



# Mecánica vertical y transversal de la vía

Ferrocarriles

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

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



# Índice

---

- Elasticidad de la via
- Clasificación de Cargas
- Cargas Verticales
- Cargas Transversales
- Cargas Longitudinales
- Descarrilamiento

# Elasticidad de la vía

---

En el balasto, lo mismo que en el terreno subyacente y en general en todos los **sólidos formados por partículas aisladas**, al recibir por primera vez una carga, se produce una **deformación plástica**; pero si el fenómeno se reitera un número suficiente de veces, se llega a un régimen de verdadera elasticidad semejante al de los sólidos homogéneos.

Esta ***elasticidad*** de la vía se cuantifica con la ayuda de *diversos parámetros*.

# Elasticidad de la vía

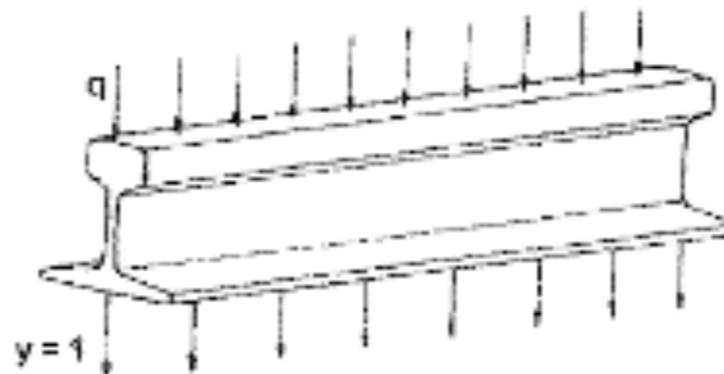
---

## **MODULO DE LA VÍA $K$**

Siendo  $q$  (t/m) una carga uniformemente repartida sobre un carril e  $y$  el hundimiento, el asentamiento que le produce.

**Significado físico:** *es la carga que actuando de forma uniforme a lo largo del carril, produce en este un asiento unidad.*

Se utiliza sobre todo en América. Si la unidad de asiento tomada es 1 cm,  $K$  suele valer entre 8 y 22 t/m



# Elasticidad de la vía

---

## **COEFICIENTE DE REACCIÓN DE LA TRAVIESA $R$**

La propuso **Timoshenko** (1915). Donde  **$R$**  es la reacción vertical de la traviesa por hilo de carril e  **$y$**  el asentamiento producido ( **$t/mm$** ).

$$r = \frac{R}{y}$$

Puede expresarse una relación entre el modulo de la vía  $K$  y  $r$  llamando a  **$d$**  la distancia entre dos traviesas consecutivas:

$$r = \frac{R}{y} = R \cdot \frac{K}{r} = d \cdot r \cdot \frac{K}{r} = K \cdot d$$

Siendo:  $K = \frac{r}{y}$  y  $R = r \cdot d$

Esta **reacción es aproximada**, porque no considera la acción de las traviesas vecinas.

# Elasticidad de la via

---

## **COEFICIENTE DE BALASTO C**

$$C = \frac{r}{S}$$

Se atribuye a **Winkler (1867)**, donde **S** es la **superficie de apoyo de la traviesa**. Si llamamos **P (K/cm<sup>2</sup>)** a la **presión media ejercida sobre la superficie S** de apoyo de la traviesa:

$$C = \frac{r}{S} = \frac{R}{y \cdot S} = \frac{P}{y}$$

Con lo que se puede definir como la **carga unitaria que produce en el balasto una depresión de 1 cm**. Si tenemos un balasto sobre el que apoyo una traviesa que le transmite una carga de **2 K/cm<sup>2</sup>** y se ha producido un asiento de **0,05 cm** el coeficiente de balasto valdrá:

$$C = \frac{P}{y} = \frac{2k/cm^2}{0,05cm} = 40k/cm^3$$

Varia con el bateo. Debe estar entre 5-10 K/cm<sup>3</sup>.

# Elasticidad de la vía

---

## **COEFICIENTE DE ELASTICIDAD**

La vía esta constituida por un conjunto de materiales (plataforma, balasto, traviesa, etc.) que tienen cada uno su elasticidad propia.

Si  $r_n$  es el **coeficiente de elasticidad** de uno de estos elementos, se tiene por definición:

$$r_n = \frac{R}{y_n}$$

Al ser  $y$  el asentamiento total:

$$y = \sum_n y_n = \sum_n \frac{R}{r_n} = R \cdot \sum_n \frac{1}{r_n} = \frac{R}{r}$$

Traviesa de hormigón : 1200-1500 t/mm

Traviesa de madera: 50-80 t/mm

Alma de carril: 5000-10000 t/mm

Balasto bateado: 10-30 t/mm – aumenta con el espesor y disminuye con el tiempo.

