



Comparación de la velocidad de paso por curva en trazados carreteros y ferroviarios

Apellidos, nombre	Salvador Zuriaga, Pablo (pabsalzu@cam.upv.es) Villalba Sanchis, Ignacio (igvilsan@cam.upv.es) Pérez Zuriaga, Ana María (anpezu@tra.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este documento se realiza una comparativa entre las velocidades máximas de paso por curva, tanto para vehículos ferroviarios de diferentes tipos como para vehículos de carretera. Esta comparativa sirve para realizar una serie de reflexiones sobre la homogeneidad –o falta de ella– a la hora de establecer los criterios de confort en un modo u otro. También permite comparar en qué rangos de radios de curvaturas, como medida indirecta de la adaptabilidad al territorio, resulta más atractivo cada modo de transporte.

2 Introducción

La construcción y mejora de infraestructuras de transporte, especialmente las lineales (carreteras, ferrocarriles, ductos, etc.) exige fuertes inversiones a causa de su gran envergadura. Además, el periodo de vida útil de dichas infraestructuras suele ser bastante elevado, superando en algunos casos el siglo de vida. Esto da como resultado la necesidad de planificar concienzudamente la inversión en infraestructuras, ante un escenario de escasez o limitación de recursos. Por este motivo, las administraciones competentes en materia de infraestructuras deberían tender hacia una mayor eficiencia en la asignación de recursos.

Uno de los aspectos que más encarece la construcción de infraestructuras lineales es la no adaptación a la orografía, lo que origina movimientos de tierras (desmontes, terraplenes, medias laderas, etc.) y estructuras (puentes, túneles, etc.). El volumen de obra por unidad de longitud depende en gran medida de la orografía y de la velocidad de proyecto de la infraestructura. Centrándonos en este último aspecto, a mayor velocidad de proyecto, se necesitan mayores radios de curvatura y, por lo tanto, la adaptación al terreno natural es más compleja y costosa. Ahora bien, dada una velocidad de proyecto, ¿se adapta con la misma facilidad una carretera que un ferrocarril?

En teoría, cualquier móvil circulando por una curva de radio y peralte determinados, a una velocidad dada, experimenta una fuerza centrífuga que viene dada por las ecuaciones de la cinemática, como luego veremos. En el caso de los vehículos, dicha fuerza centrífuga supone una falta de confort para el viajero que se desplaza en ellos, por lo que el valor máximo que puede adoptar este parámetro está limitado en los proyectos de diseño de infraestructuras. A priori, podría parecer que la limitación de la aceleración centrífuga debería ser la misma independientemente de que el viajero viaje por carretera o por ferrocarril. No obstante, en los próximos apartados veremos que no es exactamente así.

3 Objetivos

El objetivo principal de este artículo es comparar las velocidades máximas de paso por curva en carreteras y en ferrocarriles, para cada radio de curvatura. Con ello, el alumno será capaz de:

- Manejar los parámetros básicos del trazado en planta de infraestructuras de transporte lineales

- Desarrollar un pensamiento crítico sobre la idoneidad de establecer determinadas velocidades de proyecto en determinados tipos de infraestructuras

4 Desarrollo

Cuando un vehículo pasa de una alineación recta a una curva con insuficiencia de peralte, éste, desde el punto de vista del propio vehículo, experimenta una aceleración centrífuga. Dicha aceleración se denomina “aceleración sin compensar” o “aceleración no compensada por el peralte” y se obtiene gráficamente a partir de la composición de fuerzas mostrada en la Figura 1. W es el peso del vehículo y F_{sc} es la fuerza centrífuga sin compensar, al ser el peralte real inferior al teórico (el necesario para compensar toda la fuerza centrífuga).

En el diseño de trazados ferroviarios, este parámetro es básico debido a que es el que determina la velocidad máxima de paso por la curva. Éste es un criterio de confort, ya que se entiende que, si un vehículo está sometido a aceleraciones superiores a dichos valores, los viajeros experimentarán un viaje incómodo y una falta de confort.

