



# Geometría y trazado del ferrocarril

Ferrocarriles

**Luigi dell'Olio**  
**Borja Alonso Oreña**  
**José Luis Moura Berodia**

Este tema se publica bajo Licencia:  
Creative Commons BY-NC-SA 4.0.



# Generalidades

---

- **Fuerza Centrifuga:**

- Al salir de una alineación recta y entrar en una curva circular se genera una fuerza lateral que llamamos **Fuerza Centrifuga** ( $F_c$ ).

$$F_c = m \cdot \alpha_c = \frac{m \cdot V^2}{R} \quad \text{donde: } \alpha_c = \frac{V^2}{R}$$

- m: es la masa del tren.
- V: es la velocidad del tren.
- R: es el radio de la curva circular.

- **Aceleración Centrifuga ( $\alpha_c$ ):**

- Para un tren que viaja a 100 KM/h en una curva de 350 m vale 2,2 m/s<sup>2</sup>.
- La aceleración máxima aceptada por un viajero es de 1 m/s<sup>2</sup>.

Para reducir esta aceleración se actúa sobre el peralte y curvas de transición.

# Aceleración Centrifuga

---

- **Efectos sobre el material rodante:**

- A la entrada y salida de las **curvas** se producen **esfuerzos transversales y choques de la rueda contra el carril**, que unidos a los **movimientos de lazo** pueden originar descarrilamientos e incluso vuelcos si la velocidad es elevada.
- Un **trabajo** excesivo de la **suspensión** de los vehículos obliga a unos costes de conservación importantes.

- **Efectos sobre la vía:**

- Desgaste desigual en los dos carriles.
- Ripado transversal de la vía.
- Trabajo excesivo de las sujeciones.
- Tendencia al vuelco del carril exterior.

- **Efectos sobre viajeros y mercancías:**

- Incomodidad de los viajeros.
- Posible desplazamiento de la carga en el transporte de mercancías.

Para evitar estos efectos desfavorables, **se eleva el carril exterior respecto al interior**, de forma que la resultante de las fuerzas que actúan sobre la masa del vehículo queda situada en la perpendicular al plano de la vía, desapareciendo así cualquier aceleración lateral perturbadora para la circulación.

# Peralte

---

El peralte puede expresarse de dos formas diferentes:

- **Sobreelevación del hilo bajo respecto del hilo alto, medida en milímetros.**
  - Este es el criterio que se ha utilizado siempre en España. Expresando el peralte mediante sobreelevaciones será necesario definir **valores distintos para insuficiencia, exceso y valor máximo del peralte**, dependiendo del ancho de vía utilizado.
  - En **vías con tercer carril** será necesario definir **dos sobreelevaciones diferentes** (una para cada ancho de vía), cuando bastaría con definir la inclinación transversal, que es común a los dos anchos de vía.
  - Cuando se establecen **sobreanchos** en la vía es **necesario aumentar la sobreelevación**, para poder conseguir la inclinación transversal que contrarresta la fuerza centrífuga. En estos casos los valores de peralte admisibles (insuficiencia, exceso y valor máximo del peralte) serán algo inferiores a los definidos cuando no hay sobreancho, precisamente en curvas de radio reducido que necesitan peralte máximo para conseguir la mayor velocidad posible.
  - **La sobreelevación tiene siempre un valor positivo.** Por tanto, en listados y diagramas es necesario siempre aportar información adicional para conocer hacia qué lado se inclina la vía.

# Peralte

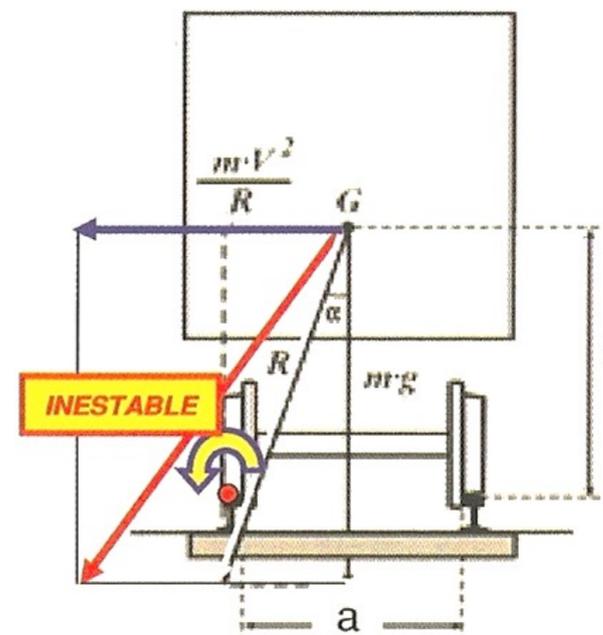
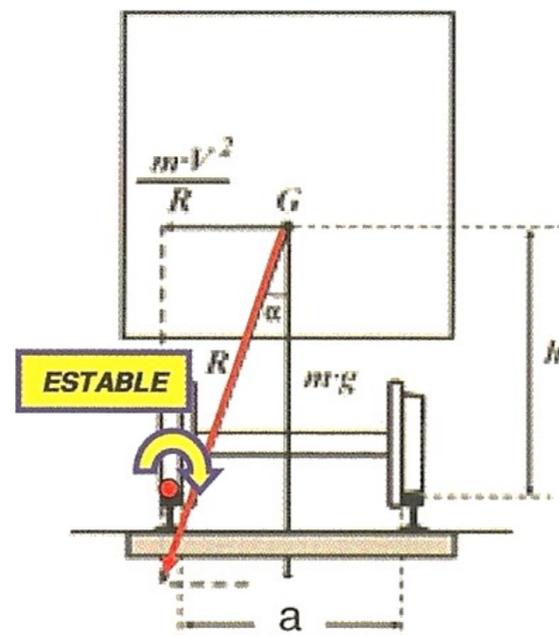
---

- **Inclinación transversal, medida en %.**

- Los valores del peralte se definen con **independencia del ancho de vía**. De esta forma, pueden considerarse los mismos criterios de insuficiencia, exceso y valor máximo del peralte en cualquier ancho de vía en el que se esté trabajando.
- El **signo del peralte** se considerará **positivo cuando la curva correspondiente tenga un radio positivo**, es decir, cuando la **curva** sea a **derechas**. Será negativo en caso contrario.
- Vemos que en el **caso español** sería **más conveniente** definir el peralte mediante la **inclinación transversal** de la vía que mediante sobreelevaciones.
- Sin embargo, en el ámbito internacional se trabaja con sobreelevaciones, por lo que no sería positivo romper la unidad de criterio establecida.

# Peralte

- Si en una curva los carriles estuvieran en un plano horizontal la  $F_c$  empujaría el tren hacia fuera y habría una distribución desigual de cargas entre los carriles. Peligro de descarrilo, rodadura incomoda, grandes aceleraciones laterales, falta de confort.
- Es necesario inclinar el plano de la vía hacia el interior, para que la resultante de la  $F_c$  y el peso  $W$  caiga lo más próxima al eje de la vía y siempre entre las ruedas, para que el momento de vuelco sea resistido por la reacción de la rueda exterior



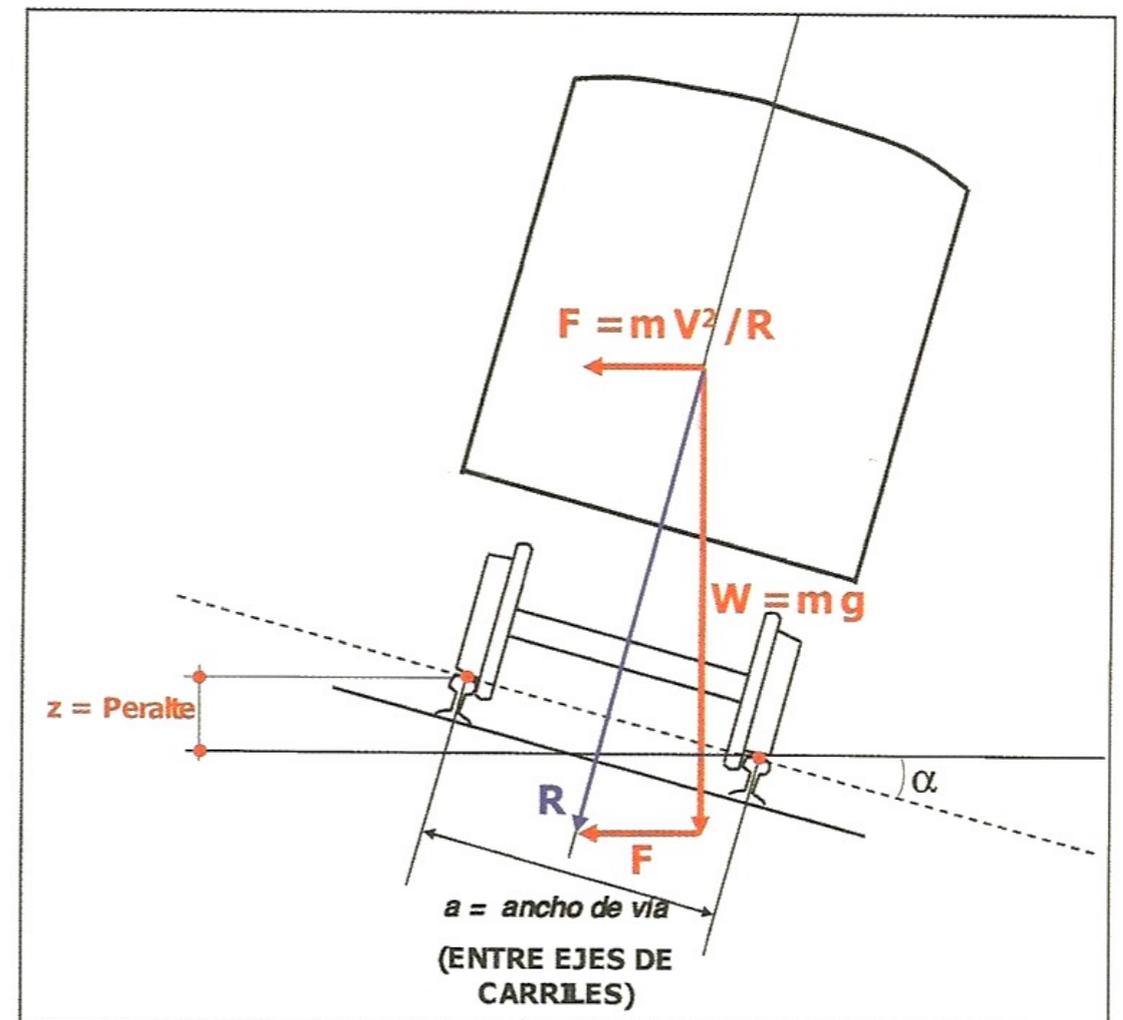
# Peralte Teórico

- Se define el **peralte** como el desnivel **z** entre carriles, medido en una sección normal al eje de vía.
- Si se coloca un peralte que equilibra totalmente la **F<sub>c</sub>**, la resultante **R** (de **F<sub>c</sub>** y **W**) será normal al plano de la vía (**Peralte Teórico**).

