

Compatibilidad entre trenes de viajeros en Alta Velocidad y trenes tradicionales de mercancías

[Approximation to the compatibility between High
Speed passenger trains and traditional freight trains]

Andrés López Pita

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos/Prof. Dr. Eng.

Catedrático de Ferrocarriles. Universidad Politécnica de Cataluña/University Polytechnic of Catalonia

RESUMEN

En el presente artículo se analiza la experiencia adquirida hasta la fecha en la explotación de líneas de alta velocidad, con o sin tráfico mixto. También se evalúan los esfuerzos verticales que ejercen los vehículos preparados para circular por las líneas de alta velocidad: trenes especializados y convencionales (formados por locomotoras y coches) para transporte de viajeros, además de los modernos vagones de mercancías. Finalmente, se incluyen los criterios que se utilizan en la actualidad para evaluar el deterioro de la infraestructura y la superestructura de la vía, en función de las principales variables que caracterizan el tráfico de una línea determinada.

ABSTRACT

The object of this paper is to analyze the experience to date of the operation of the high speed lines both with and without mixed traffic. This paper includes also the evaluation of the vertical stresses exerted by the vehicles capable of using the high speed lines: specialized passenger trains together with conventional passenger trains composed of locomotives and carriages, with the addition of modern freight wagons. Finally, this paper include the currently available criteria in order to evaluate the deterioration of the infrastructure and superstructure of the track as a function of the main variables that characterize the traffic of a particular line.

1. TIPOLOGÍA DE LOS SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

En la actualidad, se explotan en Europa más de 2.500 km de vía en líneas de alta velocidad de reciente construcción. En el cuadro 1 se observa que las líneas existentes tienen muy diversa antigüedad, a contar desde el momento de su inauguración hasta finales de 1999.

1. THE TYPOLOGY OF THE SYSTEMS FOR OPERATING HIGH SPEED LINES

At present more than 2,500 km of newly constructed high speed line are under commercial operation in Europe. As shows in chart 1, the operating period from the moment of opening to the end of 1999 is very variable.

Cuadro 1/Chart 1
ANTIGÜEDAD DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN EUROPA/
THE AVAILABLE TEMPORARY EXPERIENCE FOR HIGH SPEED LINES IN EUROPE

PAÍS/COUNTRY	LÍNEA/LINE	AÑO DE INICIO DEL SERVICIO /YEAR OF COMMENCEMENT OF SERVICE	PERÍODO DE TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA 1999 /THE TEMPORARY PERIOD ELAPSED TO 1999
ALEMANIA/GERMANY	Hannover – Würzburg Mannheim – Stuttgart	1991 1991	8 años/years 8 años/years
ESPAÑA/SPAIN	Madrid – Sevilla/Seville	1992	7 años/years
FRANCIA/FRANCE	París – Lyon TGV – Atlántico/Atlantic TGV - Norte/North TGV – Rhône-Alpes/ Rhône-Alps TGV – Interconexión/Jonction	1981 / 83 1989 / 90 1993 1992 / 94 1994 / 96	18 / 16 años/years 10 / 9 años/years 6 años/years 7 / 5 años/years 5 / 3 años/years
ITALIA/ITALY	Direttissima	1977 / 84 / 92	22 / 15 / 7 años/years

Fuente: Elaboración propia/Source: Compiled by the author.

En realidad, toda la experiencia disponible es la adquirida en la explotación de la línea París-Lyon y del primer tramo de la Direttissima entre Roma Settebagni y Città della Pieve, en el que se alcanza una velocidad máxima de 250 km/h (desde que en 1988 entró en servicio el ETR 450, ya que hasta entonces se explotaba la línea con material rodante convencional, integrado por una locomotora y varios coches en el caso de los trenes de viajeros más rápidos, que circulaban a 200 km/h). En el resto de las líneas esta experiencia ha de considerarse parcial, aunque tal vez suficiente para realizar una primera evaluación del comportamiento de las nuevas infraestructuras en trayectos de alta velocidad.

Antes de analizar la experiencia adquirida, consideramos interesante señalar que, tradicionalmente, ha existido cierta confusión con respecto al concepto de tráfico mixto en sentido práctico. Por lo general, se entiende como la presencia simultánea de trenes de viajeros y trenes de mercancías en una misma línea. En nuestra opinión, es necesario definir este concepto de forma más precisa, ya que estos términos, viajeros y mercancías, no son suficientes por sí solos para clarificar la viabilidad técnica y económica de la explotación de una línea con tráfico mixto.

Por una parte, cabría imaginar ramas de alta velocidad adaptadas para el transporte de mercancías (como podría producirse algún día). En este caso, a efectos del comportamiento de la vía, el tipo de material rodante que circularía por ella y su velocidad sería único. En el extremo opuesto se encuentra la línea Madrid-Sevilla, por la que sólo circulan trenes

In reality, all the experience comes from that derived from the operation of the Paris - Lyon line and the first stretch of the Direttissima between Rome Settebagni y Città della Pieve. The Italian line with a maximum speed of 250km/h (from 1988 with the entry into service of the ETR 450. Until this time the operation of the line was carried out with conventional rolling stock, comprising locomotive and coaches for the faster passenger trains, which traveled at 200km/h). For the rest of the lines (except the most recent) the experience can be considered as partial although perhaps sufficient to carry out a first evaluation of the behavior of the new infrastructures travelling at high speed.

Before analyzing the available experience, we think it interesting to point out that, traditionally, there has been confusion in relation to the concept of mixed traffic in the practical sense. It is generally identified as the simultaneous presence on a line of both passenger and freight trains. In our opinion it is necessary to define the most precise form of this said concept because both terms, passengers and freight, are not sufficient in themselves to clarify the technical - economic feasibility of the operation of a line with mixed traffic.

In effect, on the one hand it would be worth identifying the trains of the high speed lines adapted for the transport of freight (as might be produced some day). In this case, as an effect of the behavior of the track, the type of rolling stock travelling on it and its speed will be unique. At the opposite extreme there is the case of the Madrid - Seville line where only passenger trains use the line but where conventional

Compatibilidad entre trenes de viajeros en Alta Velocidad y trenes tradicionales de mercancías
 [Approximation to the compatibility between High Speed passenger trains and traditional freight trains]

Cuadro 2/Chart 2
SISTEMAS ACTUALES DE EXPLOTACIÓN DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD/
SYSTEMS OF OPERATION CURRENTLY ON HIGH SPEED LINES