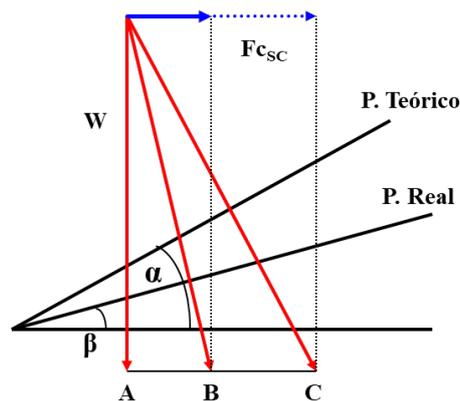


Figura 1. Esquema de fuerzas que dan lugar a la aceleración sin compensar.

En ingeniería de carreteras, la Norma 3.1-IC (2016) sobre trazado define el término “velocidad específica” de un elemento a la velocidad que puede mantener un vehículo a lo largo de una curva circular considerada aisladamente, en condiciones de comodidad y seguridad. Esta velocidad máxima viene determinada por el radio, el peralte, que a su vez es función del radio, y el coeficiente de rozamiento transversal movilizado entre el neumático y el pavimento.

Dada una curva con un determinado radio, ¿crees que la velocidad máxima es la misma en el ferrocarril que en la carretera?



4.1 Criterio empleado en ferrocarriles

La Norma de Adif sobre trazado (NAV 2-0-0.0, NAV 2-0-3.0 y N.F.I. Vía 002) relaciona la aceleración máxima sin compensar al paso por una curva con el radio y la velocidad mediante la siguiente expresión, derivada del esquema del gráfico 1.

$$a_{sc} = \frac{v_M^2}{R} - \frac{h_p \cdot g}{s}$$

Ecuación 1. Evaluación de la aceleración sin compensar.

Donde a_{sc} es la aceleración sin compensar, v_M es la velocidad del tren más rápido, R es el radio de la curva, h_p es el peralte materializado en la vía, g es la aceleración de la gravedad y s es la distancia entre ejes de carriles.



Cabe resaltar que, en ingeniería ferroviaria, el peralte se define como la distancia en vertical entre el hilo alto y el hilo bajo. Por lo tanto, tiene unidades de longitud.

Según el tipo de tren, la a_{sc} se limita a 0,65, 1 ó 1,2 m/s^2 (trenes tipo N, A o B, respectivamente). Así, dada una curva con un determinado radio y peralte, la velocidad de paso será mayor cuanto mayor sea la a_{sc} del tren. Del mismo modo, los peraltes máximos vienen estipulados por la norma y son los que figuran a continuación:

- Ancho de vía ibérico (1.668 mm): 160 mm (9,2 %)
- Ancho de vía métrico (1.000 mm): 110 mm (10,3 %)

Como se observa, en todos los casos suponen una pendiente transversal del 9-10 %.

4.2 Criterio empleado en carreteras

La Norma 3.1-IC (2016) sobre trazado clasifica las carreteras en tres grupos:

- Grupo 1: Autovías y autopistas con velocidad de proyecto 140 y 130 km/h (A-140 y A-130)
- Grupo 2: Autovías y autopistas con velocidad de proyecto 120, 110, 100, 90 y 80 km/h (A-120, A-110, A-100, A-90 y A-80) y carreteras convencionales con velocidad de proyecto 100 km/h (C-100)
- Grupo 3: Carreteras convencionales con velocidad de proyecto inferior a 100 km/h (C-90, C-80, C-70, C-60, C-50 y C-40)

En este caso, los peraltes máximos vienen estipulados en la siguiente tabla:

Grupo	Radio (m)	Peralte (%)
1	$850 \leq R \leq 1050$	8
	$1050 \leq R \leq 5000$	$8-7.96 \cdot (1-1050/R)^{1.2}$
	$5000 \leq R < 7500$	2
	$7500 \leq R$	Bombeo
2	$250 \leq R \leq 700$	8
	$700 \leq R \leq 5000$	$8-7.3 \cdot (1-700/R)^{1.3}$
	$5000 \leq R < 7500$	2
	$7500 \leq R$	Bombeo
3	$50 \leq R \leq 350$	7
	$350 \leq R \leq 2500$	$7-6.65 \cdot (1-350/R)^{1.9}$
	$2500 \leq R < 3500$	2
	$7500 \leq R$	Bombeo

Tabla 1. Relación entre radio y peralte máximo en carreteras.

