivada, como $f_p(D) \cdot dD$. En el modelo planteado, estas funciones han tenido que sustituirse por una función equivalente $-F_d(D)$ y su derivada $-f_d(D) \cdot dD$. Para materiales granulares compuestos por partículas esféricas con el mismo peso específico, es decir todas ellas procedentes de la misma roca madre, la relación entre esas funciones estadísticas viene definida por (Estradé, 1989):

$$f_p(D) = \frac{f_p(D)}{D^3 \cdot \int_{D_{min}}^{D_{max}} (1/D^3) \cdot f_p(D) \cdot dD} \quad (1)$$

donde:

D_{max} y D_{min} : Diámetros máximo y mínimo de las partículas granulares de la muestra ensayada.

Para simular las curvas normalmente obtenidas en el balasto, se ha elegido en el presente trabajo una función polinómica de tercer grado para la curva $-F_p(D)$. Se ha podido comprobar que dicha integración se ajusta bastante bien a la realidad. En la figura 4 se presenta un caso particular obtenido a través del modelo.

A partir de la curva granulométrica en número de partículas, se han ido obteniendo al azar los diámetros de las partículas esféricas, a colocar en el recinto geométrico definido por el contorno de la capa de balasto. En primer lugar, se han colocado las partículas tangentes a la plataforma, tangentes entre sí o no. Seguidamente el resto depositando cada nueva partícula sobre dos partículas base.

Se han seguido dos criterios en el modo de colocación de esas partículas, dando lugar a dos tipos distintos de estibaciones, que se han deno-

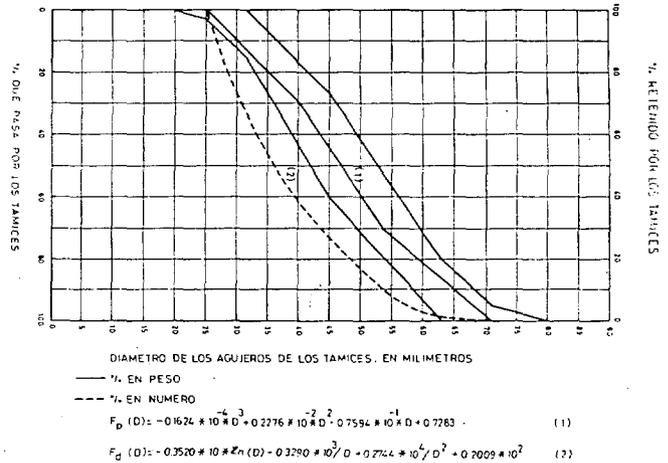


Fig. 4. Representación de una curva granulométrica al azar, en peso y en número de partículas, con sus ecuaciones deducidas del modelo.

minado compacta y suelta. La «compacta» estaba definida por un sistema de generación en el que las partículas se iban colocando sobre las partículas base de menor ordenada posible. La denominada «suelta», se formaba totalmente al azar. Sin embargo, posteriormente ha podido comprobarse que ambos tipos de estibación, presentan valores parecidos de los parámetros estudiados.

Al colocar cada partícula se iban realizando comprobaciones de recinto, corte y estabilidad, antes de poder dar por buena esa posición en la estructura.

A partir de las partículas esféricas, representadas por discos dado el esquema bidimensional del modelo, se han ido construyendo las partículas angulosas, uniendo sus puntos de tangencia por segmentos. Cuando no existían más de dos puntos de tangencia en una partícula, se definían de forma ficticia los restantes puntos, intentando formar una figura lo más regular posible. En la figura 5 se muestra una sección de banqueta tipo, simulada por el método de generación descrito.

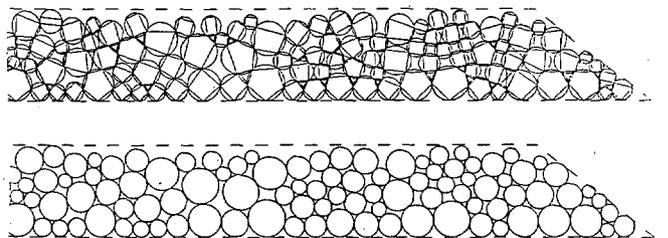


Fig. 5. Secciones de la banqueta de balasto simuladas por el modelo.

La elaboración de un modelo como éste, permite estudiar una serie de parámetros característicos de los medios granulares. Para efectuar este análisis, se han escogido dos espesores para las muestras, de 300 mm. (grupo I) y de 200 mm. (grupos II y III); las muestras de los grupos I y II se han obtenido como estibaciones compactas, y las del grupo III como sueltas. Para cada grupo de ensayos se han generado aleatoriamente 20 muestras.

Los parámetros estadísticos del número de partículas -Na-, de puntos de tangencia -Nt- y de su cociente se presentan en la tabla 1. Se aprecian variaciones importantes de unas muestras a otras (con distinta curva granulométrica) en los valores de esos parámetros, a pesar de la estrechez del huso granulométrico aplicado en el modelo. Esa variación es mayor al aumentar el espesor del balasto, dado que las dimensiones del recipiente influyen en los resultados. Analizando la relación entre -Na- y -Nt- se ha comprobado la correlación lineal clara entre ambos, para todas las muestras e independientemente de los distintos espesores.

Las distribuciones estadísticas del número de contactos por partícula y de las orientaciones principales de esos contactos, se han encontrado coincidentes con los resultados obtenidos por otros autores en investigaciones aplicadas en otros campos de la mecánica del suelo (Rodríguez Ortíz, 1974; Gili, 1988). Así, en el primer caso se han encontrado tres valores claramente significativos: cuatro (42-54 por 100), tres (16-25 por 100) y cinco (13-21 por 100) puntos de tangencia por partícula, y el resto (2, 6 y 7 contactos) constituyendo las colas de esas distribuciones. En cuanto, a las orientaciones de los contactos, se han encontrado valores significativos

	GRUPO	RANGO	$\bar{X} \pm ES$	S
Nd (n = 20)	I	193 - 523	384 ± 16	73
	II	191 - 342	257 ± 10	43
	III	194 - 345	258 ± 10	43
Nt (n = 20)	I	727 - 1244	947 ± 33	146
	II	469 - 829	627 ± 23	102
	III	486 - 847	636 ± 23	104
Nt/Nd (n = 20)	I	2.34 - 2.40	2.37 ± 0.003	0.01
	II	2.40 - 2.47	2.44 ± 0.004	0.02
	III	2.43 - 2.50	2.47 ± 0.004	0.02

TABLA 1. Parámetros estadísticos del número de partículas, del número de contactos y de la relación entre los dos parámetros, según las muestras ensayadas en el modelo.

de 40-70 ° y 110-130 °; en todos los casos las muestras obtenidas forman conjuntos regulares de partículas.