TIPOLOGÍA DEL TRÁFICO /TYPOLOGY OF	TIPOS DE COMPOSICIONES /NATURE OF THE TRAIN THE TRAFFIC	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS /TECHNICAL CHARACTERISTICS COMPOSITIONS	LÍNEAS/LINES
Exclusivamente transporte de viajeros /Exclusively for passengers	* Ramas especializadas para transporte de viajeros /Sets of trains Specialised for Passengers (T ₁)	V _{máx} = 270/300 km/h P = 16/17 T/eje/axle	<u>En servicio comercial/In commercial service</u> * París – Lyon (1) * TGV – Atlántico/Atlantique (1) * TGV – Norte e Interconexión /Nord and Jonction * TGV – Rhône-Alpes <u>Previstas en el corto plazo/Planned to be carried out in the short term</u> * Colonia – Frankfurt * Valence / Nimes / Marsella/Marseille
	* Ramas especializadas para transporte de viajeros /Sets of trains specialised for passengers * Trenes convencionales para transporte de viajeros: locomotora y coches /Conventional passenger trains: locomotive and coaches (T ₂)	V _{máx} = 300 km/h P = 16/17 T/eje/axle V _{máx} = 160/220 km/h Locomotora/Locomotive: 20/22 T/eje/axle Coches/Coaches: 12 a 14 T/eje/axle	<u>En servicio comercial/In commercial service</u> Madrid – Sevilla/Seville <u>Prevista/Planned</u> Madrid – Barcelona
Transporte de viajeros y mercancías /Passengers and freight	* Ramas especializadas para transporte de viajeros /Sets of trains specialised for passengers * Trenes convencionales para transporte de viajeros: locomotora y coches /Conventional passenger trains: locomotive and coaches * Trenes convencionales para transporte de mercancías: locomotora y vagones /Conventional freight trains: locomotive and wagons (T ₃)	V _{máx} = 250/300 km/h P = 16/17 T/eje/axle V _{máx} = 160/220 km/h Locomotora/Locomotive: 20/22 T/eje/axle Coches/Coaches: 12 a 14 T/eje/axle V _{máx} = 100/160 km/h Locomotora/Locomotive: 20/22 T/eje/axle Vagones/Wagons: 16 a 20 T/eje/axle	<u>En servicio comercial/In commercial service</u> * Hannover – Würzburg * Mannheim – Stuttgart * Roma – Florencia <u>Previstas en el corto plazo/Planned to be carried out in the short term</u> * Karlsruhe – Basilea * Hannover – Berlín * Florencia – Milán * Barcelona – Frontera francesa/French Border
	* Ramas especializadas para transporte de viajeros /Sets of trains specialised for passengers * Trenes convencionales para transporte de mercancías: locomotora y vagones /Conventional freight trains: locomotive and wagons (T ₄)	V _{máx} = 250/300 km/h P = 16/17 T/eje/axle V _{máx} = 160 km/h Locomotora/Locomotive: 20/22 T/eje/axle Vagones/Wagons : 16 T/eje/axle	Algunos tramos de la línea París-Lyon y el TGV-Atlántico /Some sections of the Paris - Lyon and TGV – Atlantique (desde octubre de 1997) /(since October 1997)

Fuente/Source: A López Pita (1998)

de viajeros, pero no sólo las ramas especializadas para alta velocidad, sino también trenes convencionales formados por una locomotora y material rodante remolcado.

Creemos que el peso de la definición debe recaer más bien, por lo que respecta al tráfico mixto, sobre la tipología del material rodante que circula por la vía y sobre los esfuerzos que ejerce sobre ella, que repercutirán de forma directa sobre los costes de mantenimiento de su calidad geométrica. Desde este punto de vista, en el cuadro 2 se exponen los distintos sistemas de explotación que existen en la actualidad. La clasificación establecida no tiene una intencionalidad teórica, sino que está basada en las consecuencias prácticas que desde nuestra perspectiva tiene cada tipo de tráfico en lo que respecta al deterioro de la vía.

En el citado cuadro 2, se distinguen cuatro tipos de líneas en función del tráfico que soportan:

Líneas T₁, donde sólo se utilizan ramas especializadas para el transporte de viajeros.

Es el caso de las líneas París-Lyon, TGV-Atlántico, TGV-Norte, Interconexión y TGV-Ródano-Alpes. También se dará este servicio en la línea Colonia-Frankfurt.

Líneas T₂, donde sólo circulan trenes de viajeros, pero tanto a través de ramas como de composiciones formadas por material rodante convencional (locomotora y coches).

Es el caso de la línea Madrid-Sevilla, donde circulan conjuntamente trenes AVE y Talgo 200 con locomotora.

Líneas T₃, donde circulan al mismo tiempo ramas especializadas para el transporte de viajeros y material rodante convencional para el transporte de viajeros y mercancías.

En este grupo se encuentra las nuevas líneas alemanas, Hannover-Würzburg y Mannheim-Stuttgart, así como la línea italiana entre Roma y Florencia. En breve, se incorporarán las líneas Hannover-Berlín y Karlsruhe-Basilea. A más largo plazo, la línea Milán-Florencia, y en distinto plazo, la nueva línea de Barcelona a la frontera francesa (Perpiñán).

Líneas T₄, donde sólo se utilizan ramas especializadas para el transporte de viajeros y trenes convencionales para el transporte de mercancías.

Ésta es la situación existente, en la práctica, en algunos tramos de las nuevas líneas París-Lyon y TGV-Atlántico, desde octubre de 1997.

A pesar de su distinta antigüedad, con respecto a la experiencia en servicio, parece posible afirmar que:

trains, made up of a locomotive and towed rolling stock, together with units specialized for high speed, are operated

We believe that the definition element has to be situated more, to the effects of mixed traffic, in the typology of the rolling stock that travels along the track and on the actions exerted on it, which will have a direct repercussion on the maintenance costs of the geometric quality.

From this perspective, in chart 2, we explain the different systems of operating which are in use at the moment. The established classification does not imply a theoretical evaluation but one based on the practical repercussions of each type of traffic on the deterioration of the track.

In the aforementioned chart 2, four types of line according to the traffic they carry are distinguished:

T₁ Lines for which only sets of trains specialized for passengers are used.

This is the case for the Paris - Lyon, TGV - Atlantic, TGV - Nord, Interconnection, TGV - Rhône-Alps lines. It will be also used on the the Colonia - Frankfurt line

T₂ Lines upon which only passenger traffic runs but using both specialized sets of trains and sets made up of conventional rolling stock (locomotive and coaches).

This is the case for the Madrid - Seville line where both sets of AVE high speed trains and sets of Talgo 200 trains pulled by locomotive run together.

T₃ Lines on which sets of trains specialized for passengers and conventional rolling stock, both passenger and freight, simultaneously use the line.

In this group the new German lines, Hanover - Würzburg and Mannheim - Stuttgart, as well as the Italian line between Rome and Florence. Shortly, the Hanover - Berlin and Karlsruhe - Basel lines are incorporated. In a longer term Milan - Florence, and in other time periods the new Barcelona - French Border (Perpignan)

T₄ Lines taking passenger traffic in exclusively specialized sets of trains, and conventional freight trains.

In practice this situation has been found on some sections of the new Paris - Lyon and TGV - Atlantic lines since October 1997.

In spite of the time period, it is subtly different from a line to another, so with respect to operational experience available, it seems feasible to state that:

▼ a) No hay un sistema de explotación concreto que pueda recomendarse universalmente o sin algún tipo de reserva. Quizá el caso japonés, en algunas líneas de alta velocidad donde el volumen del tráfico supera los 300.000 pasajeros diarios, constituya una excepción a esta premisa.

▼ b) Los distintos flujos de tráfico que concurren en cada corredor invitan a realizar una planificación diferenciada con el fin de optimizar los recursos económicos de la inversión en cada línea.

▼ c) Las necesidades comerciales específicas de cada corredor, tanto para el transporte de viajeros como para el de mercancías, y la forma en que son satisfechas por las líneas convencionales, constituyen un aspecto importante del proceso de decisión.