Por otra parte, la norma indica que, al circular un vehículo por una determinada curva a la velocidad máxima, no deberá movilizarse más rozamiento del estipulado en la siguiente tabla:

V_e (km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
f_t	0,180	0,166	0,151	0,137	0,122	0,113	0,104	0,096	0,087	0,078	0,069

Tabla 2. Relación entre velocidad máxima y máximo coeficiente de rozamiento movilizado.

Como resultado de la combinación de ambas tablas, la norma ofrece la siguiente tabla, en la que se indica, para cada velocidad, el radio mínimo y el peralte máximo permitidos, correspondientes a las diferentes velocidades de proyecto:

Velocidad (km/h)	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
	Radio (m)	Peralte (%)	Radio (m)	Peralte (%)	Radio (m)	Peralte (%)
40					50	7,00
50					85	7,00
60					130	7,00
70					190	7,00
80			250	8,00	265	7,00
90			350	8,00	350	7,00
100			450	8,00		
110			550	8,00		
120			700	8,00		
130	850	8,00				
140	1050	8,00				

Tabla 3. Relación entre velocidad de proyecto, radio mínimo y peralte máximo para las carreteras de los grupos 1, 2 y 3.

4.3 Comparación de ambos criterios

A partir de la ecuación 1 para el caso de los ferrocarriles y de la Tabla 3 para las carreteras, es posible comparar, para un radio de curvatura determinado, la máxima velocidad a la que se puede circular en cada caso. De este modo, se observa el grado de "eficiencia" en la adaptación al terreno de cada modo. Los resultados se muestran en la figura 2, donde se representa el ferrocarril de ancho métrico, el ferrocarril de ancho ibérico con trenes tipo N y tipo A y las carreteras de los grupos 1, 2 y 3:

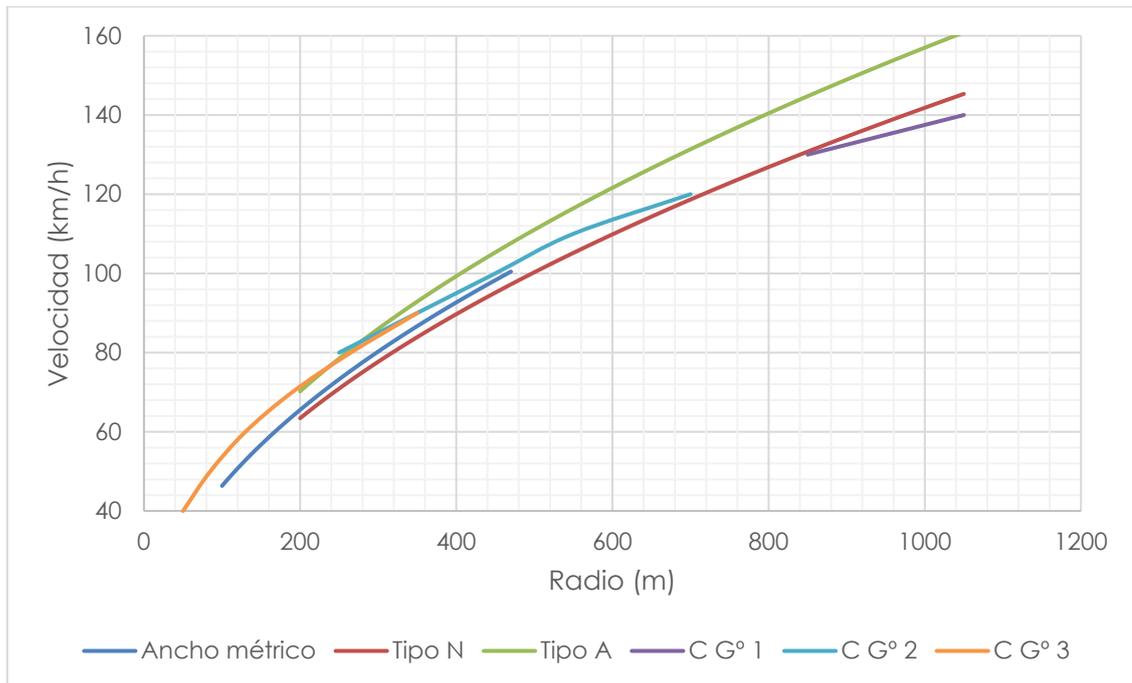


Figura 2. Comparación de velocidades máximas distintos tipos de ferrocarril y en carreteras de ambos grupos.