El modelo desarrollado permite evaluar los rangos de variación de la porosidad que presentan las distintas muestras generadas aleatoriamente. En las figuras 6 y 7 se presentan las distribuciones de frecuencia obtenidas para muestras con partículas esféricas y angulosas, respectivamente. En ambas se ha tomado un mismo espesor de 300 mm. para la capa de balasto.

Aplicando el modelo para todos los grupos de muestras, se obtienen unos valores medios de porosidad que no difieren sensiblemente entre dos grupos diferentes de ensayos (variando el espesor). Sin embargo, los rangos de variación de los valores de porosidad son importantes, entre un 20-30 por 100. Estos valores de porosidad no se alejan de los valores encontrados por otros autores, como Fiedulov (1967) y López Pita (1976 b), para la capa de balasto en la vía.

Para completar este estudio y con el fin de confirmar los resultados obtenidos, se ha realizado un análisis estadístico de hipótesis y significación, aplicando para ello una distribución -t- de Student. A través de este estudio, se ha compro-

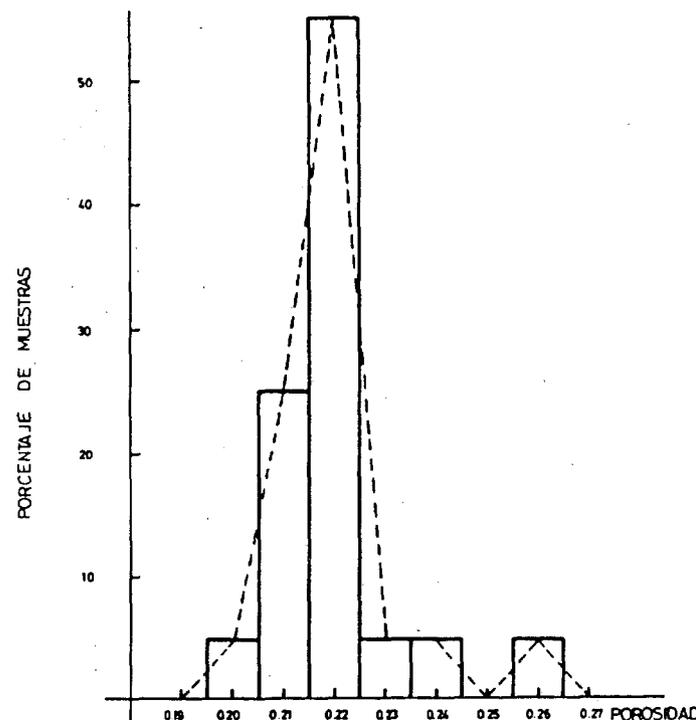


Fig. 6. Distribución de frecuencia de la porosidad obtenida en el modelo para las partículas esféricas (E = 300 mm.).

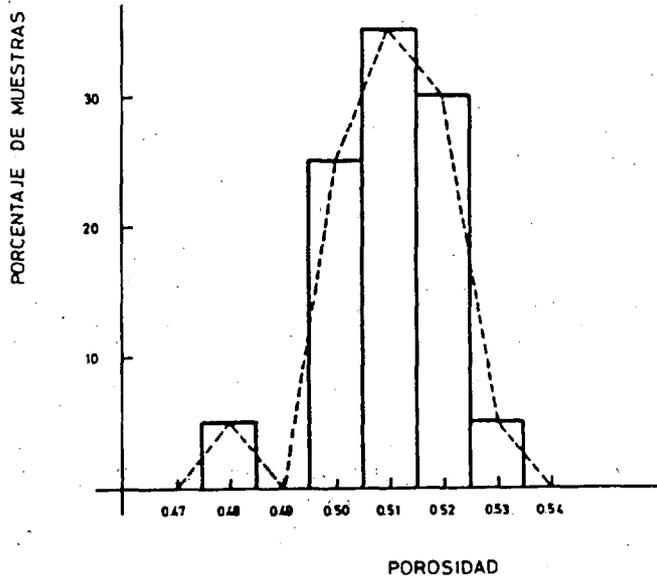


Fig. 7. Distribución de frecuencia de la porosidad obtenida en el modelo para las partículas angulosas ($E = 300$ mm.).

bado que no existe diferencia significativa entre las dos metodologías de colocación de partículas en el recinto: estibaciones compacta y suelta. Asimismo, se ha confirmado la influencia significativa del espesor de la capa de balasto en el valor de su porosidad.

Además, dada la fuerte variación en el número de partículas que constituye cada muestra, se ha considerado interesante analizar la posible correlación lineal existente entre el número de partículas de la capa de balasto y su correspondiente porosidad. Los valores encontrados no permiten aceptar la hipótesis de correlación lineal entre ambos parámetros. A través de los correspondientes diagramas de dispersión muestrales se han obtenido sus curvas de ajuste mediante las ecuaciones de regresión, resueltas por el método de mínimos cuadrados. En la figura 8 se presenta el caso del grupo de muestras de partículas angulosas y 300 mm de espesor. La pendiente de la recta de regresión muestra el valor negativo del coeficiente de correlación, siendo $-E-$ el error de la estima.