Es evidente que los cuatro sistemas de explotación anteriormente mencionados se encuentran en servicio en la actualidad y que, en consecuencia, su viabilidad técnica queda demostrada por los hechos. La cuestión que se plantea inmediatamente después es si cada sistema comporta costes de explotación muy similares o muy diferentes.

2. INFLUENCIA DE LAS RAMPAS SOBRE LOS TRENES DE MERCANCÍAS Y DE SUS EFECTOS EN LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

En el trazado en planta de una nueva línea de alta velocidad, las normas de proyecto se establecen, con vistas a determinar el radio mínimo necesario para una curva, a partir de ciertas hipótesis sobre:

- ▼ a) La velocidad máxima de los trenes más rápidos ($V_{\max}$)
- ▼ b) La velocidad mínima de los trenes más lentos ($V_{\min}$)
- ▼ c) La máxima insuficiencia de peralte aceptable (I)
- ▼ d) El máximo exceso de peralte aceptable (E), para evitar el desgaste prematuro del hilo bajo del carril.

En general, la velocidad máxima ($V_{\max}$) se determina por la velocidad comercial (V_C) que es conveniente alcanzar en una determinada relación. La experiencia práctica demuestra claramente que una relación aproximada entre V_C y $V_{\max}$ es del tipo:

$$V_C = K \cdot V_{\max}$$

siendo K el parámetro numérico que cabe situar en el ámbito de 0,75 a 0,8 para nuevas infraestructuras.

Para dar una idea de esta relación, entre Madrid y Córdoba, el AVE recorre 340 km, sin paradas, en 1 hora y 41 minutos. Esto supone una velocidad comercial de casi 202 km/h; es decir, el 75 % de su velocidad máxima más usual. Natural-

▼ a) *There is no definitive system of operation that can be recommended universally or without reservation. Perhaps the Japanese case on some high speed lines where the volume of traffic exceeds 300,000 passengers a day constitutes an exception to this premise.*

▼ b) *The different flows of traffic which come together in each corridor invite to a differentiated planning with the aim of optimizing the economic resources of the investment in each line.*

▼ c) *The specific commercial needs of each corridor, both for the transport of passengers and that of freight, and the way that they are satisfied by the conventional lines are an important aspect of the decision making process.*

It is evident that the four systems of operation previously mentioned are in operation at the present moment and, in consequence, by the way of the facts their technical feasibility is demonstrated. This immediately poses the question of knowing whether the operating costs associated with each system are very similar or show great differences.

2. THE INFLUENCE OF THE GRADIENTS ON FREIGHT TRAINS AND THE EFFECT ON THE HIGH SPEED LINES

The norms of the alignment on the ground plan of a new high speed line are established, with a view to determining the minimum radius necessary for a curve, coming from certain hypotheses on:

- ▼ a) *The maximum speed of the fastest trains ($V_{\max}$)*
- ▼ b) *The minimum speed of the slowest trains ($V_{\min}$)*
- ▼ c) *Maximum acceptable cant deficiency (I)*
- ▼ d) *Maximum acceptable cant excess (E) to avoid the premature wearing out of the low rail.*

In general the maximum speed ($V_{\max}$) is determined by the commercial speed (V_C) which is a good idea to reach in a given relationship. The practical experience makes it clear that an approximate relationship between V_C and $V_{\max}$ is of the type:

$$V_C = K \cdot V_{\max}$$

K being the numerical parameter that is worth placing in the environment of 0.75 to 0.8 for the new infrastructures

To give an idea of the Madrid - Cordoba relation, the AVE travels 340 Km, without stopping, in a time of 1 hour 41 minutes. This represents a commercial speed of almost 202 km/h; that is 75% of its top speed. Naturally, the aforementioned reference is only an indication but it serves to put the magnitudes of the commercial speeds compared to the maximum speeds.

Cuadro 3/Chart 3
RADIO MÍNIMO NECESARIO PARA LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD
/MINIMUM RADII NECESSARY FOR THE USE OF HIGH SPEED TRAINS

VELOCIDAD MÁXIMA PREVISTA ENVISAGED MAXIMUM SPEED (km/h)	RADIO MÍNIMO NORMAL/NORMAL MINIMUM RADII NECESSARY (m)	
	LÍNEA ESPECIALIZADA PARA TRANSPORTE DE VIAJEROS /LINE SPECIALISED FOR PASSENGER TRAINS	LÍNEA PARA TRÁFICO MIXTO /LINE FOR MIXED TRAFFIC
200	1.400	1.500
250	2.600	2.800
300	4.000	5.400
350	5.900	8.500

Fuente/Source: E. CHAMBRON (1992)

mente, esta cifra sólo es indicativa, pero sirve para comparar las velocidades comerciales con las velocidades máximas.

La velocidad mínima de una línea viene condicionada por las posibilidades que ofrecen tanto los vagones, en general preparados para circular a 100 o 120 km/h, como por la potencia de la locomotora que los remolca.

Con los valores que suelen emplearse como insuficiencia o exceso de peralte (aunque son diferentes de un país a otro) los radios de las curvas varían en función de las velocidades, como se expone en el cuadro 3, con carácter indicativo.

Con respecto al perfil longitudinal, en la selección de la rampa máxima influye la orografía de la zona, la inversión y el tipo de trenes que van a circular por la línea, entre otros factores.

De este modo, como se sabe, en el caso de la nueva línea París-Lyon, la adopción de una rampa de 15‰, que permitiera trenes de mercancías hubiese supuesto un incremento de la inversión prevista para la realización de la infraestructura en más de un 30‰, en comparación con la solución basada en pendientes de 35‰ (Prud'homme, 1978).

Por otra parte, en el caso alemán, el análisis realizado con rampas de 12,5‰ y 35‰ en el tramo Rethen-Kassel (de la nueva línea Hannover-Würzburg) y en la línea Mannheim-Stuttgart conducía a los resultados que se presentan en el cuadro 4.

The minimum speed of one line is conditioned by the possibilities permitted both by the wagon stock, generally suitable for speeds of 100 or 120 km/h, and the power of the rolling stock's engine that is hauling them.

With the values usually used for the cant deficiency or excess (although they vary from one railway authority to another) Curve radii are reached according to the speeds as shown in Chart 3.

With respect to the longitudinal profile, the choice of the maximum gradient is influenced by the orography of the area, the investment and the type of train compositions to travel on the line, also.

Thus, as made reference to in the case of the new Paris - Lyon line, the adoption of a 15‰ gradient, compatible with mixed traffic, in the definition of the route, represented an overspend on the investment on the infrastructure: more than 30‰ as compared to the solution based on gradients of 35‰ (Prud'homme 1978).

In the German case, on the other hand, the analysis carried out on gradients of 12.5‰ and 35‰, on the Rethen - Kassel section (on the new Hanover - Würzburg line) and on the Mannheim - Stuttgart line, leads us to the results shown in Chart 4.