Plataforma rocosa: 2-8 t/mm

Plataforma arcillosa: 1,5-2 t/mm

Plataforma pantanosa: 0,5-1,5 t/mm

# Elasticidad de la vía

---

## **COEFICIENTE DE ELASTICIDAD**

Son esencialmente el balasto y la plataforma los que condicionan la **elasticidad del conjunto de la vía**.

$$y = \sum_n y_n = \sum_n \frac{R}{r_n} = R \cdot \sum_n \frac{1}{r_n} = \frac{R}{r}$$

El **coeficiente de reacción global** puede variar entre **1,5-10 t/mm**, según sea la naturaleza del balasto y la plataforma. El valor mas corriente es **3 t/mm**.

Sobre las **obras de fabrica**, se obtiene **12-15 t/mm** (notable diferencia de elasticidad).

La **plataforma** es la que presenta el coeficiente mas bajo y la presión que se ejerce a su nivel es la que condiciona el asentamiento de la vía. **Esta presión es tanto mas débil cuanto mayor sea el espesor del balasto.**

# Clasificación de cargas

---

La vía férrea está sometida a:

- ***Cargas Verticales***
- ***Cargas Transversales***
- ***Cargas Longitudinales***

Aparte de las fuerzas que pueden ejercerse en caso de seísmo, todas las demás fuerzas son generadas por el material rodante que circula por la vía (cargas de tráfico).

# Clasificación de cargas

---

**Cargas Verticales:** se ejercen sobre la superficie de rodadura del carril y se transmiten al subsuelo a través de los **distintos componentes de la vía**.

**Cargas Transversales:** son transferidas en primer lugar por las **ruedas a los carriles**, ya sea únicamente a través de la superficie de rodadura del carril (cuando no hay contacto con las pestañas) o bien a través de la superficie de rodadura del carril y principalmente a través de las **pestañas de las ruedas** (cuando hay contacto de pestañas). Más adelante, las cargas se transfieren a través de los otros componentes de la vía (fijaciones, placas, traviesas) a las capas inferiores.

**Cargas Longitudinales:** se ejercen sobre la superficie de rodadura del carril y, de forma similar a las cargas transversales, se transmiten a las capas inferiores de la vía.

# Clasificación de cargas

---

Según su naturaleza, las cargas sobre la vía se clasifican en:

- ***Cargas estáticas***
- ***Cargas semiestáticas o cuasiestáticas***
- ***Cargas dinámicas***

# Clasificación de cargas

---

- **Cargas estáticas:** resultantes del peso propio del material rodante. Son ejercidas permanentemente sobre la vía, tanto si el material rodante está inmovilizado o en marcha.
- **Cargas semiestáticas o cuasiestáticas:** Se ejercen sobre el material rodante a través del cual se transmiten a la vía durante un período de tiempo determinado. Posteriormente, y tan pronto como la causa que las provoca deja de existir, desaparecen. Ej.: *fuerza centrífuga no compensada* y de los *vientos transversales*.
- **Cargas dinámicas:** Se producen como consecuencia de:
  - *Defectos de la vía* y *rigidez* vertical *heterogénea* de la vía.
  - *Discontinuidades* de la superficie de rodadura (en juntas, agujas, etc.).
  - *Desgaste* de la superficie de rodadura del carril y de las superficies de rodadura de las ruedas.
  - El sistema de *suspensión* de los vehículos y las *asimetrías* del material rodante.

# Cargas Verticales

---

Aparte de estas tres categorías, también es útil incluir y examinar por separado una categoría adicional de cargas verticales que puede denominarse "**cargas características**".

En esta categoría se incluyen:

- La **carga por eje  $Q$** .
- La el **tráfico ficticio diario  $T_f$** .
- La **carga vertical de proyecto por rueda  $Q_d$** .

Una característica especial de todas las cargas anteriores, (pueden ser estáticas o dinámicas) es que determinan en gran medida el **dimensionamiento** de la vía férrea, así como la política de **mantenimiento** a seguir.

# Cargas Verticales Estáticas

---

## **Carga por eje**

El término "**carga por eje**" describe la carga estática  $Q$  que transfiere individualmente cada eje de un vehículo, y en general de un tren, a través de las ruedas a los raíles.

Considerando una carga simétrica de las distintas partes del vehículo, la carga por eje expresa el cociente del peso total del vehículo dividido por el número total de ejes.

En el caso de un vehículo con bogies de 2 ejes, se aplica la siguiente ecuación matemática:

$$Q = \left( \frac{\bar{M}}{4} + \frac{M'}{2} + m \right) \cdot g$$

donde:

Q: Carga por eje.

$\bar{M}$ : Masa de la carrocería.

M': Masa de un bogie.

m: Masa de un eje ferroviario (eje + ruedas + cajas de grasa).

g: Aceleración de la gravedad.

# Cargas Verticales Estáticas

---

## *Carga por eje*

La Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) clasifica las vías en función de la carga máxima permitida por eje en cuatro categorías: A, B, C y D:.