De toda la exposición anterior, a partir del modelo de generación aleatoria, se puede concluir la destacable heterogeneidad geométrica de la capa de balasto. A pesar de que el modelo genera muestras regulares y uniformes (sin discontinuidades en su interior) y de la estrechez del huso granulométrico. Tanto el número de partículas que rellenan el recinto como la porosi-

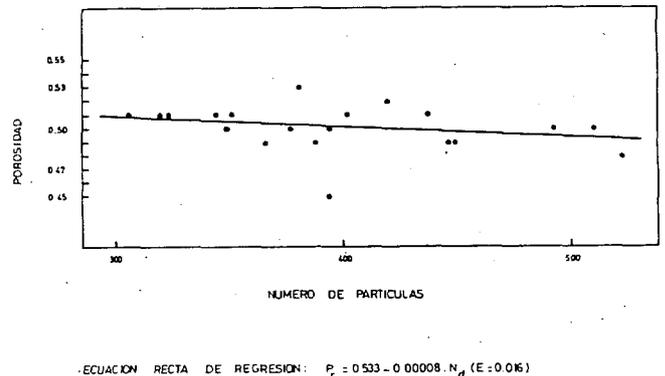


Fig. 8. Recta de regresión del diagrama de dispersión de los datos muestrales para las partículas angulosas ($E = 300$ mm.).

dad resultante de las muestras varían sensiblemente de unas a otras.

Esta heterogeneidad geométrica de la capa de balasto debe generar, consecuentemente, una heterogeneidad resistente. Dicha situación se tratará de comprobar a partir del modelo mecánico numérico desarrollado en el presente trabajo, y que pasamos a detallar a continuación.

3.2. Modelo mecánico-numérico para el estudio tensodeformacional de la capa de balasto. Determinación del porcentaje de rotura intergranular

Como ya se ha comentado con anterioridad, las metodologías empleadas en la investigación ferroviaria hasta el momento, se basan en la aplicación de la mecánica de los medios continuos. Esta aproximación macroscópica presenta resultados prácticos muy aceptables. Sin embargo, no permite acceder a las leyes intrínsecas del comportamiento del medio granular como medio discreto.

Los modelos numéricos permiten el análisis del comportamiento de los medios granulares, partiendo de las partículas elementales, interconexiónadas entre sí a través de los contactos. Las leyes que gobiernan el comportamiento individual de las partículas, rigen la respuesta global del sistema. El paso de esa microestructura a la macroestructura del sistema completo puede hacerse mediante un análisis mecánico (estático o dinámico), o un análisis estadístico a partir de las distribuciones probabilísticas de las propiedades de las partículas (Estradé, 1989).

En este sentido cabe resaltar las investigaciones realizadas en el campo de la mecánica de los medios granulares por diferentes autores, aplicando diferentes modelos: estáticos (Weselo, 1967; Trollope, 1970), elásticos con deslizamiento (Mindlin y Deresiewicz, 1953; Horne, 1969), estadísticos (Fletcher y Hamilton, 1971; Auvinet y Marsal, 1975), tensoriales (Oda, 1982; Satake, 1982) y analógicos (De Josselin y Verruijt, 1969; Mendoza, 1975).

La introducción generalizada de los ordenadores en las metodologías de investigación científica y técnica, ha posibilitado el desarrollo de modelos numéricos. En este campo han permitido la discretización de los medios discontinuos a partir de las partículas granulares mediante elementos, matemática y físicamente definidos. A través de algoritmos de definición del movimiento o interacción mecánica entre ellos, se pueden realizar diferentes ensayos de simulación numérica. En estos modelos no se incluyen los métodos numéricos como el de los elementos finitos, ya comentado con anterioridad.

De los modelos numéricos planteados y desarrollados hasta el momento para medios granulares, pueden destacarse dos en particular: el método de Rodríguez Ortiz (Rodríguez Ortiz, 1974) y el método de los elementos discretos (D.E.M.) de Cundall (Cundall y Strack, 1979).

El método del profesor Rodríguez Ortiz es un modelo matemático que permite obtener valores de fuerzas y deformaciones en un medio discreto. Aplica una formulación incremental bajo condiciones de carga cualesquiera. Se puede plantear en términos de fuerzas o desplazamientos de partículas, obteniéndose valores de fuerzas de contacto, normales y tangenciales, desplazamientos y giros, y deformaciones elásticas (acoplamiento y distorsión) de los contactos.

A través de un planteamiento matricial, define las relaciones existentes entre las fuerzas de contacto y los corrimientos elementales de las partículas. Esta metodología coincide en su planteamiento, con la del cálculo matricial de estructuras.

Finalmente plantea el equilibrio de fuerzas en cada partícula, tanto a nivel de fuerzas totales como incrementales. Así se obtiene la matriz de rigidez de cada contacto, y planteando las condiciones de equilibrio para todas las partículas, se obtiene el sistema de ecuaciones generales de compatibilidad del medio discreto.

Básicamente es un método implícito en el tiempo. A base de incrementos de tiempo se van planteando de forma global los cambios en los valores de los parámetros que definen el modelo, que tienen lugar en un intervalo de tiempo determinado.

Este planteamiento exige la resolución de un sistema de ecuaciones para cada incremento de tiempo. A la complejidad de esa resolución, se añade la necesidad de utilizar grandes espacios de memoria de ordenador para muestras con un elevado número de partículas. Además, la reformulación del sistema de ecuaciones, cada vez que se modifican las condiciones de contacto entre partículas durante el proceso de deformación de la muestra granular, conlleva un consumo de tiempo de computación elevado.

El método del profesor Cundall, denominado método de los elementos discretos (D.E.M.), se basa en la aplicación de un sistema numérico explícito. La interacción de las partículas se controla contacto a contacto, y su movimiento se simula partícula a partícula. La interacción mutua se estudia como un problema transitorio, con estados de equilibrio que se desarrollan con el balance de fuerzas internas. Las fuerzas de contacto intergranulares y los desplazamientos del conjunto de partículas se obtienen a través de los movimientos de las partículas individuales. Estos son consecuencia de la propagación, a través del medio granular, de las perturbaciones originadas en el contorno. Es, por tanto, un proceso dinámico.