Cuadro 4/Chart 4
INCIDENCIA ECONÓMICA DE LA RAMPA SOBRE LOS COSTES DE LA INFRAESTRUCTURA DE ALGUNAS LÍNEAS ALEMANAS/THE ECONOMIC INCIDENCE OF THE GRADIENT IN THE INFRASTRUCTURE COSTS OF SOME GERMAN LINES

LÍNEA/LINE	ÍNDICE DE COSTE/COST INDEX	
	Rampa de 12,5‰/Gradient 12.5‰	Rampa de 35‰/Gradient 35‰
Hannover - Würzburg (Rethen - Kessel)	100	89
Mannheim - Stuttgart	100	90

Fuente/Source: M. LINKERHÄGNER (1984)

Gracias a la adopción de un radio mínimo de 3.250 m, frente a 5.100 m, finalmente retenidos, se lograba un ahorro adicional de cuatro puntos en la primera línea y de dos puntos en la segunda. En síntesis se reducían los costes de inversión un 15 % y un 13 % respectivamente (cifras a comparar con el aumento superior al 30 % en el caso de la línea francesa).

Las reflexiones y datos precedentes pretenden ilustrar algunas de las variables que intervienen en la decisión de la rampa máxima que debe adoptarse.

A la hora de analizar, si por criterios de trazado, es factible la presencia de tráfico mixto en sentido amplio, es decir, con velocidades heterogéneas, pueden darse dos situaciones: la línea ya está en servicio comercial o tiene su perfil longitudinal definido, o bien se encuentra en fase de planificación. En el presente artículo sólo se analizará el primer caso.

De acuerdo con lo que ya se ha indicado, la línea se habrá planificado con una velocidad máxima de V (km/h). Por debajo de esta velocidad, podría darse un exceso de peralte que provocase el desgaste prematuro de la vía.

Los requisitos básicos que hay que cumplir para aceptar, por criterios de trazado, el uso de una determinada composición en una línea en servicio (válidos, por lo tanto, para determinar la viabilidad del tráfico de mercancías), son:

- ▼ a) Verificar que el tren puede arrancar en cualquier punto de la línea si se ha detenido por cualquier motivo o necesidad del servicio.
- ▼ b) Verificar que el tren tiene la capacidad de frenado necesaria para detenerse en las peores condiciones en cualquier pendiente, sin superar la máxima tensión energética tolerada por cada tipo de freno.
- ▼ c) Verificar que la reducción de velocidad en algunas zonas, como consecuencia de la falta de potencia de la locomotora o del remolcado de vagones pesados, no afecta negativamente a los criterios de tolerabilidad del exceso de peralte.

El resultado de este análisis nos lleva a establecer cuál es la velocidad mínima a la que puede desplazarse una determinada composición, y con qué carga remolcada. Los valores obtenidos reflejarán el posible interés comercial y económico que tiene la autorización del uso mencionado. Hay que tener en cuenta que, en ocasiones, en secciones difíciles de líneas de alta velocidad, la magnitud de la carga remolcada que garantiza el cumplimiento de los tres requisitos citados es inaceptable desde el punto de vista comercial.

Finalmente, por lo que respecta a las reducciones de las velocidades máximas como consecuencia de la existencia de rampas de una determinada longitud, se ha realizado una serie de simulaciones para diferentes configuraciones.

Concretamente, se ha llevado a cabo una simulación de trenes de mercancías remolcados por la locomotora S 252 que se utiliza en los ferrocarriles españoles, cuyas caracterís-

The adoption of a minimum radius of 3,250m as opposed to 5,100m, produced to an added saving of four points on the first line and two points on the second. To summarize, reductions in the investment costs of 15% and 13% respectively (compared to the figure of (>30%) for the French line).

The previous comments and data try to show some of the variables that influence the decision on the maximum gradient.

At the moment of analyzing, if for tracing criteria, the presence of mixed traffic is feasible in the wide sense, that is with heterogeneous speeds, two situations are possible: The line is already in commercial operation or has its longitudinal profile defined, or The line is being planned.

Only the first situation will be analyzed.

In accordance with that previously stated, the line will have been planned having a maximum speed of V (km/h). Below this speed, an excess of cant could be produced which wears out the track prematurely.

The conditions, basically, to be taken into account to accept the use of a determined train composition for a line in service (valid, therefore, for the feasibility of freight traffic), exclusively for tracing criteria, are:

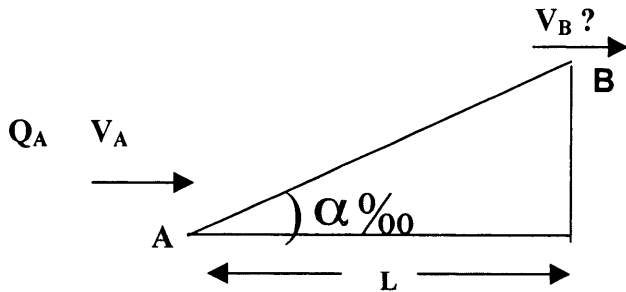
- ▼ a) *To verify that at any point or in any area of the route, the train composition can start if it stops for any reason or operational need.*
- ▼ b) *To test the braking capacity of the train composition for stopping under the worst conditions on any slope, without exceeding the maximum energetic stress tolerated by each type of brake.*
- ▼ c) *To analyze that the reductions in speed in some areas as a result of the lack of power from the locomotive or a heavy load being hauled do not negatively affect the criteria tolerated for the excess of cant.*

The result of this analysis leads us to state what is the minimum speed at which a given train composition, and with which hauled load, it can travel. The values that were obtained reflect the possible commercial and economical interest for authorizing the aforementioned use. It is worth bearing in mind that, on occasions, on difficult routes, on high speed lines, the magnitude of the hauled load which guarantees the fulfillment of the three aforementioned conditions is unacceptable from the commercial perspective.

Finally, regarding the reductions in the maximum speeds as a result of the existence of gradients of a certain length, a series of simulations has been carried out for different route configurations.

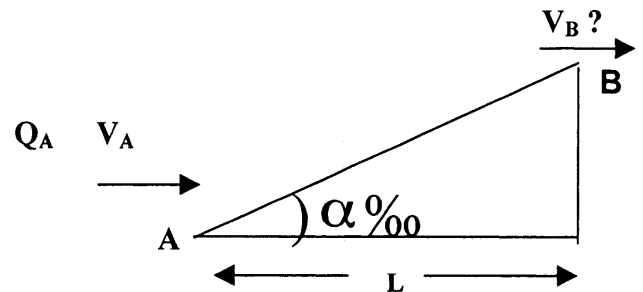
The simulation has been carried out specifically for freight trains being pulled by the S 252 locomotive, used by the Spanish Railways, that as mentioned earlier, has similar

ticas de potencia, son similares a las que presentan las que se utilizan en otros países europeos. A fin de analizar el efecto de las rampas, puede utilizarse el diagrama siguiente:



Es decir, se presupone que se conoce la velocidad V_A de una determinada composición y la carga remolcada (Q_A) en el inicio de una rampa, y se evalúa la velocidad V_B a la que circularía el tren al final de la rampa (α %) para una longitud L . La

power characteristics to those used in other European countries. In order to analyze the effect of the gradients, the diagram below can be used:



That is, it is assumed that the speed V_A of a given train composition with a hauled loads at the start of a gradient, is known, and the speed V_B at which the train is travelling at the end of the gradient (α %) for a length l , is evaluated. Figure 1

VELOCIDAD MÁXIMA EN TRENES DE MERCANCÍAS. RAMPA 20‰. VELOCIDAD INICIAL 100 km/h.
/MAXIMUM SPEED FOR FREIGHT TRAINS. GRADIENT 20‰. INITIAL SPEED 100 km/h.