En esta figura, el menor radio que se ha considerado para el ferrocarril ha sido de 100 m. A partir de este valor y hasta 200 m únicamente se ha considerado el ferrocarril de ancho métrico por ser el único que permite radios tan reducidos. En el mismo sentido, el ancho métrico sólo se ha representado hasta 100 km/h por ser este el valor límite que se maneja en este tipo de explotaciones ferroviarias.

Se observa cómo, para radios reducidos (< 300 m), la velocidad en carretera es mayor que en ferrocarril, pese a que éste último adopta un peralte mayor. Para radios superiores a 300 m, los trenes tipo A (relativamente modernos) podrían desarrollar velocidades superiores a las de la carretera, siempre y cuando las curvas de acuerdo entre recta y curva lo permitan.

Comparando el ferrocarril convencional de ancho ibérico y de ancho métrico, compuesto históricamente por trenes tipo N, con las carreteras del grupo 2, la velocidad de paso por curva solo se iguala para radios superiores a 500 - 600 m. Esto se produce a una velocidad entre 100 y 110 km/h, valor que hoy en día no es alcanzable por la carretera por temas legales (el límite en España es de 90 km/h). Precisamente es en el rango de radios comprendido entre los 100 y los 500 m donde, a igualdad de radio, la carretera puede desarrollar velocidades que superan en 10 km/h la velocidad del ferrocarril convencional.

Comparando ahora los trenes tipo N con las carreteras del grupo 1, se observa que las velocidades se igualan para un radio de unos 850 m, lo que corresponde a una velocidad aproximada de 130 km/h, de nuevo por encima del límite legal de la carretera.



¿Qué ocurriría si empleásemos el criterio de aceleración sin compensar al diseño de carreteras? ¿Por qué crees que los criterios en carreteras y ferrocarriles no son consistentes?

Si aplicamos la ecuación 1 a la carretera, obtenemos que la aceleración sin compensar en las carreteras del grupo 3 abarca desde los 1,78 m/s² para 40 km/h



hasta los 1,1 m/s² para 90 km/h. Para los grupos 2 y 1, el valor se va reduciendo progresivamente, desde los 1,2 m/s² para 80 km/h hasta los 0,65 m/s² para 140 km/h.



De este modo, se comprueba que, en los rangos de velocidad donde ambos modos son comparables (< 100 - 120 km/h), la carretera, a igualdad de radio, permite desarrollar velocidades que superan a las del ferrocarril hasta en 10 km/h. Únicamente mediante la adopción de trenes tipo A, con mejor diseño de la suspensión, se permitiría aumentar la velocidad de paso por curva en el ferrocarril.

Importante!

Este hecho contribuye a explicar la mayor competitividad de la carretera frente al ferrocarril en trazados sinuosos y con curvas de radio reducido.

5 Cierre

A lo largo de este artículo docente se han descrito y comparado los criterios adoptados en la carretera y en el ferrocarril para el cálculo de la velocidad al paso por una curva. Mientras que en el ferrocarril se basa en un criterio de confort, limitando la aceleración sin compensar, la carretera se basa en la limitación del coeficiente de rozamiento transversal, que incluye implícitamente el confort y la seguridad. Se observa que, para radios inferiores a 600 m la carretera admite mayores velocidades, mientras que, para radios superiores a 900 m, sucede lo contrario.

6 Bibliografía

Norma 3.1-IC. Trazado. Ministerio de Fomento (2016)

Norma Adif Vía 0-2-0.0. Geometría de la vía. Parámetros geométricos. Renfe (1988)

Norma Adif Vía 0-2-3.0. Geometría de la vía. Determinación de las velocidades máximas admisibles por trazado. Ancho nominal 1668 mm y velocidades hasta 220 km/h. Renfe (2003)

N.F.I. Vía 002. Parámetros geométricos. Feve (1999)