Este método se basa en el planteamiento de ese sistema dinámico, en el que las perturbaciones se propagan de una partícula a otra que está en contacto con ella, en un sólo intervalo de tiempo. En cada uno de esos intervalos de tiempo, se resuelve la Segunda Ley de Newton para cada partícula y la Ley Fuerza-Desplazamiento para cada contacto intergranular. De la primera, se obtiene el movimiento de una partícula que resulta de las fuerzas que actúan sobre ella. De la segunda, se obtienen las fuerzas de contacto a partir de los desplazamientos producidos. En este sistema, al conocerse la fuerza de corte en cada contacto, se aplica en el desarrollo la Ley de Fricción tipo Coulomb.

Calculando la resultante que actúa sobre cada partícula, y aplicando nuevamente la primera ley, se calcula su aceleración. Si se integra a su vez en el tiempo, se determina la velocidad de cada par-

tícula, que sirve de base para calcular la velocidad relativa de cada uno de sus contactos. Estos nuevos valores de la velocidad de cada partícula se aplican para el cálculo de su nueva posición, mediante una integración numérica adicional. Ello permite iniciar otro ciclo de cálculo para un nuevo incremento de tiempo.

El método además incluye dos formas de viscosidad amortiguadora de este proceso dinámico: amortiguamiento en el contacto y global. El amortiguamiento en los contactos controla sus velocidades relativas, originando fuerzas de amortiguamiento viscoso, normales y de corte, en los mismos. El amortiguamiento global influye en las velocidades absolutas de las partículas, y se introduce en el cálculo de su movimiento. El uso del amortiguamiento es necesario para conseguir un estado de equilibrio en el modelo.

Así pues, las ecuaciones generales del sistema dinámico son las siguientes:

$$m \cdot \ddot{x}_i = \Sigma (F_i^j + D_i^j) - C^j \cdot \dot{x}_i \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

$$I \cdot \ddot{\theta} = \Sigma M_i^j - C^* \cdot \dot{\theta} \quad (3)$$

donde:

m, I : masa y momento de inercia de la partícula.

F, M : fuerza y momento resultante que actúan sobre la partícula.

$\ddot{x}, \dot{x}, \ddot{\theta}, \dot{\theta}$: aceleración y velocidad, lineal y angular de la partícula.

D : fuerza de amortiguamiento resultante sobre la partícula.

C, C^* : coeficientes de amortiguamiento global de la partícula.

En los contactos se cumplen las siguientes condiciones:

$$F_n = K_n \cdot n \quad (4)$$

$$F_a = K_a \cdot s \quad (5)$$

$$D_n = C_n \cdot \dot{n} \quad (6)$$

$$D_a = C_a \cdot \dot{s} \quad (7)$$

donde:

F_n, F_a : fuerzas normal y tangencial en el contacto.

D_n, D_s : fuerzas de amortiguamiento normal y tangencial en el contacto.

n, s, \dot{n}, \dot{s} : desplazamiento y velocidad normal y tangencial en el contacto.

K_n, K_a, C_n, C_a : rigideces y coeficientes de amortiguamiento normal y de corte de los contactos.

El método de los elementos discretos (D.E.M.) es un método de resolución explícito, que aprovecha la sencillez conceptual y de resolución de este tipo de métodos: se evita el resolver sistemas de ecuaciones complejos. Esta ventaja viene incrementada por el hecho consecuente de ocupar menos memoria de ordenador para su resolución.

El inconveniente de este tipo de métodos es la necesidad de emplear incrementos de tiempo muy pequeños, para que no se produzcan errores que imposibiliten la estabilidad y convergencia del modelo. Ello obliga a consumir grandes tiempos de computación.

Sin embargo, la no linealidad geométrica y constitutiva de los modelos que se aplican al caso de los medios granulares, aconsejan la utilización de un método explícito frente a uno implícito.

Además, el método de los elementos discretos (D.E.M.) permite conocer en todo momento las fuerzas que actúan en los contactos intergranulares. Este hecho permite plantear por esta metodología el estudio de la rotura intergranular. El fenómeno de rotura de las partículas de balasto produce una fragmentación del material granular y un cambio de la distribución de tamaños. Es, por tanto, un factor fundamental en el proceso de deformación de la vía.

De todas las investigaciones llevadas a cabo en el ámbito de la mecánica de los medios granulares para el estudio de la rotura de partículas, son de destacar los trabajos efectuados por el profesor Marsal (Estradé, 1989). Este autor propuso, en base a investigaciones anteriores, una hipótesis o criterio de rotura granular definido por la expresión:

$$P_a = \Omega \times d^T \quad (8)$$

donde $-P_a-$ es la carga de rotura, $-d-$ el diámetro de la partícula, y $-\Omega-$ y $-T-$ dos parámetros del material. Para tratar de evaluar los valores de estos dos parámetros, Marsal (1973) desarrolló una serie de ensayos con distintos tipos de material granular.

Como puede apreciarse, la aplicación de este criterio de rotura exige conocer la magnitud de

las fuerzas intergranulares, a fin de poder compararlas con los valores de la resistencia a la rotura. Así pues, se ha introducido en el método de los elementos discretos el criterio de rotura de Marsal, de cara a poder determinar el porcentaje de rotura de partículas que se presenta en la capa de balasto bajo la acción de determinadas cargas de tráfico. Se ha aplicado dicho criterio de rotura para el balasto calizo y el silíceo, que son los dos tipos de balasto existentes en las vías españolas.

Por último, se han incluido en el sistema las condiciones de contorno que definen la banqueta de balasto: en la cara superior se ha aplicado un criterio de tensión controlada, y en la cara inferior y las laterales un criterio de deformación controlada. La aplicación de estos criterios se realizaba ciclo a ciclo.