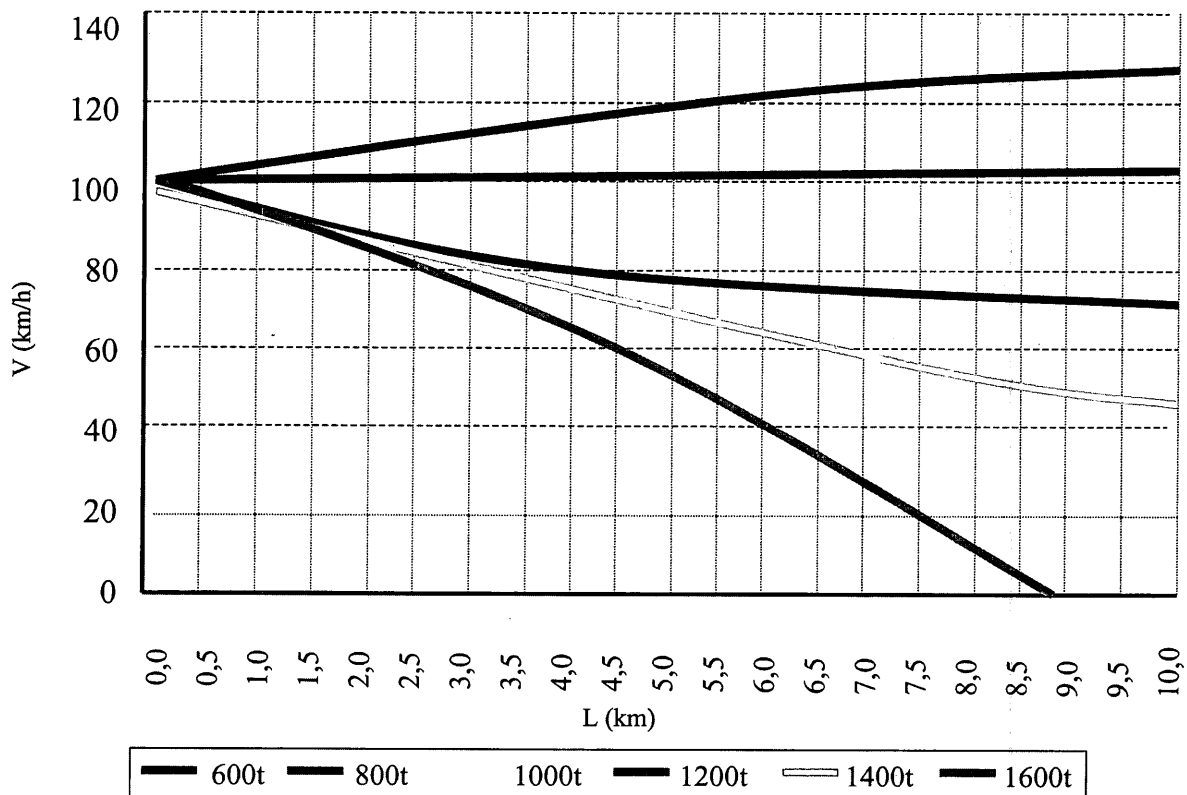


Figura 1/ Figure 1.

Cuadro 5/Chart 5
MÁXIMA RAMPA ADMISIBLE PARA LIMITAR LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD AL 5 % Y AL 10 %/ THE MAXIMUM
ADMISSIBLE GRADIENT IN ORDER TO LIMIT THE REDUCTION OF SPEED TO 5 AND 10%

CARGA REMOLCADA /THE LOAD HAULED	MÁXIMA RAMPA ADMISIBLE (%) Y LONGITUD (km)/THE MAXIMUM ADMISSIBLE GRADIENT (%) AND LENGTH							
	VELOCIDAD DE MARCHA (km/h)/THE TRAVELLING SPEED (km/h)							
	100		120		140		160	
	Reducción del (%) / A reduction of (%)							
	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %
600	30 (2)	30 (>10)	25 (2) 28(1)	25 (8) 28(2,5)	20 (4) 22(2)	22 (5) 25(2,5)	18 (3) 25(1)	18 (7) 20(4) 22 (3)
800	22 (8)	25 (3)	18 (5) 20 (1,5)	20 (5) 22 (2,5)	15 (4)	18 (4) 30 (1)	12,5 (5)	15 (5) 18(3)
1.000	18 (4)	20 (4)	15 (3)	25 (1)	12,5 (4) 18 (1)	12,5 (10)	10 (5) 18 (1)	12,5 (5) 15 (3)
1.200	15 (4) 18(1)	18 (12,5)	12,5 (2,5)	15 (3)	10 (4,5)	12,5 (1,5)	10 (2,5)	10 (6)
1.400	12,5 (7)	15 (3)	10 (6)	12,5 (4)	10 (2,5)	12,5 (3)	10 (2)	10 (4,5)
1.600	12,5 (2)	12,5 (4,5)	10 (2,5)	10 (6)	10 (2)	10 (4) 22 (1)	5 (7)	10 (3,5)

Fuente: Elaboración propia/Source: Compiled by the author

figura 1 presenta un ejemplo del tipo de curvas obtenidas durante la simulación realizada. Las velocidades supuestas en A eran: 100, 120, 140 y 160 km/h. Las cargas remolcadas por el tren de mercancías fluctuaban entre 600 Tm y 1.600 Tm en incrementos de 200 Tm. La pendiente oscilaba entre el 5‰ y el 30‰, con ocho valores para las pendientes intermedias y sus longitudes de entre 1 y 10 km. De todos los resultados obtenidos, se han seleccionado los siguientes (cuadro 5):

A manera de conclusión de la simulación efectuada puede señalarse que, para el intervalo más habitual de las cargas remolcadas, cuya circulación por algunas líneas de alta velocidad, podría ser de interés, se dispone de valores de referencia sobre la influencia que las rampas y su longitud ejercen en la reducción de la velocidad, pudiendo facilitar el establecimiento de trazados geométricos que guarden la mayor aptitud posible para una explotación con composiciones de diferentes características.

shows an example of the type of curves obtained during the simulation carried out. The speeds assumed in A, were: 100, 120, 140 and 160 km/h. The loads hauled by the freight train fluctuated between 600t and 1,600t in stages of 200t. The variable gradient from 5 to 30‰, with eight values for intermediate gradients, and their lengths of between 1 and 10Km. From all the results obtained, the following have been selected (chart 5):

As a conclusion to the simulation carried out it can be pointed out that, for the interval of the most usual loads hauled that travel on some high speed lines, it could be of interest to make available the references values on the influence that the gradients and their lengths exerts on the reduction in speed, being able to facilitate the establishment of geometric routes that keep the greatest possible aptitude for an operation with train compositions of different characteristics.

3. INFLUENCIA DEL TRÁFICO MIXTO SOBRE EL DETERIORO DE LA GEOMETRÍA DE LA VÍA

El objetivo final del presente artículo es intentar determinar cuál es la magnitud económica de las repercusiones que tiene el tráfico mixto sobre el deterioro de la geometría de la vía de líneas de alta velocidad.