La tangente del ángulo del peralte:

$$\tan \alpha = \frac{F_c}{W} = \frac{m \cdot \frac{V^2}{R}}{m \cdot g} = \frac{V^2}{g \cdot R}$$

$$\sin \alpha = \frac{z}{a} \rightarrow \tan \alpha = \frac{z}{\sqrt{a^2 - z^2}}$$



# Peralte

---

- El ancho de vía  $a$  en el caso de **RENFE** y con carril **UIC 60** (72 mm ancho de cabeza):

$$a = 1,668 + 0,072 = 1,740 \text{ m}$$

- En el caso de un **metro** con ancho de 1,445 m y con carril **UIC 54** (70 mm)

$$a = 1,445 + 0,070 = 1,515 \text{ m}$$

- Igualando las dos expresiones (la del polígono de fuerzas y del peralte) obtenemos el peralte exacto que necesita un tren de velocidad  $V$  en una curva de radio  $R$  para anular la  $F_c$ .

$$\frac{V^2}{g \cdot R} = \frac{z}{\sqrt{a^2 - z^2}} \rightarrow z = \frac{a \cdot V^2}{\sqrt{g^2 \cdot R^2 + V^4}}$$

# Peralte

---

- Para un AVE a 300 Km/h (83,3 m/s), con un radio de curvatura de 7000 m y ancho internacional  $a = 1,435 + 0,072 = 1,507$  el peralte necesario será:

$$z = \frac{a \cdot V^2}{\sqrt{g^2 \cdot R^2 + V^4}} = \frac{1,507 \cdot (83,3)^2}{\sqrt{(9,8)^2 \cdot 7000^2 + (83,3)^4}} = 0,1516m$$

- El ángulo:

$$\sin \alpha = \frac{z}{a} = \frac{0,1516}{1,507} = 0,1006 \rightarrow \alpha = 5,77^\circ$$

# Peralte

---

- Antiguamente se aproximaba el **sin** a la **tan**:

$$\sin \alpha \cong \tan \alpha = \frac{z}{a} \rightarrow \frac{z}{a} = \frac{V^2}{g \cdot R} \rightarrow z = \frac{a \cdot V^2}{g \cdot R} \rightarrow z_{t,max} = \frac{a \cdot V_{max}^2}{g \cdot R}$$

- De aquí derivan las formulas aproximadas que se han ido utilizando en España con **z** (mm), **a** (m), **g** (m/s<sup>2</sup>), **V** (Km/h) y **R** (m):

$$\frac{z}{1000} = \frac{a}{g} \cdot \left( \frac{1000}{3600} \right)^2 \cdot \frac{V^2}{R}$$

$$z = 13,7 \cdot \frac{V^2}{R} \quad \text{ancho } \mathbf{RENFE} \quad (a = 1,668 + 0,070)$$

$$z = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad \text{ancho } \mathbf{UIC} \quad (a = 1,435 + 0,070)$$

# Aceleración sin compensar

---

- En una curva de radio  $R$ , dependiendo de la velocidad de circulación habrá trenes que experimenten una insuficiencia de peralte y otros que experimenten un exceso de peralte.
- **Ej. Curva de 1.000 m, vía de ancho RENFE ( $a=1,668+0,072=1,740\text{m}$ ):**

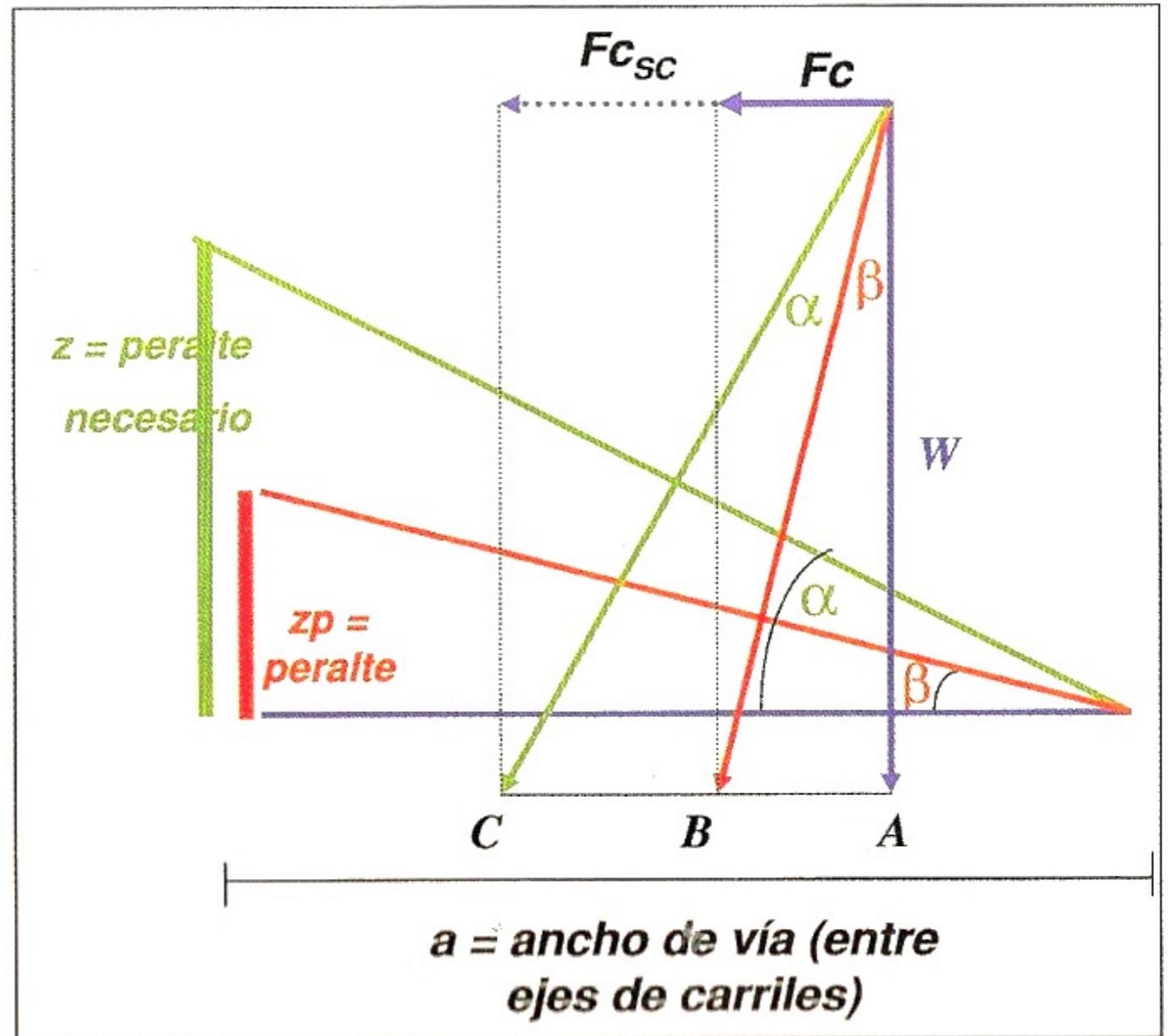
TALGO a 160 Km/h  $z = 350 \text{ mm}$

Tren mercancías a 80 Km/h  $z = 88 \text{ mm}$

Es necesaria una solución de compromiso.

# Aceleración sin compensar

- Supongamos que el tren necesita el ángulo de peralte  $\alpha$  (altura  $z$ ) y dispone solamente de  $\beta$  (altura  $z_p$ ).
- Siendo la **fuerza centrífuga total** equivalente al segmento **AC**, el peralte compensa solamente parte de dicha fuerza correspondiente al segmento **AB** ( $F_c$ ).



# Aceleración sin compensar

La fuerza centrífuga sin compensar será  $F_{c,sc}$  correspondiente al segmento **BC**

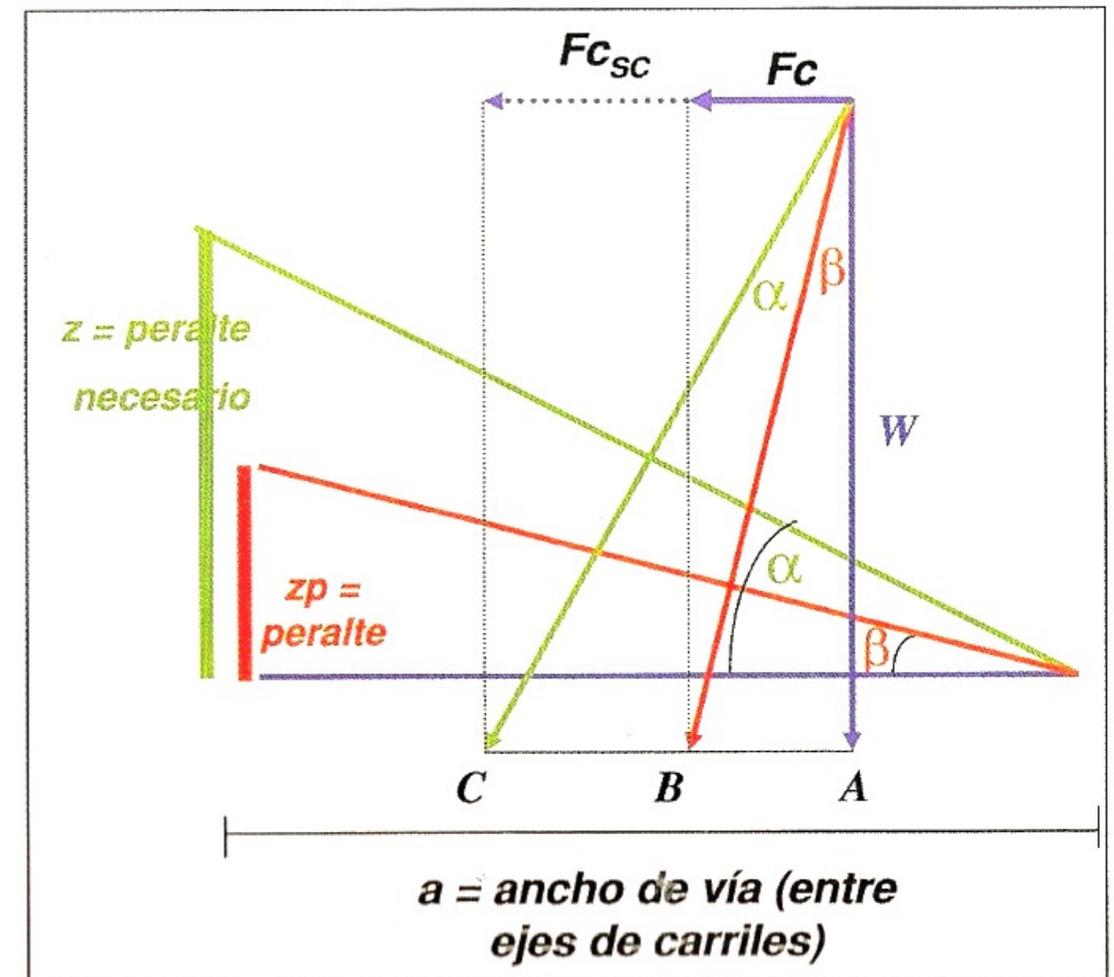
$$F_{c,sc} = BC = AC - AB = W \cdot \tan \alpha - W \cdot \tan \beta$$

$$F_{c,sc} = W \cdot \left[ \frac{F_c}{W} - \frac{z_p}{a} \right] = m \cdot g \cdot \left[ \frac{m \cdot V^2}{m \cdot g \cdot R} - \frac{z_p}{a} \right]$$

$$= m \cdot \left[ \frac{V^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a} \right]$$

Por lo tanto la **aceleración sin compensar**  $\alpha_{sc}$ :

$$\alpha_{sc} = \frac{V^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a}$$