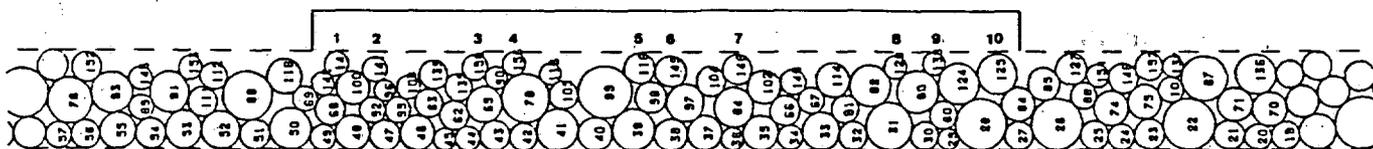
El modelo mecánico-numérico así definido se ha aplicado para el caso de tres muestras elegidas al azar de una banqueta de balasto (fig. 9). Dichas muestras ocupan la zona de influencia de la traviesa, que representa aproximadamente el 64 por 100 del número total de partículas de la semi-banqueta de balasto. Se mantiene como en el apartado anterior, un tratamiento bidimensional de la capa de balasto.

De cara a simplificar el tratamiento, se ha considerado el caso de una traviesa bibloque de hormigón sobre una capa de balasto de poco espesor (100 mm. en el modelo) y base rígida. Dicha representación simula el caso real de una vía en el interior de un túnel o sobre un puente de hormigón, donde por limitaciones de gálibo y de rasante se presenta tal situación. El tratamiento sobre base rígida, permite la extrapolación de los resultados al caso de un tramo que discorra sobre plataforma de excelente capacidad portante.

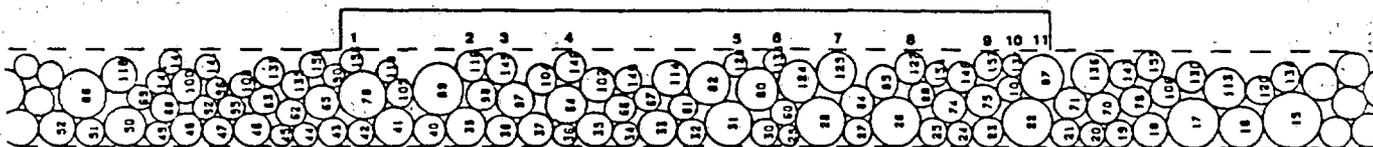
Las muestras así definidas, presentan distinto número de partículas, número de contactos con la traviesa y la plataforma, y porosidad.

En el sistema numérico se han empleado tres tipos de distribución de carga en el contacto traviesa-balasto (fig. 10): rectangular, triangular y la denominada de SCNF-López Pita. La primera es la distribución de carga empleada por la DB y BR, en el diseño de las traviesas y como reacción del balasto sobre las mismas. La segunda se ha aplicado como distribución opuesta a las otras dos. La de SCNF-López Pita, como reacción más cercana a la realidad detectada en los estudios de esa Administración ferro-

MUESTRA I



MUESTRA II



MUESTRA III

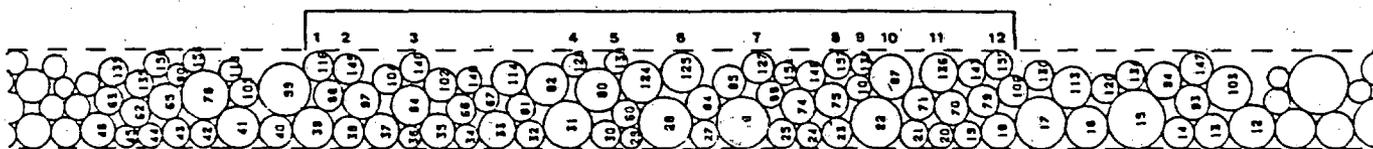


Fig. 9. Muestras ensayadas con el modelo mecánico-numérico desarrollado.

PLANTEAMIENTO DE UNA NUEVA METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO...

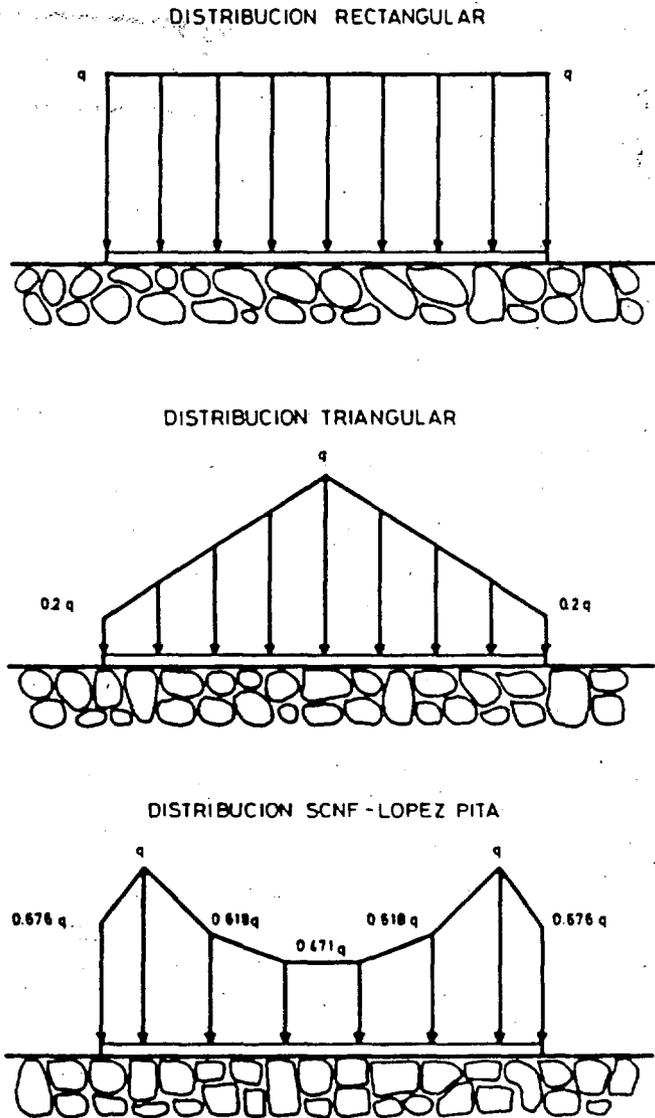


Fig. 10. Distribuciones de carga en el contacto traviesa-balasto empleadas en el modelo.

viaria y este autor (Estradé, 1989).