Para estimar los costes de mantenimiento de la vía se considera un proceso en tres fases:

- ▼ a) Evaluar las acciones transmitidas por cada tipo de material rodante a la vía.
- ▼ b) Establecer criterios que permitan determinar los efectos de estas acciones en términos de deterioro de la calidad geométrica de la vía.
- ▼ c) Evaluar las diferencias relativas en términos de costes de mantenimiento.

Por lo que respecta a las acciones que ejerce el material rodante sobre la línea, cabe distinguir dos períodos de tiempo diferentes: El primero corresponde al material rodante disponible a mediados del decenio de 1970.

La figura 2 muestra que las fuerzas verticales transmitidas por las locomotoras que circulaban a 200 km/h eran un 44 % mayores que las ejercidas por los TGV a 300 km/h. El segundo período de tiempo se refiere a los dos últimos decenios, en los que han aparecido nuevos tipos de locomotoras. A partir de los resultados más recientes obtenidos con respecto al comportamiento del material rodante, es posible realizar la comparación representada en el cuadro 6.

3. THE INFLUENCE OF MIXED TRAFFIC ON THE DETERIORATION OF THE GEOMETRY OF THE TRACK

The final objective of this study is to try to proportion certain orders of magnitude on the economic impact of mixed traffic on high speed lines.

In order to analyze the maintenance costs of the track the starting point is:

- ▼ a) The evaluation of the actions transmitted by each type of rolling stock to the track.
- ▼ b) The establishment of criteria that permits the transformation of the actions to the deterioration of the geometric quality of the track.

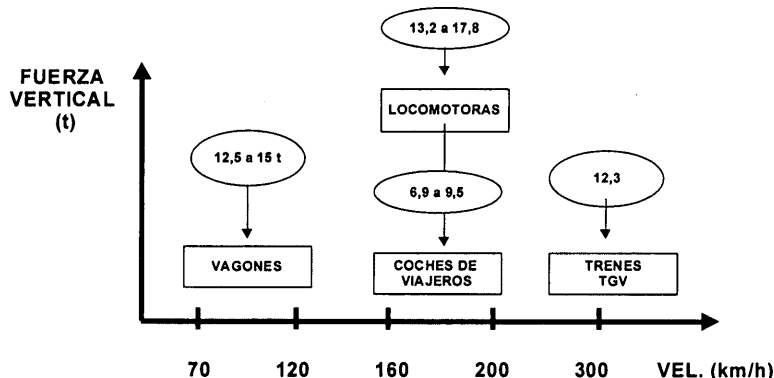
- ▼ c) The evaluation of the relative differences in terms of maintenance costs.

As far as the actions exerted by the rolling stock on the line, it is worth differentiating two distinct time periods: The first corresponds to the rolling stock available in the middle of the 1970's.

Fig. 2 shows that the vertical forces transmitted by the locomotives become, for speed of 200 km/h, up to 44% higher than those exerted by TGV trains travelling at 300 km/h.

The second time period relates to the past two decades in which new types of locomotives have appeared. From the most recent results on the behavior of rolling stock, it is possible to make the comparison shown in chart 6.

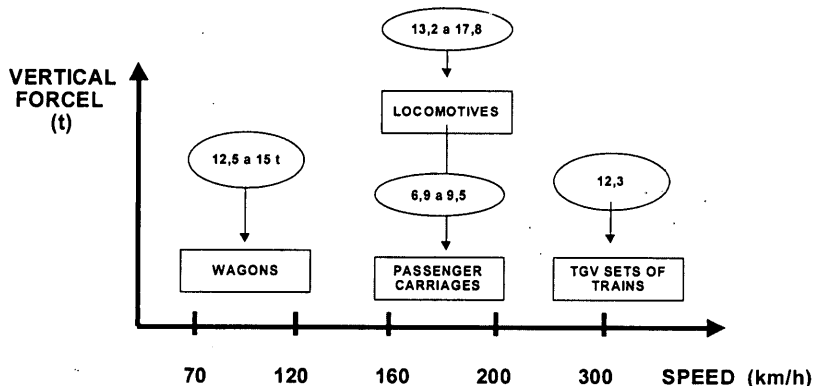
ÓRDENES DE MAGNITUD DE LOS ESFUERZOS VERTICALES EJERCIDOS SOBRE LA VÍA POR DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS (DECENIO DE 1970)



Fuente: A. LÓPEZ PITA (1998)

Figura 2.

THE ORDERS OF MAGNITUDE OF THE VERTICAL STRESSES PRODUCED ON A TRACK BY DIFFERENT TYPES OF VEHICLE (THE 1970'S)



Source: A. LÓPEZ PITA (1998)

Figure 2.

Cuadro 6/Chart 6
EVOLUCIÓN COMPARATIVA DE LAS MÁXIMAS FUERZAS VERTICALES
EJERCIDAS POR EL MATERIAL RODANTE SOBRE UNA VÍA/THE COMPARATIVE EVOLUTION OF THE MAXIMUM
VERTICAL FORCES EXERTED BY THE ROLLING STOCK

TIPO DE MATERIAL RODANTE /TYPE OF ROLLING	MÁXIMA FUERZA VERTICAL POR RUEDA (Tm) /STOCK MAXIMUM VERTICAL FORCES PER WHEEL (t)	
	Decenios de 1960 y 1970 /1960's and 70's	Decenios de 1980 y 1990 /The 1980's and 90's
Locomotoras/Locomotives V = 200 km/h	17,5	13 a 13,5
Vagones de mercancías/Freight wagons V = 70 km/h V = 100 km/h V = 120 km/h	14,5 -15,7 - -	- 12,6 13,3
Coches de viajeros/Passenger cars V = 200 km/h	6,9 (TEE) a 8,3	-
Ramas de alta velocidad/High speed trains * línea clásica/classic line V = 200 km/h V = 300 km/h * línea de alta velocidad/high speed line V = 300 km/h	12,15 13,95 -	12,3 a 12,5

Fuente/ Source: A. López Pita (1998)

Es indudable que las diferencias existentes entre las ramas de trenes de alta velocidad y las composiciones de locomotoras y vagones, que podrían ser de hasta un 44 % y un 28 % respectivamente, se han reducido a los actuales niveles del 10 % y el 15 % en ambos casos.

La figura 3 representa de forma visual la evolución que ha experimentado el material rodante en relación con los esfuerzos que ejerce sobre la línea.

A fin de analizar los costes de mantenimiento de la vía, cabe distinguir dos aspectos:

- ▼ a) Los esfuerzos dinámicos verticales que se ejercen sobre el carril.
- ▼ b) Las vibraciones que se generan en los componentes de la superestructura de la vía, especialmente en el balasto.

En el primero se utilizan los criterios de influencia de la carga dinámica sobre el deterioro de la vía, de acuerdo con la regla de la potencia. En el segundo, se utiliza la velocidad de vibración de las partículas de balasto.

En nuestra opinión, por lo que respecta al criterio 1, los valores entre 1 y 2 son correctos. La aplicación del criterio 1 cuando α oscila entre 1 y 2 da lugar a los índices relativos a la

It is indubitable that the differences between the fleets of high speed trains and the locomotives and wagons, that could be up to 44% and 28% respectively, have been reduced to the present levels of between 10 and 15% in both cases.