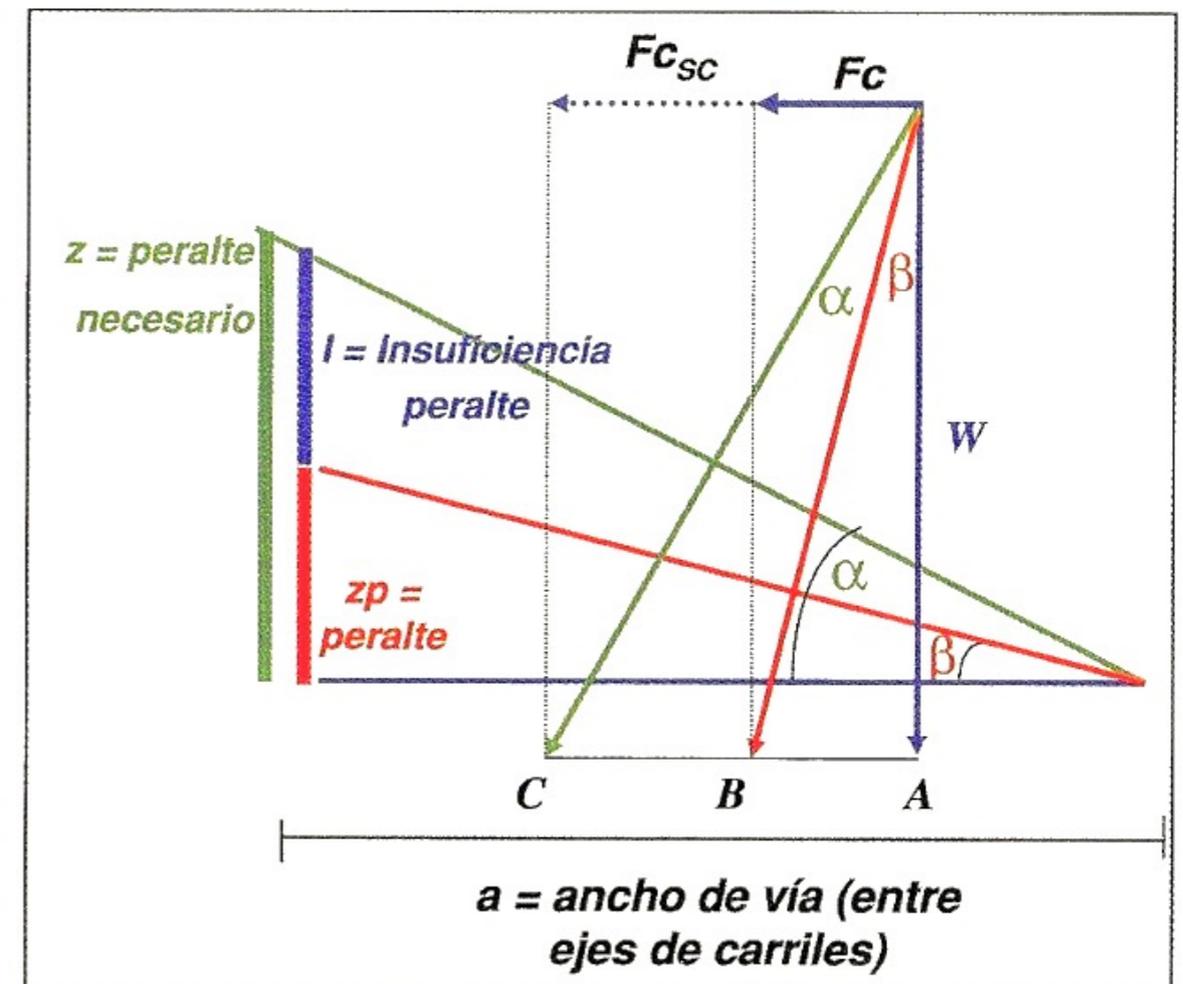
# Insuficiencia de peralte

- Si se tiene un peralte  $z_p$  que no equilibra totalmente la fuerza centrífuga, la diferencia hasta el peralte necesario  $z$  se llama **insuficiencia de peralte** ( $I$ ).

$$\tan \alpha = \frac{F}{W} = \frac{m \cdot \frac{V^2}{R}}{m \cdot g} = \frac{V^2}{g \cdot R}$$

$$\sin \alpha = \frac{z_p + I}{a} \approx \tan \alpha$$

Si  $\alpha$  es pequeño



# Insuficiencia de peralte

Igualando: 
$$\tan \alpha = \frac{F}{W} = \frac{m \cdot \frac{V^2}{R}}{m \cdot g} = \frac{V^2}{g \cdot R} \approx \sin \alpha = \frac{z_p + I}{a}$$

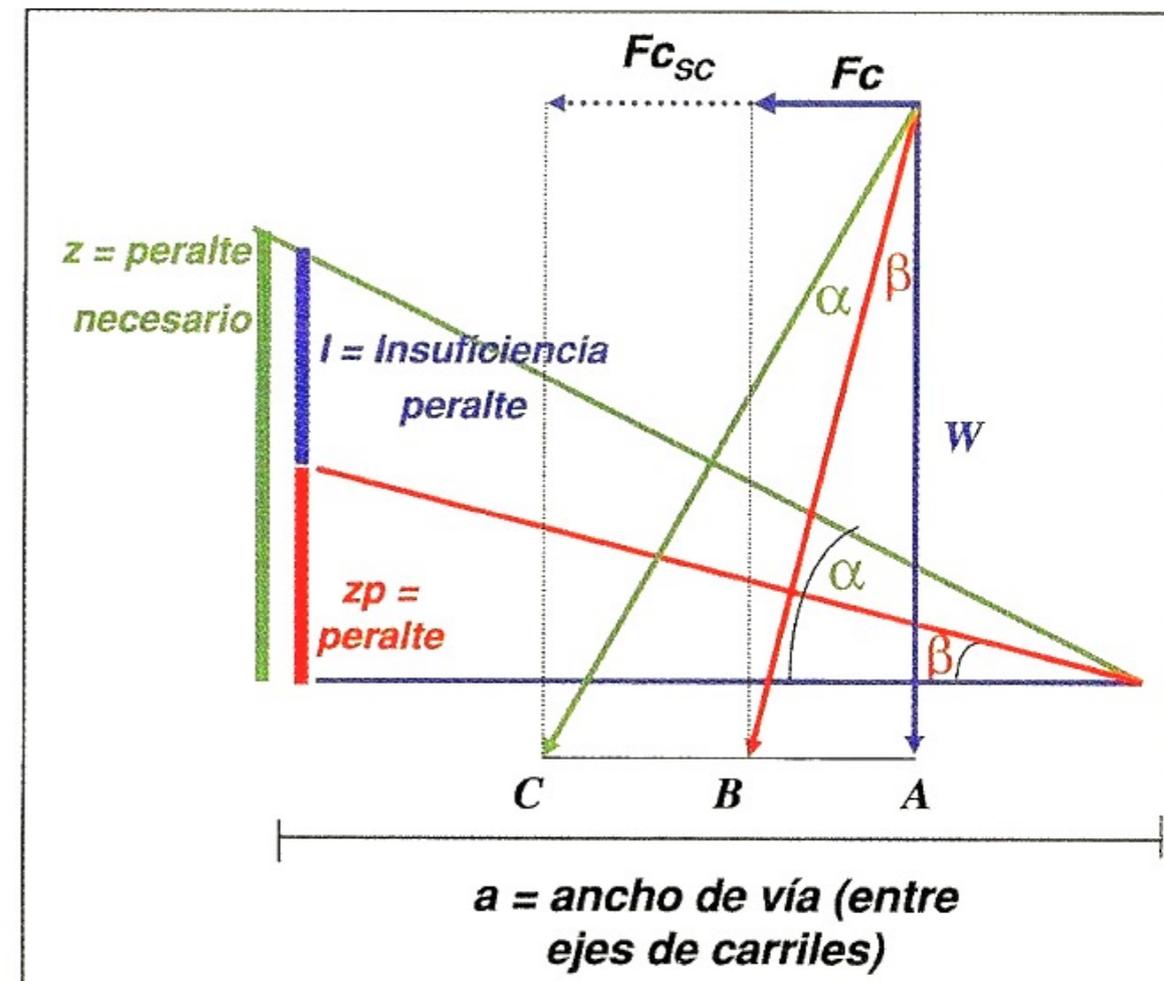
$$\frac{z_p + I}{a} \approx \frac{V^2}{g \cdot R} \rightarrow I = \frac{a \cdot V^2}{g \cdot R} - z_p = z_{t,max} - z_p$$

• Siendo:

$$\alpha_{sc} = \frac{V^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a}$$

Multiplicando por **a** y dividiendo por **g**:

$$I = \alpha_{sc} \cdot \frac{a}{g}$$



# Exceso de peralte

- En este caso siendo  **$E$**  el **exceso de peralte**:

$$\frac{z - E}{a} = \frac{V^2}{g \cdot R}$$

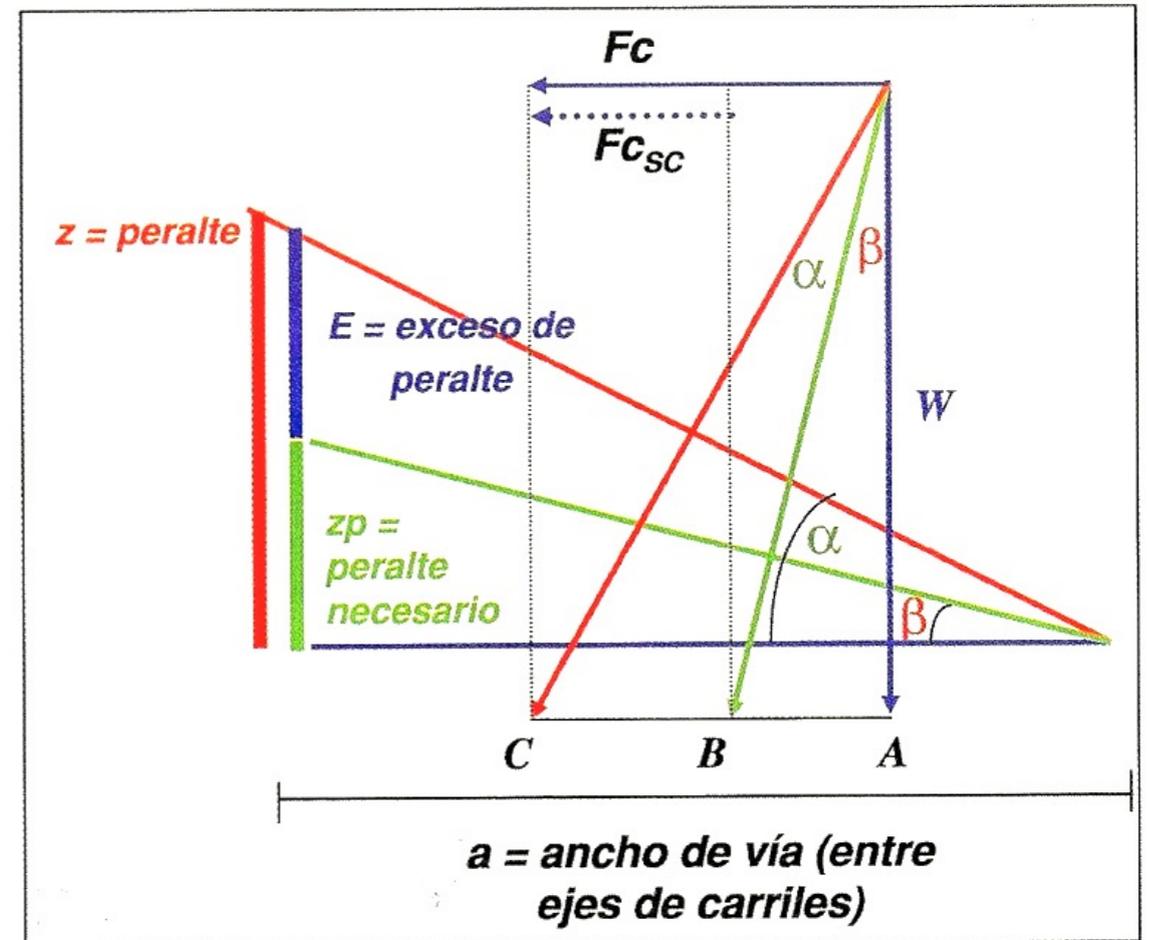
El Exceso de peralte crea una aceleración

Transversal no compensada  $\alpha_{sc}$  hacia

el interior de la curva:

$$E = \frac{\alpha_{sc} \cdot a}{g}$$

En general los trenes lentos son los de mercancías donde no es necesario limitar la  $\alpha_{sc}$  puesto que no se necesita confort



# Peralte practico

---

## **Trafico heterogéneo**

En una vía con tráfico heterogéneo deberá tomarse una **solución de compromiso** para el establecimiento del peralte.