Se han aplicado en el estudio cinco niveles de carga, tratando en lo posible de incluir en los mismos todas las cargas comerciales que actúan sobre la vía, así como las posibles cargas amplificadas por defectos en la vía o en el material rodante.

En base a todo lo anterior, se ha aplicado el modelo mecánico-numérico para el análisis de tres parámetros:

- a) Influencia del rozamiento intergranular (fenómeno de lubricación).
- b) Influencia del tipo de distribución de

carga en el contacto traviesa-balasto.

- c) Porcentaje de rotura intergranular.

En el estudio de estos parámetros se han empleado como estimadores, la carga máxima -QM- que se transmite a la plataforma y los asientos, medio δ_{med} y máximo δM , de las partículas en contacto con la cara inferior de la traviesa. Para cada una de las tres muestras y para esos estimadores, se han obtenido los valores de su rango de variación, media, error estándar y desviación típica.

En la tabla 2 se muestran los valores de estos estimadores estadísticos al modificar el valor del coeficiente de rozamiento μ . Se han escogido estos valores de μ algo bajos en comparación con los determinados normalmente para el balasto, para poder estudiar el efecto de la lubricación o contaminación intergranular en el sistema. Se detecta una pequeña variación en esos valores al reducir μ de 0.45 a 0.30, mientras que esa variación resulta importante al variar μ de 0.30 a 0.15. Asimismo sucede con los valores de la rigidez vertical del sistema. Se aprecia una variación relativamente importante en los valores obtenidos para un mismo valor de rozamiento y diferente muestra ensayada.

De cara a estudiar la influencia que puede tener un apoyo correcto o incorrecto de la traviesa sobre la capa de balasto, y por tanto, una posible concentración de cargas en el contacto traviesa-balasto, se han aplicado los tres tipos de distribución de carga anteriormente descritos.

En las figuras 11 y 12 se presentan las leyes de asiento y de transmisión de carga, en función del tipo de distribución de carga y para una muestra determinada. Se aprecia poca uniformidad en el

		μ		
		0.15	0.30	0.45
RANGO (n=3)	δM	2.59 - 3.32	2.14 - 3.18	2.07 - 3.07
	δ_{med}	1.61 - 1.83	1.39 - 1.65	1.32 - 1.57
	QM	394 - 587	366 - 521	365 - 517
$\bar{x} \pm ES$ (n=3)	δM	2.98 \pm 0.21	2.61 \pm 0.30	2.53 \pm 0.35
	δ_{med}	1.73 \pm 0.06	1.54 \pm 0.08	1.46 \pm 0.07
	QM	510 \pm 59	464 \pm 49	461 \pm 48
S (n=3)	δM	0.29	0.43	0.50
	δ_{med}	0.09	0.11	0.10
	QM	83	69	68

TABLA 2. Parámetros estadísticos del asiento de la capa de balasto y de la carga transmitida a la plataforma, en función del coeficiente de rozamiento intergranular y para una misma sollicitación exterior.

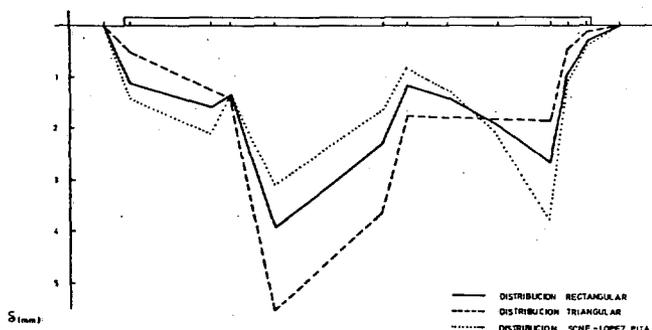


Fig. 11. Distribución del asiento de la capa de balasto, para una muestra ensayada al azar y según el tipo de distribución de carga en el contacto traviesa-balasto.

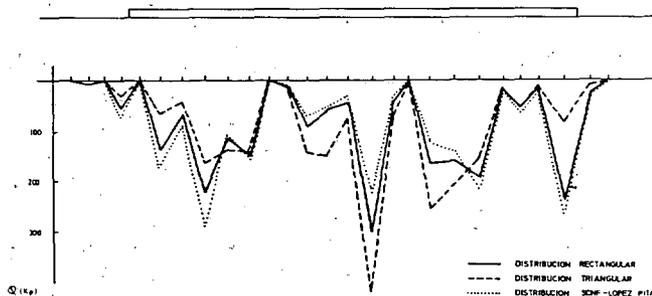


Fig. 12. Distribución de la carga transmitida a la plataforma, para una muestra ensayada al azar y según el tipo de distribución de carga en el contacto traviesa-balasto.

asiento, siendo ésta mayor para el caso de la distribución de carga uniforme. La distribución de cargas que llega a la plataforma presenta con claridad el fenómeno de «dientes de sierra», producido por las cadenas de transmisión de carga en el interior de las mismas, a través de las partículas activas. Los contactos deslizantes no se presentaban en las cadenas de mayores fuerzas, sino en las zonas de menor carga. A nivel de los parámetros estadísticos estudiados, se aprecia como en el análisis del otro parámetro, una variación significativa en los valores obtenidos según las muestras.

Finalmente se ha estudiado el fenómeno de rotura de partículas que se genera en la capa de balasto bajo las solicitaciones del tráfico ferroviario. En concreto, se ha analizado la influencia del incremento del nivel de sollicitación de carga en la aparición de ese fenómeno. Se ha aplicado el modelo sobre las mismas muestras, introduciendo en el sistema numérico el criterio de rotura anteriormente descrito. Se ha aplicado tanto para el balasto calizo como el síliceo.