Fig. 2 visualizes the evolution experienced in relation to the actions produced on the line by the rolling stock.

In order to analyze the maintenance costs of the track it is worth differentiating two aspects:

- ▼ a) *The vertical dynamic stresses exerted on the rail.*
- ▼ b) *The level of vibrations generated in the components of the superstructure of the track and specially in the ballast.*

The first one uses the criteria of the influence of the dynamic load on the deterioration of the track based on the rule of the power.

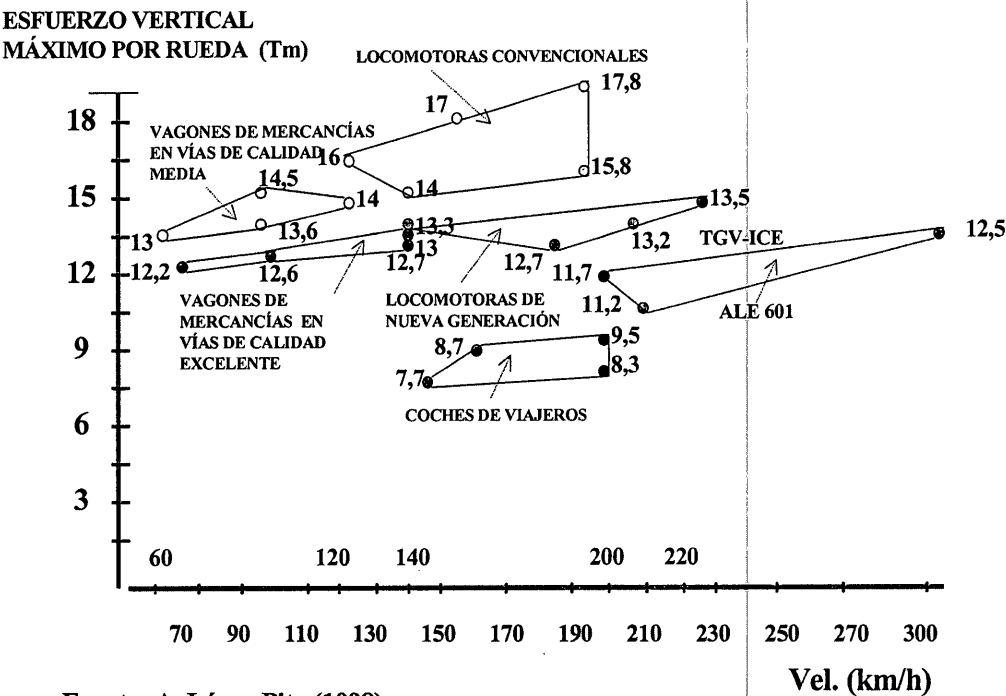
The second one uses the level of speed of vibration of the ballast particles.

As far as criterion 1 is concerned, in our opinion the values 1 to 2 are corrects. The application of criterion 1 for values of α from 1 to 2 lead to the indices relative to the fatigue of the track which appear in chart 7.

Based on the results shown, it verifies that the increase in the maintenance costs will be of between 10 and 20% more

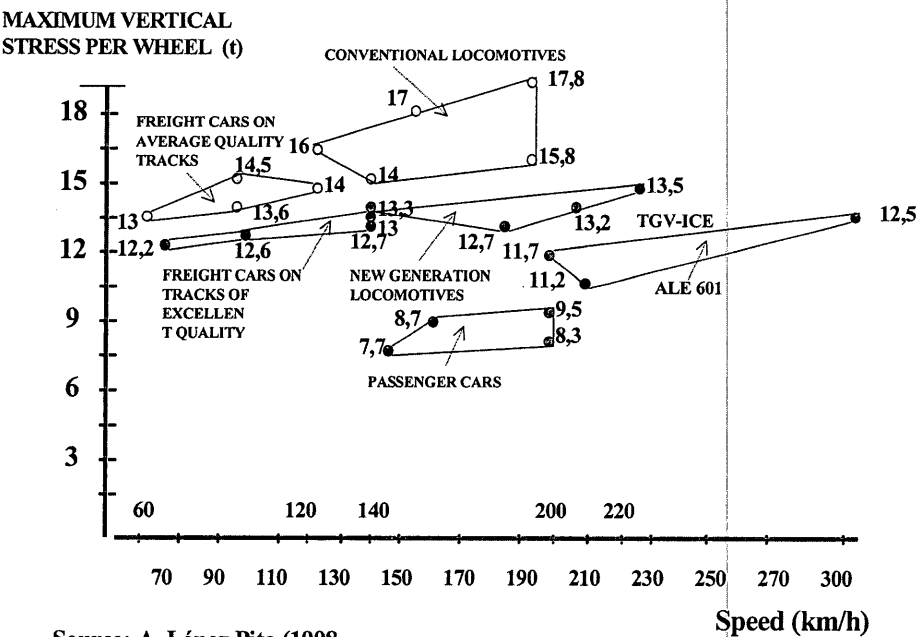
Figura 3.

ORDEN DE MAGNITUD DE LOS ESFUERZOS VERTICALES
GENERADOS POR LOS VEHÍCULOS FERROVIARIOS



Fuente: A. López Pita (1998)

RANGE OF VERTICAL STRESSES GENERATED BY
THE RAILWAY VEHICLES

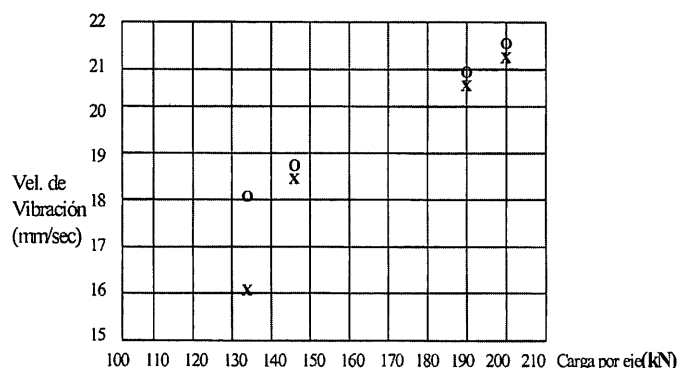


Source: A. López Pita (1998)

Figure 3.

VELOCIDAD DE VIBRACIÓN EN EL BALASTO (RUMP et al. 1996)

A) Influencia de la carga de los ejes del vehículo



B) Influencia de la velocidad de marcha

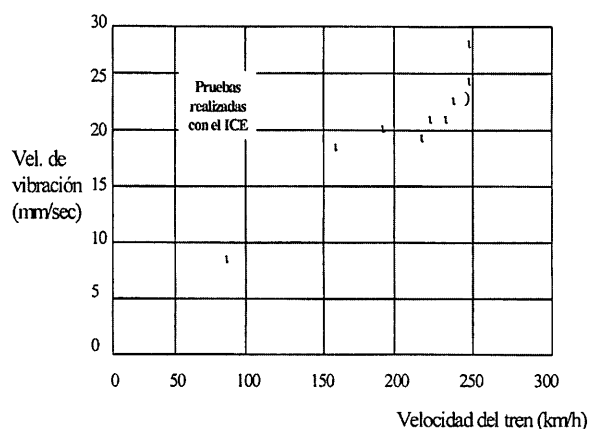


Figura 4.