Dicha solución debe tener en cuenta la **naturaleza y composición del tráfico** que circula por la vía y debe tratar de evitar que los excesos o insuficiencias en el peralte perjudiquen la marcha de los trenes, creen problemas en la vía y produzcan situaciones incómodas en los viajeros.

En España se suele usar en estos casos como valor del peralte practico:

$$z_p = \frac{2}{3} \cdot z_t$$

# Peralte practico

---

## Trafico heterogéneo

Criterios:

1.  $z_p = \frac{2}{3} \cdot z_t$

$$z = 13,7 \cdot \frac{V_{max}^2}{R} \cdot \frac{2}{3} \approx 9 \cdot \frac{V_{max}^2}{R} \quad \text{ancho } \mathbf{RENFE}$$

$$z = 11,8 \cdot \frac{V_{max}^2}{R} \cdot \frac{2}{3} \approx 8 \cdot \frac{V_{max}^2}{R} \quad \text{ancho } \mathbf{UIC}$$

2.  $z_p$  obtenida para  $V = 0,8 \cdot V_{max}$

3.  $z_p$  obtenida para  $V = \sqrt{\frac{V_{max}^2 + V_{min}^2}{2}}$

$$4. V = \sqrt{\frac{\sum_m V_m^2 \cdot N_m}{\sum_m N_m}}$$

Donde:

$V_m$  es la velocidad de marcha de cada categoría de trenes m

$N_m$  es el numero de trenes de cada categoría m

# Limitaciones de los valores del peralte

---

Las **limitaciones más estrictas** que se imponen sobre el peralte son aquellas que *se refieren a la comodidad del viajero* y en cambio son de **menor importancia**, afortunadamente, otras derivadas de los *problemas que se pueden causar a los vehículos o a la vía*.

Existen varios tipos de trenes.

Los tipos son actualmente cuatro, cada uno de los cuales representa un valor máximo de la aceleración trasversal no compensada admitida:

- **Tipo "Normal"**  $0,65 \text{ m/s}^2$  (sin letra de complemento de la velocidad máxima).
- **Tipo A**  $1 \text{ m/s}^2$ .
- **Tipo B**  $1,2 \text{ m/s}^2$ .
- **Tipo C**  $1,5 \text{ m/s}^2$ .
- **Tipo D**  $1,8 \text{ m/s}^2$ .

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## Trenes rápidos

Se ha comprobado de forma experimental que la limitación impuesta por la **comodidad del pasajero** es **más restrictiva** que la **limitación debida al vuelco del vehículo**. Respetándose las normas relativas a la comodidad de los viajeros se obtienen **coeficientes de seguridad al vuelco elevados** (6, 8, 10).

En una curva la comodidad del pasajero queda condicionada por la aceleración sin compensar sobre el viajero.

Para evaluar la **aceleración sin compensar soportada por el viajero** es necesario tener en cuenta la **suspensión del vehículo**. La suspensión se dispone para aliviar al viajero de los efectos de las vibraciones y aceleraciones aleatorias.

En **curva** la existencia de la suspensión causa problemas, pues por efecto de la aceleración transversal se comprime el sistema amortiguador exterior y se alarga el interior, con lo que se **reduce de manera efectiva el peralte  $z$** , dando lugar a una aceleración no compensada mayor que la que teóricamente debería presentarse.

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## Trenes rápidos

Para cuantificar este **efecto de la suspensión** se establece el denominado “**coeficiente de flexibilidad**” (**s**). Limitado actualmente por la UIC al valor máximo de **s = 0,4** (vehículos blandos) presentó en el pasado valores de hasta 0,6 en coches que todavía circulan en muchas redes ferroviarias.

**La mayoría de los vehículos modernos, a carga llena, tienen un coeficiente de flexibilidad de la suspensión del orden de 0,4.**

Si a modo de ejemplo aplicamos a algunos casos las condiciones de comodidad para el viajero se obtienen ciertos valores que resultan ser representativos de las insuficiencias de peralte admitidas en distintas redes ferroviarias. La expresión general a tener en cuenta es:

$$\alpha_{sc} \cdot (1 + s) = \frac{V^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a} \cdot (1 + s) < \alpha_{sc, viajero}$$

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## Trenes rápidos

- **Normativa para la máxima aceleración sin compensar admisible:**

El valor máximo de aceleración sin compensar admitido por **ADIF** es:

Para **Trenes Normales** se admite una aceleración sin compensar máxima de  $\alpha_{sc} = 0,65$  ***m/s<sup>2</sup>***.

Para **Trenes Tipo A** se admite una aceleración sin compensar máxima de ***1,00 m/s<sup>2</sup>***.

Para **Trenes Tipo B** (TALGO pendular), la aceleración sin compensar máxima admisible es de ***1,20 m/s<sup>2</sup>***.

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## Trenes rápidos

- **Normativa para la máxima insuficiencia de peralte admisible:**

El valor máximo de insuficiencia de peralte admitido es de  $l = 115 \text{ mm}$ .

Para **Trenes Tipo A** se admite una insuficiencia de peralte máxima de  $175 \text{ mm}$  (los valores con  $l = 175 \text{ mm}$  deberán estar aplicados a un máximo del 15% de las curvas de cada trayecto).

Para **Trenes Tipo B** (TALGO pendular), la insuficiencia de peralte máxima admisible es de  $210 \text{ mm}$ .

# Limitaciones de los valores del peralte

Trenes rápidos

- Normativa para la máxima insuficiencia de peralte admisible:

Norma europea ENV 13803-1: Se establecen los siguientes valores máximos:

<b>MÁXIMA INSUFICIENCIA DE PERALTE I (mm) - ENV 13803-1</b>									
Categorías de tráfico		Ancho de vía 1,435 m				Ancho de vía 1,668 m			
		Valores máximos recomendados (1)		Valores máximos permitidos		Valores máximos recomendados (1)		Valores máximos permitidos	
		Mercancías	Viajeros	Mercancías	Viajeros	Mercancías	Viajeros	Mercancías	Viajeros
I: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 80 y 120 Km/h.	R < 650 m	110	130	130	160	125	150	150	185
	R = 650 m	110	150	130	165	125	170	150	190
IIa: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 120 y 160 Km/h.		110	150	160 <sup>(4)</sup>	165	125	170	185	190
IIb: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 160 y 200 Km/h.		110	150	160 <sup>(4)</sup>	165	125	170	185	190

# Limitaciones de los valores del peralte

MÁXIMA INSUFICIENCIA DE PERALTE I (mm) - ENV 13803-1									
Categorías de tráfico		Ancho de vía 1,435 m				Ancho de vía 1,668 m			
		Valores máximos recomendados (1)		Valores máximos permitidos		Valores máximos recomendados (1)		Valores máximos permitidos	
		Mercancías	Viajeros	Mercancías	Viajeros	Mercancías	Viajeros	Mercancías	Viajeros
III: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 200 y 300 Km/h.	$200 < v \leq 250$	100	100	150 <sup>(4)</sup>	150	115	115	170 <sup>(4)</sup>	170
	$250 < v \leq 300$	80	80	130 <sup>(3)</sup>	130 <sup>(3)</sup>	90	90	150 <sup>(3)</sup>	150 <sup>(3)</sup>
IV: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades hasta 230 Km/h (o 250 Km/h en las mejores líneas) con vehículos incorporando características técnicas especiales.	$v \leq 160$	110	160 <sup>(2)</sup>	160 <sup>(4)</sup>	180 <sup>(2)</sup>	125	185 <sup>(2)</sup>	185 <sup>(4)</sup>	205 <sup>(2)</sup>
	$160 < v \leq 200$	---	140	---	160	---	160	---	185
	$200 < v \leq 230$	---	120	---	160	---	135	---	185
	$230 < v \leq 250$	---	100	---	150	---	115	---	170
V: Líneas de tráfico de viajeros con velocidades máximas comprendidas entre 250 y 300 Km/h.	$v = 250$	---	100	---	150	---	115	---	170
	$v > 250$	---	80	---	130 <sup>(3)</sup>	---	90	---	150 <sup>(3)</sup>

## NOTAS:

- Al definir el trazado se deberá intentar mantener la insuficiencia de peralte 20 mm (25 mm con ancho 1,668 m) por debajo del valor máximo recomendado en ancho 1,435 m.
- Estos valores sólo son aplicables para situaciones con variaciones progresivas de la insuficiencia de peralte, en las que no haya discontinuidades, con velocidades superiores a 80 km/h.

(1) En vía con juntas, los valores de insuficiencia del peralte serán los especificados en el contrato.

(2) Estos valores sólo se aplicarán a vehículos con características mecánicas especiales.

(3) Se puede utilizar una insuficiencia de peralte de 150 mm (170 mm con ancho 1,668 m) en vía sin balasto para velocidades superiores a 250 Km/h.

(4) Estos valores sólo se aplicarán a vagones de mercancías con características mecánicas especiales, similares a las de los vehículos de viajeros.

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## *Trenes lentos*

Conocida la **velocidad mínima** de recorrido de los trenes en una curva se determina el **exceso de peralte**, que no debe superar un **valor máximo admisible**.

De existir un **equilibrio entre el número de trenes lentos y rápidos** y en el supuesto de que su efecto fuera análogo si la insuficiencia fuese  $I$ , bastaría limitar el exceso de peralte a  $E = I$  para obtener un equilibrio de esfuerzos y un desgaste similar en ambos carriles.

Si como ha sucedido en el pasado, **el número de trenes lentos es mayor que el de los rápidos**, los efectos sobre el carril interior podrían ser más acentuados si se utilizase  $I = E = 115$  mm y por ello se han limitado los valores máximos de  $E$  a 60-80-100 mm (para equilibrar dicho desgaste).

El problema, ahora, es que el predominio del tráfico de viajeros, al menos en su tendencia, comienza a ser patente.