En la figura 13 se presentan los resultados

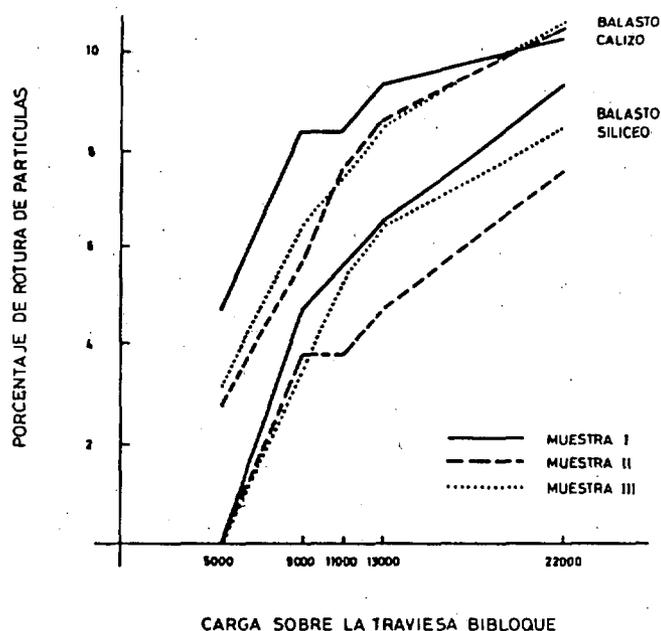


Fig. 13. Representación gráfica de la relación entre el porcentaje de rotura de partículas y el nivel de sollicitación que actúa sobre el balasto calizo o síliceo.

obtenidos para ambos tipos de balasto y diferentes muestras. También en este caso se presenta una respuesta heterogénea, según la muestra ensayada en el modelo. Esta heterogeneidad en la respuesta a la rotura intergranular se reduce al aumentar el nivel de carga, así como la diferencia de comportamiento entre un tipo de balasto y otro. Asimismo, se aprecia con claridad como el balasto síliceo necesita de un nivel de carga elevado para presentar un porcentaje de rotura significativo. Si se considera como porcentaje máximo de rotura el 10 por 100 de las partículas situadas en la zona de influencia del bloque de la traviesa (que representarían aproximadamente el 6 por 100 del total de la semibanqueta de balasto), ambos tipos de balasto presentarían ese porcentaje de rotura bajo niveles de carga superiores a los de un tráfico normal. Estos niveles se transmiten a la vía como consecuencia de defectos en las instalaciones, tanto fijas como móviles (juntas y soldaduras defectuosas de carril, baches en la vía, planos en las ruedas, etc.).

4. INTERPRETACION FERROVIARIA DE LOS RESULTADOS

Uno de los hechos más destacables que se ha corroborado con el modelo desarrollado en este trabajo, es la heterogeneidad geométrica y resistente de la capa de balasto.

La constatación de esta propiedad del balasto ayuda a comprender mejor el hecho de que existan líneas en explotación de reciente construcción, con tramos de vía de análogas características estructurales soportando el mismo tráfico comercial y que en cambio, sufran un deterioro bajo la actuación de éste, notablemente diferente.

Asimismo, se ha comprobado que fenómenos como el proceso de contaminación intergranular, un deficiente apoyo de las traviesas, y la aparición de la rotura de partículas, inciden directamente en la respuesta del sistema balasto-plataforma, en especial, en cuanto al deterioro de la calidad geométrica de la vía.

Así, por ejemplo, un deficiente apoyo de las traviesas (fenómeno de danza) provoca la concentración de cargas en la capa de balasto que nada benefician al comportamiento del sistema. En este sentido, las operaciones de bateo son determinantes para lograr un buen apoyo de las traviesas sobre el balasto.

Además, la aparición de un fenómeno de rotura de partículas, detectado con claridad en la práctica a través de manchas blancas en el balasto (en especial en presencia de balasto calizo y con un deficiente saneamiento de la explanación) genera un proceso evolutivo de deterioro de la calidad geométrica de la vía. La rotura de las partículas modifica la curva granulométrica, aumenta la cantidad de material fino y genera un proceso de contaminación intergranular. A su vez, la aparición de un asiento en la vía, genera un efecto multiplicador de las cargas dinámicas, que puede incrementar el fenómeno de rotura de partículas. Este proceso de deterioro sólo puede eliminarse mediante el desguarnecido del tramo afectado. El simple bateo con aportación de balasto no resuelve el problema.

La aplicación del modelo para el estudio de estos parámetros ayuda a comprender mejor el hecho de que, a pesar de que la vía férrea se proyecte bajo tensiones de trabajo medias admisibles, presente en determinadas circunstancias fenómenos de rotura de partículas de balasto.

La generalización de los resultados obtenidos en este trabajo apunta a que las propiedades y parámetros estudiados en el mismo, influyen decisivamente en la aparición del fenómeno de ruptura de la Ley asiento-tráfico y, por tanto, en los costes de mantenimiento de una vía férrea.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo abre una nueva línea de investigación en el campo ferroviario. Se han demostrado las posibilidades de la aplicación de la metodología desarrollada en el modelo, que se apoya en el carácter de medio discreto de la capa de balasto, cuyo comportamiento microestructural determina la respuesta del macrosistema. En este sentido, son de destacar las que presenta el modelo, en cuanto al estudio de la rotura de las partículas granulares que constituyen el lecho de balasto.

La aplicación de un esquema tridimensional al sistema balasto-plataforma, la generación de la banqueta de balasto mediante una simulación dinámica de flujo de partículas, el estudio de sistemas balasto-plataforma más generales, y el análisis de la capa de balasto que incluya en su comportamiento la generación de nuevas partículas producto de la rotura de otras de dimensiones superiores, pueden constituir nuevas componentes de estudio a desarrollar a partir del presente trabajo.

Cualquier estudio que trate de definir nuevos criterios de diseño de la vía en aras a reducir sus costes de mantenimiento, en especial en relación al balasto, tiene en esta línea de investigación abierta un campo de trabajo de grandes perspectivas.