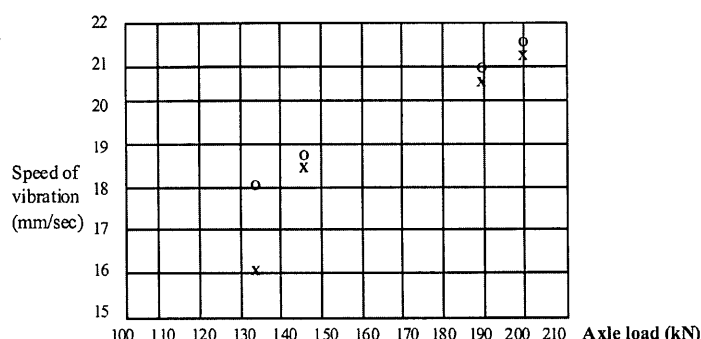
fatiga de la vía que aparecen el cuadro 7. De los resultados presentados se desprende que los costes de mantenimiento aumentarán entre un 10 % y un 20 % más que si se utilizan exclusivamente ramas especializadas para transporte de viajeros.

Por lo que respecta al criterio 2, de acuerdo con Rump y cols. (1996), la máxima velocidad de vibración aceptable en la actualidad no debería superar de 15 a 20 mm/s. La figura 4 presenta los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el ICE para velocidades de entre 150 y 250 km/h y con trenes de mercancías de hasta 120 km/h. Tomando como referencia el precedente criterio resultaría que un factor importante para el deterioro de la capa de balasto es la circulación de trenes de alta velocidad que generan vibraciones de 20 a 25 mm/s, dado que los trenes de mercancías generan, como se ve en la figura 4, vibraciones de sólo 10 a 15 mm/s.

Un aspecto importante a considerar en el mencionado deterioro del balasto, es la influencia de la superestructura de la vía,

THE SPEED OF VIBRATION IN THE BALLAST (RUMP et al. 1996)

A) Influence of the vehicle axle load



B) Influence of the travelling speed

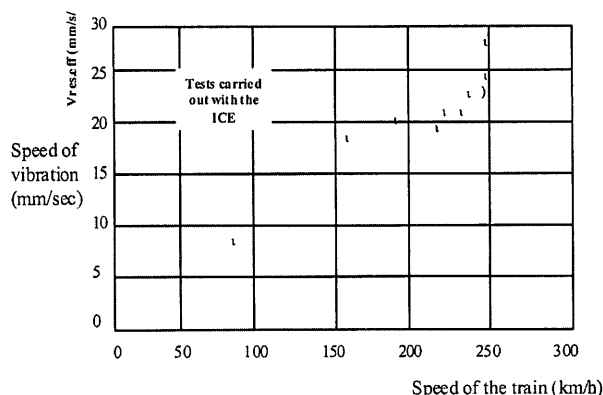


Figure 4.

than that corresponding to the exclusive use of specialized passenger trains.

As far as criterion 2 is concerned, according to Rump et al (1996) at the present time, the maximum acceptable speed of vibration non should be higher than 15 to 20 mm/sec.

Figure 4 shows the results obtained with the trials carried out with the ICE for speeds of between 150 and 250 km/h, and with the freight trains up to 120 km/h. An important aspect to be taken into account in this deterioration of the ballast is the influence of the track superstructure, or more specifically, its vertical elasticity. In a forthcoming article, we will go into this issue in dept, it being of particular interest in the case of lines reserved exclusively for passenger trains running at $250 < V \leq 350$ km/h.

Taking as a reference the mentioned criteria, a mayor contribution to the deterioration of the ballast layer turns

Cuadro 7/Chart 7
FUERZAS DINÁMICAS VERTICALES EJERCIDAS POR DIFERENTES VEHÍCULOS FERROVIARIOS SOBRE VÍAS DE ALTA CALIDAD GEOMÉTRICA/THE DYNAMIC VERTICAL FORCES EXERTED BY DIFFERENT RAILWAY VEHICLES ON TRACKS OF A HIGH GEOMETRIC QUALITY

TIPO DE MATERIAL RODANTE /TYPE OF ROLLING STOCK	MÁXIMA FUERZA VERTICAL POR RUEDA /MAXIMUM VERTICAL FORCE PER WHEEL	ÍNDICE RELATIVO A LA FATIGA DE LA VÍA (Q_d) ^a /INDEX RELATIVE TO FATIGUE OF THE TRACK (Q_d) ^a	
		$\alpha = 1$	$\alpha = 2$
<u>Trenes de alta velocidad</u> <u>/High speed trains</u> V = 300 km/h	12,3	100	100
<u>Locomotoras modernas</u> <u>/Modern locomotives</u> V = 200 km/h	13,5	110	120
<u>Coches de viajeros</u> <u>/Passenger carriages</u> V = 200 km/h	8,3	67	46
<u>Vagones de carga modernos</u> <u>/Modern freight wagons</u> V = 100 km/h V = 120 km/h	12,6	102	105
	13,3	108	117

Fuente: datos recopilados por el autor/Source: compiled by the author

* Referencia al índice 100/Index 100 taken as reference

y de forma más específica, de su elasticidad vertical. En un próximo artículo desarrollaremos detenidamente esta problemática de particular interés en líneas reservadas exclusivamente a la circulación de ramas de viajeros con $250 < V \leq 350$ km/h

4. CONCLUSIONES

De los resultados presentados se desprende que los costes de mantenimiento de las líneas comerciales explotadas con trenes especializados para transporte de viajeros y trenes convencionales para transporte de viajeros formados por locomotoras y coches, con la incorporación de vagones modernos de mercancías podrían incrementarse entre un 5 % y un 20 %, en función de la importancia del tráfico de mercancías respecto a las ramas de viajeros. ■

REFERENCIAS/REFERENCES

- López Pita, A. (1999), *Economical analysis of the influence of mixed traffic on high speed lines*. Congreso Mundial sobre Investigación Ferroviaria, Tokio.
- López Pita, A. (1999), *Tilting trains and line construction*. Ministerio de Fomento, España.

out to be the travelling oh high speed trains generating vibrations of 20 to 25 mm/sec. Given that the freight train compositions generate, as previously mentioned speed of vibration of only 10 to 15 mm/sec. (Figure 4).

4. CONCLUSIONS

Based on the results shown, it verifies that the increase in the maintenance cost the commercial operations of specialized passenger trains together with conventional passenger trains composed of locomotives and carriages, and with the addition of modern freight wagons, it will be of between 2 an 20% more. It depends of the number of the freight trains and the passenger trains. ■

- López Pita, A. (1993), *Criterios de planificación de las nuevas infraestructuras ferroviarias*. Revista Situación del Banco de Bilbao, nº 3 y 4, pag. 37-64.
- López Pita, A. (1984), *Possibilities in the reduction of maintenance costs of the geometric quality of track, by means of adopting new criterions in its design*. XVI Congreso Ferroviario Panamericano. EE.UU. Washington, D.C. 116-133.