# Limitaciones de los valores del peralte

## Trenes lentos

- Normativa para el máximo
- exceso de peralte admisible:

MÁXIMO EXCESO DE PERALTE E(mm) - N.R.V. 0-2-0.0.					
(T = Miles de TKBR/Día y Via)					
VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=200	200<v=250
NUEVAS LÍNEAS Y DESDOBLAMIENTO DE LÍNEAS ACTUALES CON MODIFICACIÓN DEL TRAZADO	T > 45	80	80	Viajeros ≤ 160 km/h: 60 Mercancías: 80	Viajeros ≤ 160 km/h: 60 Mercancías: 80
	25 < T ≤ 45	90	90	Viajeros ≤ 160 km/h: 70 Mercancías: 90	Viajeros ≤ 160 km/h: 70 Mercancías: 90
	10 < T ≤ 25	100	100	Viajeros ≤ 160 km/h: 90 Mercancías: 100	Viajeros ≤ 160 km/h: 90 Mercancías: 100
	T ≤ 10	110	110	Viajeros ≤ 160 km/h: 90 Mercancías: 110	Viajeros ≤ 160 km/h: 90 Mercancías: 110
MEJORA DE LÍNEAS ACTUALES POR OBRAS (Renovaciones y rehabilitaciones de vía)	T > 45	80	80	Viajeros: 60 Mercancías: 80	—
	25 < T ≤ 45	90	90	Viajeros: 70 Mercancías: 90	—
	10 < T ≤ 25	100	100	Viajeros: 90 Mercancías: 100	—
	T ≤ 10	110	110	Viajeros: 90 Mercancías: 110	—
VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=180	180<v=200
ADAPTACIÓN DE LÍNEAS ACTUALES PARA CIRCULACIÓN DE TRENES TIPO A SIN LIMITACIÓN DE VELOCIDAD	T > 45	Máximo: 80 Excepc: 105	Máximo: 80 Excepc: 105	Máximo: 80 Excepcional: 105 Viajeros ≤ 160 km/h: 60	Máximo: 80 Excepcional: 105 Viajeros ≤ 160 km/h: 60
	25 < T ≤ 45	Máximo: 90 Excepc: 115	Máximo: 90 Excepc: 115	Máximo: 90 Excepcional: 115 Viajeros ≤ 160 km/h: 70	Máximo: 90 Excepcional: 115 Viajeros ≤ 160 km/h: 70
	10 < T ≤ 25	Máximo: 100 Excepc: 125	Máximo: 100 Excepc: 125	Máximo: 100 Excepcional: 125 Viajeros ≤ 160 km/h: 90	Máximo: 100 Excepcional: 125 Viajeros ≤ 160 km/h: 90
	T ≤ 10	Máximo: 110 Excepc: 135	Máximo: 110 Excepc: 135	Máximo: 110 Excepcional: 135 Viajeros ≤ 160 km/h: 90	Máximo: 110 Excepcional: 135 Viajeros ≤ 160 km/h: 90
Expresión a utilizar: $E = 116 - 0,58 \cdot T$					
El valor excepcional deberá estar aplicado como máximo a un 15% de las curvas de cada tramo					

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## Trenes lentos

b) Norma europea ENV 13803-1

Se establecen los siguientes valores máximos (ancho 1,435 m):

- Valor máximo recomendado: **110 mm**.
- Valor máximo permitido: **130 mm**.

(En **trenes de viajeros** el valor máximo permitido es de **110 mm**).

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## *Trenes parados*

Si el tren se encuentra parado el viajero no sufre perturbaciones variables y por ello resultan admisibles valores de  $\alpha_{sc} \leq 1,5 \text{ m/s}^2$ .

Por otra parte, se comprueba experimentalmente que no hay problemas para poder producir fuerzas de rozamiento que permitan el arranque si la aceleración no compensada teórica es inferior a  $1 \text{ m/s}^2$ .

Por esta razón, el máximo peralte  $z_{M\acute{a}x}$  deberá verificar:

$$\alpha_{sc} = \frac{g \cdot z_{max}}{a} - \frac{V^2}{R} < 1 \text{ m/s}^2 \qquad V = 0 \rightarrow z_{max} = \frac{a}{g}$$

Para ancho de vía **1,668** m esta expresión indica que podría permitirse un valor para  $z_{max} = 178 \text{ mm}$ .

**En general las redes ferroviarias practican la regla de que el peralte no ha de superar la décima parte del ancho.**

# Limitaciones de los valores del peralte

---

## Trenes parados

- Normativa para el peralte máximo admisible:

### a) Normativa ADIF

El peralte máximo admisible es de **160 mm**. Este valor protege al carril en mayor medida que lo que suele ser habitual en otras administraciones ferroviarias.

# Limitaciones de los valores del peralte

## Trenes parados

b) Norma europea ENV 13803-1

Se establecen los siguientes valores máximos:

Se **recomienda** que en vías situadas junto a andenes de viajeros no se superen **110 mm** de peralte con ancho 1,435 m (**125 mm** con ancho 1,668 m).

PERALTE MÁXIMO ADMISIBLE $z_{Máx}$ (mm) - ENV 13803-1				
Categorías de tráfico	Ancho 1,435 m		Ancho 1,668 m	
	Valores máximos recomendados	Valores máximos permitidos	Valores máximos recomendados	Valores máximos permitidos
I: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 80 y 120 Km/h.	160	180	185	205
Ila: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 120 y 160 Km/h.	160	180	185	205
IIb: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 160 y 200 Km/h.	160	180	185	205
III: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 200 y 300 Km/h.	160	180	185	205
IV: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades hasta 230 Km/h (o 250 Km/h en las mejores líneas) con vehículos incorporando características técnicas especiales.	160	180	185	205
V: Líneas de tráfico de viajeros con velocidades máximas comprendidas entre 250 y 300 Km/h.	160	200	185	230

Para evitar el riesgo de descarrilamiento en curvas de radio reducido se recomienda que el peralte quede restringido al siguiente valor:

$$\text{Ancho de vía 1,435 m: } z_{Máx} = \frac{R - 50}{1,5} ; \quad \text{Ancho de vía 1,668 m: } z_{Máx} = \frac{R - 50}{0,9}$$

# Peralte a utilizar

---

Para el establecimiento del peralte deben aplicarse las condiciones relativas a los dos tipos de trenes extremos (el más rápido de viajeros y el más lento de mercancías), que han de cumplirse conjuntamente:

$$\text{Tren mas rapido de viajeros: } \left[ \frac{V_{max}^2}{R} - \frac{g \cdot z}{a} \right] \cdot (1 + s) < \alpha_{sc,viajero}$$

$$\text{Tren mas lento de mercancías: } \frac{g \cdot z}{a} - \frac{V_{min}^2}{R} < \frac{g \cdot E}{a}$$

Con este **sistema de inecuaciones** se puede acotar el valor **z**, ó los valores de **R** y **z** cuando R sea desconocida, (tomando  $1/R = y$ , todo se reduce a resolver un **sistema lineal**).

Deberá respetarse siempre la limitación que impone al **peralte máximo** de cada línea o Red. Si se conociese la distribución exacta del tráfico y su contribución específica al deterioro de la vía se podría determinar el valor de z preciso para asegurar un equilibrio de efectos sobre ambos carriles garantizando las exigibles condiciones técnicas y de comodidad del viajero.

# Parámetros básicos del trazado

---

Los parámetros básicos del trazado se pueden dividir en tres categorías:

1. Velocidad
2. Seguridad
3. Comodidad del viajero

# Parámetros básicos del trazado

---

- **VELOCIDAD**

Tenemos que distinguir diferentes conceptos de velocidad, puesto que el proyecto del trazado está ligado a la velocidad de circulación de los trenes.

Se distingue:

1. Velocidad Nominal
2. Velocidad Específica
3. Velocidad de Proyecto
4. Velocidad de Recorrido

# Parámetros básicos del trazado

---

- **VELOCIDAD NOMINAL**

La **velocidad nominal** de un tren es la velocidad máxima que se puede alcanzar en las condiciones mas favorables de trazado.

Depende principalmente del *tipo de coches o vagones* (trenes de viajeros o mercancías) y de la clase de vía en la que nos encontramos.

# Parámetros básicos del trazado

---

- **VELOCIDAD ESPECÍFICA MÁXIMA**

La **velocidad específica máxima** hace referencia a un elemento del trazado.

Es la velocidad máxima a la que se puede circular en un elemento de trazado en determinadas condiciones de seguridad y comodidad.

Es aconsejable que la velocidad específica máxima sea lo más uniforme posible en todos los elementos de un tramo, para evitar reducciones de velocidad al pasar entre elementos contiguos.

# Parámetros básicos del trazado

---

- **VELOCIDAD ESPECIFICA MAXIMA**

La velocidad especifica puede quedar limitada debido a:

- Máxima insuficiencia de peralte admisible en curva
- Aparatos de vía (limitación en vía directa o desviada)
- Túneles (resistencia al avance y variación de presión)
- Puentes
- Galibo cinemático (presencia de obstáculos próximos)

- **VELOCIDAD ESPECIFICA MINIMA**

Debe fijarse una velocidad especifica mínima en curva para permitir la circulación de los trenes con un exceso de peralte admisible. Se mejoran las condiciones de seguridad y confort en trenes lentos.

# Parámetros básicos del trazado

---

- **VELOCIDAD DE PROYECTO**

Se define en base a criterios de seguridad y confort.

La [velocidad máxima de proyecto](#) debe ser menor o igual al valor mínimo de las velocidades específicas máximas de todos los elementos del tramo.

En general cuanto mas grande sea la velocidad de proyecto mayor será el coste de construcción y el impacto ambiental de la obra.

La velocidad nominal del tren puede ser superior a la velocidad máxima de proyecto. En este caso el tren tendrá una limitación de velocidad en estos los tramos.

# Parámetros básicos del trazado

---

- **VELOCIDAD DE PROYECTO**

Se define en base a criterios de seguridad y confort.

La **velocidad mínima de proyecto** debe ser mayor o igual al valor máximo de las velocidades específicas mínimas de todos los elementos del tramo.

La velocidad nominal del tren puede ser inferior a la velocidad mínima de proyecto.

# Parámetros básicos del trazado

---

- **VELOCIDAD DE RECORRIDO**

La **velocidad de recorrido** es la velocidad media del tren al recorrer un determinado trayecto sin considerar las paradas realizadas.

Si el trazado incluye muchas curvas y además estas son de radios pequeños, la velocidad de recorrido será baja y además será difícil conseguir recuperar dicho tiempo perdido en tramos rectos.

$$V_r = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_i}}$$

Un pequeño incremento de la velocidad en el tramo mas lento puede suponer una mejora en el tiempo de recorrido similar a un incremento de velocidad en el tramo mas rápido.

# Parámetros básicos del trazado

---

- **SEGURIDAD**

La circulación de los trenes debe realizarse con condiciones de seguridad.