6. REFERENCIAS

- ALONSO E. y LOPEZ PITA, A. (1980). El comportamiento aleatorio del balasto y su incidencia en el deterioro de una vía férrea que discurre sobre base rígida. Publicación TR-06, E.T.S.I.C.C. y P., Barcelona.
- AUVINET, G.G., y MARSAL, R.J. (1975). Statistical model of grain Breakage. V. Pan. Am. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Buenos Aires, paper 10.
- CUNDALL, P.A., y STRACK, O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29, pp. 47-65.
- DE JOSSELIN DE JONG, G., y VERRUIJT, A. (1969). Etude photo-élastique d'un empilement de disques. *Cahiers Grup. Franc. Rhéol.*, n.º 1, vol. 2, pp. 73-86.
- EISENMANN, J. (1969). Die Beanspruchung der Schiene als trager. *ETR.*, 18, pp. 232-245. Traducido por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- EISENMANN, J. (1974). Forschungsarbeiten auf dem gebiet des Eisenbahnunol strassenoberbanes. Verlag Von Wilhelm Ernest and Sohn., Berlin, Munchen, Dusseldorf. Citado en Oliveros y cols. (1977).
- ESTRADE, J.M. (1989). Contribución al conocimiento del mecanismo de deterioro de la geometría de la vía, por el

- análisis del comportamiento en rotura de los materiales que forman la capa de balasto. Tesis doctoral, E.T.S.I.C.C. y P., Barcelona.
- FLETCHER, E.H., y HAMILTON, E.F. (1971). Random walk model of ideal granular wass. *J. Soil Mech. Found., Dir. Asce., SM. 10*, pp. 1379-1932.
- GILL, J.A. (1988). Modelo microestructural para medios granulares no saturados. Tesis doctoral, E.T.S.I.C.C. y P., Barcelona.
- HORNE, M.R. (1969). The behaviour of an assembly of rotound, rigid, cohesionless particles, III. *Proc. R. Soc., London, ser. A.*, pp. 21-34.
- LOPEZ PITA, A. (1976a). Estudio del sistema balasto-plataforma bajo la acción de cargas verticales. Tesis doctoral, E.T.S.I.C.C. y P., Madrid.
- LOPEZ PITA, A. (1976b). Un nuevo método para la determinación del espesor de la capa de balasto. *A.I.I.*, n.º 13.
- LOPEZ PITA, A., y OTEO, C. (1977). Análisis de la deformabilidad vertical de una vía férrea mediante el método de elementos finitos. *A.I.I.*, n.º 15.
- LOPEZ PITA, A. (1981). Contribución al conocimiento del mecanismo deterioro de una vía férrea. *Revista de Obras Públicas*, 4, pp. 271-289.
- LOPEZ PITA, A. (1982). La inclusión de un nuevo criterio en el proyecto de una vía. *Publicación TR-16*, E.T.S.I.C.C. y P., Barcelona.
- LOPEZ PITA, A. (1985). Interacción vía-vehículo. Tomo VIII. *Servicio de Publicaciones Revista de Obras Públicas*, Madrid.
- LOPEZ PITA, J.J. (1976). La evolución del estado geométrico de la vía y la optimización técnico-económica de las decisiones para su conservación y renovación. Estudio de un modelo conjunto. *A.I.I.*, n.º 9.
- MARSAL, R.J. (1973). Mechanical properties of rockfill. *Embankment-Dam Engineering*, Casagrande Volume, Ed. R.C. Hirschfeld y S.J. Poulos, J. Wiley, New York, pp. 109-200.
- MENDOZA, M.L. (1975). Measurement of contact forces in photoelastic models. *V. Pan Am. Cong. Soil Mech. Found. Eng., Buenos Aires*, paper 1.
- MILOSEVIC, B. (1971). Determination de l'épaisseur de la couche de ballast. *Bulletin de l'Ai du Congrès des Chemins de Fer*, n.º 9.
- MINDLIN, R.D., y DERESIEWICZ, H. (1953). Elastic spheres in contac under varying oblique forces. *Journ. Appl. Mech.*, 9, pp. 327-343.
- N.R.V. 3-4-0.0. (1987). Balasto. Características determinativas de la calidad. *Normas RENFEVIA*.
- ODA, M. (1982). Geometry of discontinuity and its relation to mechanical properties. *I.U.T.A.M. Conf. on Deformation and Failure of granular Materials*, Delft, pp. 53-61.
- OLIVEROS, F., LOPEZ PITA, A., y Mejia, M. (1977). *Tra-tado de Ferrocarriles I. Vía*, Ed. Rueda, Barcelona.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. (1974). Estudio del compor-tamiento de medios granulares heterogéneos mediante modelos discontinuos analógicos y matemáticos. Tesis doctoral, E.T.S.I.C.C. y P., Madrid.
- SCHUBERT, A. (1978). Planum, Bettung und Schwellen-form des Eisenbahngeleises. *Organ fur die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, Helft 6 und 7. Traducido por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- TALBOT, A. (1920). Stress i railroad track. Progress report on stresses in railroad track. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 82. Citado en López Pita (1985).
- TROLLOPE, D.H. (1970). La mecánica elástica de medios discontinuos en problemas de Mecánica de Rocas. *Mecánica de Rocas en la ingeniería práctica*, Ed. K.G. Stagg, O.C. Zienkiewicz, Blume, Madrid, Capitulo 9, pp. 398.
- WESELOH, K. (1967). Scherverhalten regelmassinger Kugelpackungen in Biaxialversuch. *Veroff des Inst. Fur Bodenmech. und Felsmechanick, Kalsruhe*, Helft 31, pp. 61-88.
- YANG, F.L., SCHMUTZ, G., y BURKLI, T. (1984). Sanie-rung eines Bahngleises auf weichem untergrund. *Schweizer Ingenieur und Architekz*, 2, pp. 101-105. Traducido por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Joan-Manuel Estradé Panadés



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 1981. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Catalunya, 1989. Colaborador del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio, de la Universidad Politécnica de Catalunya, desde 1983. Desarrolla su actividad profesional en RENFE desde 1982, especialmente en el campo del mantenimiento de las instalaciones fijas (vía, infraestructura y edificación).

Andrés López Pita



Doctor Ingeniero de Caminos, en la especialidad de Transportes. Durante 12 años desarrolló su actividad profesional en Renfe. Desde 1982 es Catedrático de Ferrocarriles en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Barcelona. Ponente habitual en Congresos, es autor de cerca de un centenar de publicaciones técnicas y de varios libros, incluyendo un Curso de Ferrocarriles en varios volúmenes.