Es importante considerar:

1. Seguridad frente al descarrilamiento
2. Seguridad frente al vuelco del vehículo en las curvas

# Parámetros básicos del trazado

---

- **COMODIDAD DEL VIAJERO**

El parámetro que usualmente se utiliza para definir la [comodidad del viajero](#) es la [aceleración](#). El viajero sufre dos aceleraciones:

1. ***Aceleraciones sin compensar*** ( $\alpha_{sc}$ ) producidas por las insuficiencias excesos de peraltes en las curvas.
2. ***Aceleraciones debidas a los defectos existentes en la vía*** ( $\alpha_d$ ) debidas a problemas de nivelación, alineación, características constructivas, movimiento de lazo etc.

$$\alpha_v = \alpha_{sc} + \alpha_d$$

# Parámetros básicos del trazado

---

- **COMODIDAD DEL VIAJERO**

El valor admisible para la **aceleración soportada por el viajero**  $\alpha_v$ , dependerá:

1. **Longitud del trayecto**. En viajes largos el viajero sufrirá más el estrés de las aceleraciones.
2. **Tipología de viajeros y su resistencia**. Hay que tener en cuenta la capacidad de resistencia de los viajeros menos tolerantes.
3. **Variación de la aceleración no compensada en el tiempo**. En trayectos donde hay muchas variaciones de aceleración el estrés que sufre el viajero puede ser considerablemente mayor.

También hay que considerar que los niveles tolerables de aceleración varían si estamos considerando **viajeros sentados** o viajeros que **viajan de pie**.

# Parámetros básicos del trazado

---

- **COMODIDAD DEL VIAJERO**

También hay que distinguir entre **aceleraciones verticales** y **transversales**.

***Aceleraciones verticales***: se admiten aceleraciones mucho menores que en el plano transversal. Las aceleraciones continuas y de baja frecuencia afectan a nivel visceral y pueden provocar náuseas. Los efectos sobre el viajero son más desagradables cuando la aceleración se dirige hacia arriba que hacia abajo.

***Aceleraciones transversales***: afectan a los problemas de equilibrio, pero se soportan con más facilidad (a paridad de aceleración)

# Parámetros básicos del trazado

- COMODIDAD DEL VIAJERO**

**Aceleraciones transversales:** afectan a los problemas de equilibrio, pero se soportan con mas facilidad (a paridad de aceleración)

## CRITERIOS DE COMODIDAD EN LA SNCF RESPECTO A LA ACELERACIÓN TRANSVERSAL ADMISIBLE POR EL VIAJERO

NIVEL DE COMODIDAD	Aceleración transversal sobre el viajero $\alpha_{nc,viajero}$ (m/s <sup>2</sup> )		Variación de la aceleración transversal sobre el viajero $d\alpha_{nc,viajero}/dt$ (m/s <sup>3</sup> )
	SENTADO	DE PIÉ	
Muy bueno	1,0	0,85	0,30
Bueno	1,2	1,0	0,45
Aceptable	1,4	1,2	0,70
Aceptable excepcionalmente	1,5	1,4	0,85

# Trazado en planta

---

Se compone de una sucesión de **alineaciones**:

- **Recta**
- **Curva de transición y**
- **Curva circular**

Que se representan a través de un **eje**.

- **Vía sencilla**: el eje coincide con el eje de la vía
- **Vía doble**: el eje del trazado coincide con el eje intermedio entre ambos ejes de las vía contiguas.
- **Vías de estación**: se usa el de la vía general, aunque en estaciones grandes se tratan por separado los diferentes haces de vía.

El **signo del radio de curvatura** se considera **positivo** si la **curva** es hacia la **derecha** y **negativo** si la curva es hacia la **izquierda**, usando como **referencia en sentido de avance**

# Trazado en planta

---

Algunos de los **parámetros** que definen la geometría del trazado **se limitan para cumplir con las exigencias de seguridad, comodidad del viajero y conservación de la vía**. Se establecen los siguientes valores límite:

- **Valor recomendable:** Es aquel que no debe ser superado al circular a las velocidades máxima o mínima recomendables. Es el valor que hay que aplicar en la concepción del proyecto.
- **Valor límite normal:** Es aquel que no debe ser superado cuando se circula en condiciones normales a las velocidades máxima o mínima admisibles.
- **Valor límite excepcional:** Es algo más desfavorable que el valor límite normal, que puede ser utilizado en caso de que concurren circunstancias excepcionales.

El valor recomendable constituye una referencia para las condiciones normales de explotación, no siendo un valor límite de estricto cumplimiento.

**La definición geométrica del trazado quedará condicionada por los valores límite normal y excepcional.**

# Trazado en planta

---

## CURVAS DE TRANSICION

Entre alineaciones rectas y circulares se utilizan **curvas de transición**, que permiten realizar de forma gradual las transiciones de curvatura y de peralte. En los extremos de la curva de transición deben cumplirse las condiciones de tangencia y de continuidad en la curvatura con las alineaciones recta y circular.

La curva de transición más utilizada es la **clotoide**, en la que la variación de curvaturas es lineal. La **ecuación intrínseca de la clotoide** es:

$$r \cdot s = A^2 \rightarrow R \cdot L = A^2$$

siendo:

$R$  = Radio de curvatura en un punto cualquiera.

$L$  = Longitud de la curva entre su punto de inflexión ( $R = \infty$ ) y el punto de radio  $R$ .

$A$  = Parámetro de la clotoide, característico de la misma (dimensiones de longitud).

# Trazado en planta

---

## RADIOS MINIMOS

### *Limitación por comodidad de los viajeros*

- Cuando un tren circula por una curva la aceleración centrífuga no compensada no debe resultar de valor excesivo para los viajeros, por lo que se establecen valores mínimos para el radio admisible.
- La aceleración sin compensar depende del peralte.

# Trazado en planta

---

## RADIOS MINIMOS

### *Limitación por esfuerzos dinámicos transversales sobre la vía*

Los **esfuerzos dinámicos transversales**  $H$  que los trenes transmiten a la vía comprenden dos términos:

- Un **término cuasi estático** debido a la parte no compensada de la fuerza centrífuga, proporcional a la insuficiencia de peralte  $I$  (o exceso en su caso) medido en mm,  $a$  en mm y a la carga  $Q$  (toneladas) del eje:

$$H_o = \frac{Q \cdot I}{a}$$

Generalmente se constata que el esfuerzo debido a la fuerza centrífuga no compensada no se reparte igualmente entre los dos ejes del mismo bastidor, por lo que suele mayorarse en un 20%:

$$H_o = 1,20 \cdot \frac{Q \cdot I}{a}$$

- Un **término aleatorio**  $H_a$  que depende de la estabilidad propia del vehículo, de la calidad geométrica de la vía y de sus características mecánicas. Este término debe determinarse mediante ensayos experimentales. En vías convencionales, la ORE ha establecido la siguiente formulación con  $V$  (Km/h):

$$H_a = \frac{Q \cdot V}{1.000}$$

# Trazado en planta

---

## **RADIOS MINIMOS**

### **Limitación por esfuerzos dinámicos transversales sobre la vía**

- **Comprobación transversal de la vía:**

Los **esfuerzos laterales**  $H$  desarrollados por un vehículo deben ser inferiores a la resistencia lateral mínima de la vía:

$$H = H_o + H_a < R_L$$

La **resistencia lateral** de la vía depende de:

- Velocidad del vehículo.
- La carga por eje.
- La temperatura.
- La consolidación de la vía.
- La estructura de la vía.

El valor de la **resistencia lateral** de la vía debe medirse [experimentalmente](#) mediante [ensayos sobre la vía](#). Para una vía de Alta Velocidad el valor mínimo de  $R_L$  es igual en kN a:

$$R_L = 24 + 0,47 * Q \text{ (Prud'Homme)}$$

# Trazado en planta

---

## **RADIOS MINIMOS**

### ***Limitación por esfuerzos dinámicos transversales sobre la vía***

Ejemplo: Suponiendo una carga por eje de  $Q = 170 \text{ kN}$ , se obtiene  $R_L = 104 \text{ kN}$

$H_a$  no sobrepasa el 60% de  $R_L$ , que es 62,4 kN. Por tanto, restan 41,6 kN disponibles para la parte cuasi estática  $H_o$ .

$$H_o = 1,20 \cdot \frac{Q \cdot I}{1.500} = 1,20 \cdot \frac{170 \cdot I}{1.500} \leq 41,6 \text{ kN} \rightarrow I < 305,88 \text{ mm}$$

Vemos que en condiciones normales la resistencia transversal de la vía no es un condicionante al establecer el radio mínimo de las curvas [siendo I siempre menor de 305 mm](#).

# Trazado en planta

---

## ***RADIOS MINIMOS***

### ***Limitación por barra larga soldada***

De acuerdo con las normas de ADIF para poder montar y mantener la vía sin juntas el radio mínimo admisible es el siguiente:

- Traviesas de hormigón monobloque: 250 m.
- Traviesas bibloque tipo RS: 300 m.
- Traviesas de madera de 16 cm de altura: 435 m.

En túneles no puede utilizarse la traviesa bibloque RS, ya que debido a la intensa humedad existente se oxidan las riostras metálicas. Por tanto, deberán utilizarse traviesas de madera o monobloque, con los radios mínimos admisibles que se han indicado.

Aunque no es habitual encontrar radios tan pequeños, en algunas líneas españolas hay radios inferiores a 250 m.

# Trazado en planta

---

## **RADIOS MINIMOS**

### ***Limitación en vías de maniobra***

En **vías de maniobra** se circula a velocidades muy pequeñas, por lo que pueden adoptarse trazados con **radios mínimos** de hasta **160 m** (ancho Renfe), sin necesidad de situar curvas de transición.

Cuanto menor sea el ancho de vía, menor será el radio mínimo que se podrá adoptar.

En un trazado con **curva y contracurva** de radios muy pequeños es necesario establecer una alineación recta intermedia para evitar que los topes de los vehículos contiguos se enganchen, pudiendo descarrilar el tren.

- **Normativa:**

- a) Especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad:**

En las vías donde sólo se realizan maniobras a pequeña velocidad (vías de estación y vías de apartado, vías de depósito y de estacionamiento), el radio mínimo de diseño de las vías no debe ser inferior a **150 m** para una curva aislada. En explotación, teniendo en cuenta las variaciones de trazado que puedan producirse, el radio mínimo efectivo no debe ser inferior a 125 m. Estos radios límite se definen para ancho de vía UIC.

# Trazado en planta

---

## **LONGITUD MINIMA DE ALINEACIONES RECTAS Y CIRCULARES**

**Se establecen longitudes mínimas en curvas circulares y en alineaciones rectas entre clotoides, para permitir una amortiguación suficiente del balanceo de la caja de los vehículos.**

- **Normativa:**

a) Normativa ADIF: Las limitaciones establecidas para las **alineaciones de curvatura constante** son las siguientes:

**Longitud mínima entre curvas de sentido opuesto:**

- Si  $v > 100$  km/h, la longitud mínima oscila entre  $0,4 \cdot v$  y  $0,55 \cdot v$ . Excepcionalmente puede llegarse a  $L_{\text{Mín}} = 0,35 \cdot v$
- Si  $v < 100$  km/h:  $L_{\text{Mín}} = \text{Max}(v^2/500; 0,1 \cdot v)$

**Longitud mínima entre curvas del mismo sentido:** Cero.

# Trazado en planta

## **LONGITUD MINIMA DE ALINEACIONES RECTAS Y CIRCULARES**

a) Normativa ADIF: Las limitaciones establecidas para las alineaciones de curvatura constante son las siguientes:

### **MÍNIMA LONGITUD DE ALINEACIONES RECTAS O CIRCULARES (m) - N.R.V. 0-2-0.0.**

VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)	V =140	140<v=160	160<v=200	200<v=250
NUEVAS LÍNEAS Y DESDOBLAMIENTO DE LÍNEAS ACTUALES CON MODIFICACIÓN DEL TRAZADO	NORMAL: 80 MÍNIMA: 60	NORMAL: 90 MÍNIMA: 65	NORMAL: 110 MÍNIMA: 80	NORMAL: 140 MÍNIMA: 100
MEJORA DE LÍNEAS ACTUALES POR OBRAS (Renovaciones y rehabilitaciones de vía)	70	80	100	—

VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)	V =140	140<v=160	160<v=180	180<v=200
ADAPTACIÓN DE LÍNEAS ACTUALES PARA CIRCULACIÓN DE TRENES TIPO A SIN LIMITACIÓN DE VELOCIDAD	56	64	72	80

# Trazado en alzado

---

En la definición del **trazado en alzado** se considerarán prioritarias la **seguridad en la circulación** y la **comodidad de los viajeros**.

El perfil longitudinal se define mediante los dos siguientes tipos de rasante:

- **Rasante uniforme**, en la que la inclinación  $i = dz/ds$  es constante. La rasante uniforme es una **rampa** si la inclinación es creciente con el avance, y es una **pendiente** si disminuye.
- **Acuerdo vertical**, en el que se realiza progresivamente un **cambio de inclinación**. El tipo de acuerdo a utilizar es la parábola de segundo grado de eje vertical.

**Dado que las pendientes admisibles en ferrocarriles son pequeñas, se expresan siempre en tanto por mil (‰).**

# Trazado en alzado

---

## ***Ecuación del acuerdo vertical parabólico y parámetros característicos:***

Ecuación del acuerdo vertical parabólico:  $z = A + B \cdot s + C \cdot s^2$

Imponiendo las condiciones de tangencia a la entrada y a la salida de la parábola se obtiene:

$$\frac{dz}{ds} = B + 2 \cdot C \cdot s = i \quad \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{dz}{ds} \right)_e = B + 2 \cdot C \cdot s_{TE} = i_E \\ \left( \frac{dz}{ds} \right)_s = B + 2 \cdot C \cdot s_{TS} = i_S \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} B = i_E - \frac{i_E - i_S}{s_{TE} - s_{TS}} \cdot s_{TE} = i_S - \frac{i_E - i_S}{s_{TE} - s_{TS}} \cdot s_{TS} \\ C = \frac{i_E - i_S}{2 \cdot (s_{TE} - s_{TS})} \end{array} \right.$$

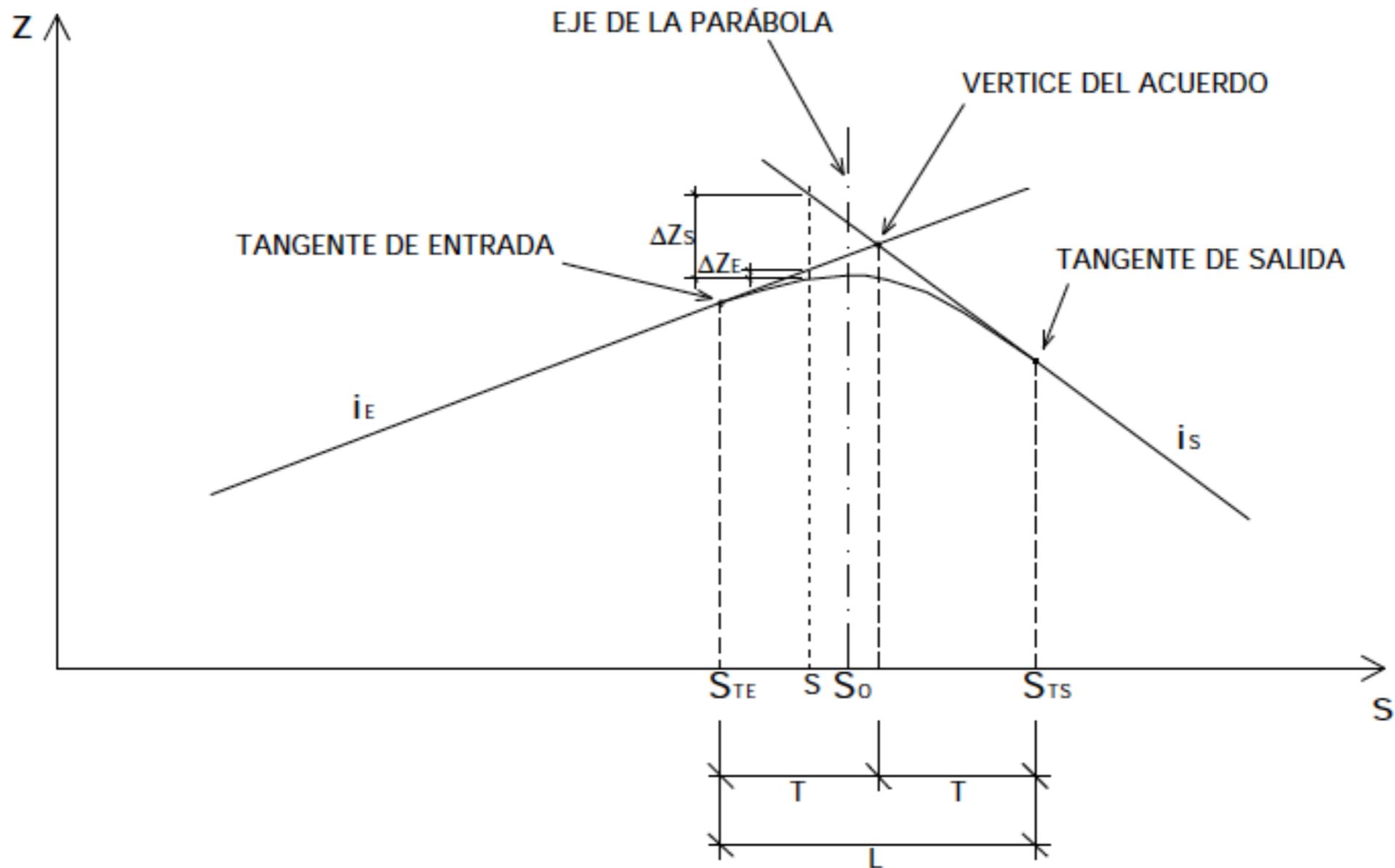
Valores característicos del acuerdo vertical:

- Longitud del acuerdo:  $L = s_{TS} - s_{TE}$
- Variación de inclinación de la rasante en el acuerdo:  $\theta = i_S - i_E$
- Parámetro del acuerdo vertical:  $K_V = L / \theta$
- Si  $i_E$ ,  $i_S$  y  $\theta$  se miden en ‰ entonces:  $K_V = 1000 \cdot L / \theta$

$K_V$  es positivo en un acuerdo cóncavo, y negativo en uno convexo.

# Trazado en alzado

*Propiedades del acuerdo vertical parabólico:*



La situación de las tangentes de entrada y salida del acuerdo vertical respecto del vértice del acuerdo resulta simétrica:  $T = L / 2$ .

# Trazado en alzado

---

## ***INCLINACIÓN MÁXIMA DE LA RASANTE***

En la elección de la pendiente máxima de la rasante deben considerarse los siguientes factores:

- ***Adherencia rueda - carril***: Limita la pendiente a valores máximos del orden de **70 ‰**.
- Posibilidades ofrecidas por la ***potencia de los vehículos ferroviarios***:
  - a) ***Trenes de viajeros***: En circunstancias excepcionales pueden llegar a alcanzarse rampas de hasta **50 ‰**.
  - b) ***Trenes de mercancías***: No deben superarse las **20 ‰**.
- ***Características del tráfico de la línea*** (especializado, mixto, etc).
- La ***capacidad de arranque en rampa***, que interviene a partir de distancias muy cortas (la longitud del tren).
- La ***capacidad del frenado de urgencia***, que interviene para distancias mayores, llegando a ser en alta velocidad del orden de **4 - 6 km**.

# Trazado en alzado

---

## ***INCLINACIÓN MÁXIMA DE LA RASANTE***

- ***Pendiente máxima en vías de estacionamiento de trenes:***

El perfil longitudinal deseable en una estación es el **horizontal**, ya que de esta manera no se plantean problemas de frenado en los trenes parados.

En caso de que no fuera posible establecer una rasante horizontal se debe intentar establecer una **rasante uniforme**, con **pendiente menor de 1,5 a 3 ‰**. Si fuera necesario establecer un acuerdo vertical, el parámetro deberá ser **superior a 5.000 m**.

De acuerdo con la Especificación Técnica de Interoperabilidad relativa al subsistema infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad, la **pendiente de las vías de apartadero** previstas para el estacionamiento de trenes no deberá exceder **2‰**.

Estas vías deberán permitir el estacionamiento de trenes de una longitud de **400 m**.

# Trazado en alzado

---

## ***INCLINACIÓN MÁXIMA DE LA RASANTE***

- ***Rampas de gran longitud:***

No son deseables los tramos largos con pendiente elevada, ya que dan lugar a:

- Reducción de velocidad de los trenes al subir.
- Mayores distancias de frenado al bajar, afectando desfavorablemente a la seguridad.
- Mayores costes de explotación (mayor consumo energético y mayores tiempos de recorrido).
- Mayores costes de conservación de la vía.

# Trazado en alzado

---

## **INCLINACIÓN MÁXIMA DE LA RASANTE**

- **Normativa:**

a) Normativa ADIF. Los valores de rampas máximas establecidos por esta norma son:

### **RAMPAS MÁXIMAS (‰) - N.R.V. 0-2-0.0.**

VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=200	200<v=250
NUEVAS LÍNEAS Y DESDOBLAMIENTO DE LÍNEAS ACTUALES CON MODIFICACIÓN DEL TRAZADO	NORMAL	20	15	12,5	12,5
	EXCEPCIONA L	—	20	15	—

- TRÁFICO PURO DE VIAJEROS PARA V > 250 km/h: RAMPA MÁXIMA DEL 35 ‰.

- ESTACIONES: RAMPA MÁXIMA DEL 2,5 ‰.

# Trazado en alzado

---

## **INCLINACIÓN MÁXIMA DE LA RASANTE**

- **Normativa:**

b) Especificación Técnica de Interoperabilidad relativa al subsistema infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad:

El valor máximo de rampas y pendientes podrá alcanzar el 35 ‰, siempre que se respeten las condiciones siguientes:

- La pendiente media de la rasante en una longitud de 10 km deberá ser menor o igual a 25 ‰.
- La longitud máxima en rampa o pendiente continua del 35 ‰ no deberá superar 6.000 m.

c) IOS-98:

Las rampas máximas admisibles en túneles son:

- Líneas de tráfico mixto: 12,5 ‰.
- Líneas de tráfico exclusivo de viajeros: 30 ‰.

# Trazado en alzado

---

## **ACELERACION ADMISIBLE EN ACUERDOS VERTICALES**

Cuando un vehículo recorre a velocidad “v” un acuerdo vertical de radio  $R_v$ , se ve sometido a una aceleración centrífuga:

$$a_v = \frac{v^2}{R_v}$$

Para respetar la **comodidad del viajero** esta aceleración se limita a valores que oscilan entre el **1** y el **4%** de “g” (valor de la gravedad).

El valor del radio  $R_v$  tiene una incidencia no despreciable sobre las explanaciones. La SNCF había juzgado útil, fijar los valores para el TGV Sur-Este y proceder a los ensayos de simulación en avión.

Estos ensayos han sido realizados por el Centro de Ensayos en Vuelo de Brétigny, en tiempo estable, en un avión que en vuelo programado describía sinusoides verticales. Un grupo de personas anotaba sus impresiones en función del valor de las aceleraciones y de su espaciamento. Los más sensibles declararon no sentir una aceleración de  $0,045 \cdot g$ , mientras que una aceleración de  $0,06 \cdot g$  era percibida por algunos de los pasajeros en acuerdos cóncavos.

# Trazado en alzado

---

## **ACELERACION ADMISIBLE EN ACUERDOS VERTICALES**

Tras estos ensayos, la SNCF decidió adoptar los siguientes límites para la alta velocidad:

	Valor normal	Valor excepcional
Acuerdo cóncavo	$a_v = 0,045 \text{ g}$	$a_v = 0,06 \text{ g}$
Acuerdo convexo	$a_v = 0,045 \text{ g}$	$a_v = 0,05 \text{ g}$

Esto da lugar a los siguientes radios:

		Valor normal	Valor excepcional
V = 300 km/h	Acuerdo cóncavo	$R_v = 16.000 \text{ m}$	$R_v = 12.000 \text{ m}$
	Acuerdo convexo	$R_v = 16.000 \text{ m}$	$R_v = 14.000 \text{ m}$
V = 350 km/h	Acuerdo cóncavo	$R_v = 19.000 \text{ m}$	$R_v = 18.500 \text{ m}$
	Acuerdo convexo	$R_v = 19.000 \text{ m}$	$R_v = 21.000 \text{ m}$

El límite de  $0,22 \text{ m/s}^2$  establecido en la norma europea ENV 13803-1 parece un valor excesivamente bajo.

Un valor de  $0,3 \text{ m/s}^2$  parece un mínimo razonable, sabiendo que la línea francesa TGV Norte de Europa que ha sido trazada para 350 km/h tiene como valor normal un radio de 25.000 m correspondiente a  $0,38 \text{ m/s}^2$ .

# Trazado en alzado

## ACELERACION ADMISIBLE EN ACUERDOS VERTICALES

- **Normativa:**

a) Normativa ADIF. La máxima aceleración admisible en acuerdos verticales que fija la norma es:

<b>MÁXIMA ACELERACIÓN ADMISIBLE EN ACUERDOS VERTICALES <math>a_v</math> (m/s<sup>2</sup>) - N.R.V. 0-2-0.0.</b>					
VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=200	200<v=250
NUEVAS LÍNEAS Y DESDOBLAMIENTO DE LÍNEAS ACTUALES CON MODIFICACIÓN DEL TRAZADO	NORMAL	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,20
	EXCEPCIONAL	0,40	0,40	0,30	0,30
	Comentarios:	Si el acuerdo vertical coincide con una curva en planta: $a_v \leq 0,20$			
VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=200	200<v=250
MEJORA DE LÍNEAS ACTUALES POR OBRAS (Renovaciones y rehabilitaciones de vía)	NORMAL	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	—
	EXCEPCIONAL	0,45	0,45	0,40	—
	Comentarios:	Máximo en acuerdos convexos: 0,40 Si el acuerdo vertical coincide con una curva en planta: $a_v \leq 0,20$			
VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=180	180<v=200
ADAPTACIÓN DE LÍNEAS ACTUALES PARA CIRCULACIÓN DE TRENES TIPO A SIN LIMITACIÓN DE VELOCIDAD	CÓNCAVOS:	0,50	0,50	0,45	0,45
	CONVEXOS:	0,40	0,40	0,40	0,40

# Trazado en alzado

## ACELERACION ADMISIBLE EN ACUERDOS VERTICALES

- **Normativa:**
  - a) Normativa ADIF. Como consecuencia, resultan los siguientes parámetros mínimos para los acuerdos verticales:

<b>RADIO MÍNIMO DEL ACUERDO VERTICAL <math>R_v</math> (m) - N.R.V. 0-2-0.0.</b>					
VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=200	200<v=250
NUEVAS LÍNEAS Y DESDOBLAMIENTO DE LÍNEAS ACTUALES CON MODIFICACIÓN DEL TRAZADO	NORMAL	5.100	6.600	16.000	24.000
	EXCEPCIONA L	3.800	4.900	10.000	16.000
MEJORA DE LÍNEAS ACTUALES POR OBRAS (Renovaciones y rehabilitaciones de vía)	NORMAL	5.100	6.600	10.000	—
	EXCEPCIONA L	3.400	4.400	7.700	—
PARÁMETRO MÍNIMO EN ACUERDOS CONVEXOS: 3.000 m PARÁMETRO MÍNIMO EN ACUERDOS CÓNCAVOS: 2.000 m SI EL ACUERDO VERTICAL COINCIDE CON UNA CURVA EN PLANTA EL PARÁMETRO MÍNIMO SERÁ DE 5.000 m					
VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)		V =140	140<v=160	160<v=180	180<v=200
ADAPTACIÓN DE LÍNEAS ACTUALES PARA CIRCULACIÓN DE TRENES TIPO A SIN LIMITACIÓN DE VELOCIDAD		3.100	4.000	5.000	6.900

# Trazado en alzado

## ACELERACION ADMISIBLE EN ACUERDOS VERTICALES

- **Normativa:**

b) Norma europea ENV 13803-1

RADIO MÍNIMO DEL ACUERDO VERTICAL $R_v$ (m) - ENV 13803-1		
Categorías de tráfico	Valores máximos recomendados ( $V_{Máx}$ en km/h)	Valores máximos permitidos ( $V_{Máx}$ en km/h)
I: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 80 y 120 Km/h.	$0,35 \cdot V_{Máx}^2$ (2)	$0,25 \cdot V_{Máx}^2$ (3)
IIa: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 120 y 160 Km/h.	$0,35 \cdot V_{Máx}^2$	$0,25 \cdot V_{Máx}^2$ (3)
IIb: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 160 y 200 Km/h.	$0,35 \cdot V_{Máx}^2$	$0,25 \cdot V_{Máx}^2$ (3)
III: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades máximas comprendidas entre 200 y 300 Km/h.	$0,35 \cdot V_{Máx}^2$	$0,175 \cdot V_{Máx}^2$ (1)
IV: Líneas de tráfico mixto, con trenes de pasajeros con velocidades hasta 230 Km/h (o 250 Km/h en las mejores líneas) con vehículos incorporando características técnicas especiales.	$0,35 \cdot V_{Máx}^2$	$0,25 \cdot V_{Máx}^2$ (3)
V: Líneas de tráfico de viajeros con velocidades máximas comprendidas entre 250 y 300 Km/h.	$0,35 \cdot V_{Máx}^2$	$0,175 \cdot V_{Máx}^2$ (1)
(1) Con una tolerancia de +10 % en acuerdo convexo y +30% en acuerdo cóncavo. (2) En líneas donde puede que los viajeros circulen de pie, se recomienda $R_v \leq 0,77 \cdot V_{Máx}^2$ (3) Sin bajar de radios de 2.000 m.		

# Trazado en alzado

---

## **VARIACIONES BRUSCAS DE ACELERACIÓN VERTICAL**

Los acuerdos verticales se definen mediante **parábolas de eje vertical**, **sin colocación de curva de transición** entre la rasante uniforme y el acuerdo. Esto motiva un salto de aceleración vertical en los extremos del acuerdo, produciendo una oscilación de la suspensión del vehículo y una sensación incómoda para los viajeros.

Si se acoplaran dos acuerdos verticales de signo contrario sin intercalar un tramo con rasante uniforme se sumarían los saltos de aceleración correspondientes a cada uno de los acuerdos.

Esto produciría los siguientes efectos:

- Rápida descarga de la suspensión al pasar de un acuerdo cóncavo a uno convexo.
- Carga importante de la suspensión al pasar de un acuerdo convexo a uno cóncavo.
- Salto de aceleración vertical sobre los viajeros, que se produce gradualmente debido a la suspensión.

# Trazado en alzado

---

## ***VARIACIONES BRUSCAS DE ACELERACIÓN VERTICAL***

Para reducir el salto producido en la aceleración vertical caben dos posibilidades:

- Aumentar el parámetro del acuerdo (KV).
- Diseñar el acuerdo vertical con curvas de transición.

En ambos casos aumenta de forma considerable la longitud del acuerdo vertical.

La solución que se adopta en la actualidad es la primera, con las siguientes limitaciones:

- a) Longitud mínima del acuerdo vertical
- b) Longitud mínima de rasante con pendiente uniforme

# Trazado en alzado

---

## ***VARIACIONES BRUSCAS DE ACELERACIÓN VERTICAL***

### ***a) Longitud mínima del acuerdo vertical***

Es necesario que transcurra un tiempo entre un salto de aceleración vertical y el siguiente, para permitir la amortiguación de la suspensión y evitar la superposición de efectos, que puede dar lugar a oscilaciones importantes en el vehículo.

Como consecuencia, se recurre a limitar la longitud mínima de las rasantes uniformes y de los acuerdos verticales.

# Trazado en alzado

---

## **VARIACIONES BRUSCAS DE ACELERACIÓN VERTICAL**

### **b) Longitud mínima de rasante con pendiente uniforme:**

Puede proyectarse un acuerdo parabólico en el que el salto de aceleración vertical producido en el punto de tangencia resulte admisible. Sin embargo, si se colocan dos acuerdos verticales de forma consecutiva el salto de aceleración es doble, alcanzando un valor considerable.

Por ello, se establece una longitud mínima de rasante uniforme entre dos acuerdos verticales consecutivos, de forma que los saltos en la aceleración vertical que se produzcan no se superpongan. De esta forma, se evitan efectos negativos en la suspensión de los vehículos y en la comodidad de los viajeros.

- Ejemplo:

En una línea de alta velocidad con  $v = 350$  km/h y  $KV=45.000$  se obtiene en la tangente de un acuerdo vertical  $\Delta a_v=0,21$  m/s<sup>2</sup>, valor admisible. Si se acopla un acuerdo vertical con el siguiente resulta  $\Delta a_v=0,42$  m/s<sup>2</sup> (4,2% g), que constituye un salto de aceleración considerable.

# Trazado en alzado

---

## **VARIACIONES BRUSCAS DE ACELERACIÓN VERTICAL**

### **b) Longitud mínima de rasante con pendiente uniforme:**

Según la norma de ADIF la longitud mínima de una rasante con pendiente uniforme está comprendido entre  $0,4 \cdot v$  y  $0,5 \cdot v$ .

<b>LONGITUD MÍNIMA DE RASANTE UNIFORME (m) - N.R.V. 0-2-0.0.</b>				
<b>VELOCIDAD DE PROYECTO (Km/h)</b>	<b>V =140</b>	<b>140&lt;v=160</b>	<b>160&lt;v=200</b>	<b>200&lt;v=250</b>
<b>NUEVAS LÍNEAS Y DESDOBLAMIENTO DE LÍNEAS ACTUALES CON MODIFICACIÓN DEL TRAZADO</b>	70	80	100	100
<b>MEJORA DE LÍNEAS ACTUALES POR OBRAS (Renovaciones y rehabilitaciones de vía)</b>	70	80	100	---

# Referencias y Paginas Web

---

- Ferrocarriles. Apuntes de Clase. Jose Manuel Garcia Díaz de Villegas
- Infraestructuras Ferroviarias. Andrés López Pita
- Geometría y Calidad de la vía. Manuel Losada
- La geometría en el trazado de ferrocarriles