<i>Track category</i>	<i>Axle load (t)</i>
A	16
B	18
C	20
D	22.5

Source: Adapted from UIC. 1989, Fiche 714R, Classification des voies des lignes au point de vue de la maintenance de la voie.

La carga máxima por eje difiere de un país a otro y, en la mayoría de los países, de una vía a otra.

El **aumento del ancho de vía** permite un [aumento significativo de la carga por eje](#).

Las cargas por eje  $Q > 16- 17 t$  se consideran prohibitivas para el desarrollo de velocidades muy elevadas ( $V \geq 250 km/h$ ).

# Cargas Verticales Estáticas

---

## *Carga por rueda*

El término "**carga por rueda**" se refiere a la carga estática  $Q_o$  que transfiere individualmente cada rueda del vehículo al carril correspondiente.

Considerando una carga simétrica del vehículo, se aplica la siguiente ecuación matemática:

$$Q_o = \frac{Q}{2}$$

En la práctica, las cargas de las dos ruedas de cada eje, especialmente en el caso de la circulación en curvas, no son iguales entre sí.

***La carga por ruedas y, en particular, la distribución del peso entre las dos ruedas está directamente relacionados con los fenómenos de descarrilamiento y vuelco de los vehículos.***

# Cargas Verticales Estáticas

---

## **Trafico ficticio diario**

La evaluación cualitativa y cuantitativa del tráfico en la vía suele expresarse mediante el **trafico ficticio diario**  $T_f$  (en t). La carga  $T_f$  es una una de las "**cargas características**". En función del valor del trafico ficticio diario total, las vías se clasifican en categorías con el fin último de normalizar la dimensión y el mantenimiento de las vías.

Para calcular  $T_f$ , la UIC ha sugerido dos ecuaciones matemáticas siguientes:

$$1. \quad T_f = T_p \cdot \frac{V_{max}}{100} + T_g \cdot \frac{Q_{D_o}}{18 \cdot D_o}$$

donde:

$T_f$ : Trafico ficticio diario (en t).

$T_p$ : Tráfico de trenes de viajeros (en t).

$T_g$ : Tráfico de trenes de mercancías (en t).

$V_{max}$ : Velocidad máxima de circulación (en km/h).

$D_o$ : Diámetro mínimo de rueda de los trenes que circulan por la línea (en m).

$Q_{D_o}$ : Carga máxima por eje pasante (ruedas de diámetro  $D_o$ ) (en t).

Track category	Total daily traffic load (t)
I	$T_f > 40,000$
II	$40,000 \geq T_f > 20,000$
III	$20,000 \geq T_f > 10,000$
IV	$10,000 \geq T_f$

# Cargas Verticales Estáticas

Track category	Total daily traffic load ( $T_f$ )
UIC 1	$130,000 \text{ t} < T_f$
UIC 2	$80,000 \text{ t} < T_f \leq 130,000 \text{ t}$
UIC 3	$40,000 \text{ t} < T_f \leq 80,000 \text{ t}$
UIC 4	$20,000 \text{ t} < T_f \leq 40,000 \text{ t}$
UIC 5	$5,000 \text{ t} < T_f \leq 20,000 \text{ t}$
UIC 6	$T_f \leq 5,000 \text{ t}$

Source: Adapted from UIC. 1989, Fiche 714R, Classification des voies des lignes au point de vue de la maintenance de la voie.

## **Trafico ficticio diario**

$$2. \quad T_f = S_v \cdot (T_V + K_t + T_{tv}) + S_m \cdot (K_m \cdot T_m + K_t \cdot T_{tm})$$

donde:

$T_f$ : Trafico ficticio diario (en t).

$T_V$ : Trafico medio diario de coches de viajeros remolcados (en t).

$T_m$ : Trafico medio diario de vagones de mercancías (en t).

$T_{tv}$ : Trafico medio diario de locomotoras de pasajeros (en t).

$T_{tm}$ : Trafico medio diario de locomotoras de mercancías (en t).

$K_m$ : Coeficiente con valores que varían entre 1,15 (valor estándar) y 1,45 (cuando > 50% del tráfico es con vehículos con carga por eje  $Q = 22,5 \text{ t}$  o cuando 75% del tráfico es con vehículos de carga por eje  $Q \geq 20 \text{ t}$ ).

$K_t$ : Coeficiente que depende de las condiciones de rodadura de los ejes de las locomotoras sobre la vía. Suele ser igual a 1,40.

$S_v, S_m$ : Coeficientes cuyos valores dependen de la velocidad de los trenes de viajeros (con la mayor velocidad) y de mercancías (con la menor velocidad), respectivamente, que circulan por la vía.

# Cargas Verticales Cuasiestáticas

## *Carga vertical de la rueda debida a los vientos transversales*

La **carga vertical debida a los vientos transversales**  $Q_w$  viene dada por la siguiente ecuación matemática (Figura) (Esveld, 2001):

$$\pm Q_w = H_w \cdot \frac{q_o}{a}$$

donde

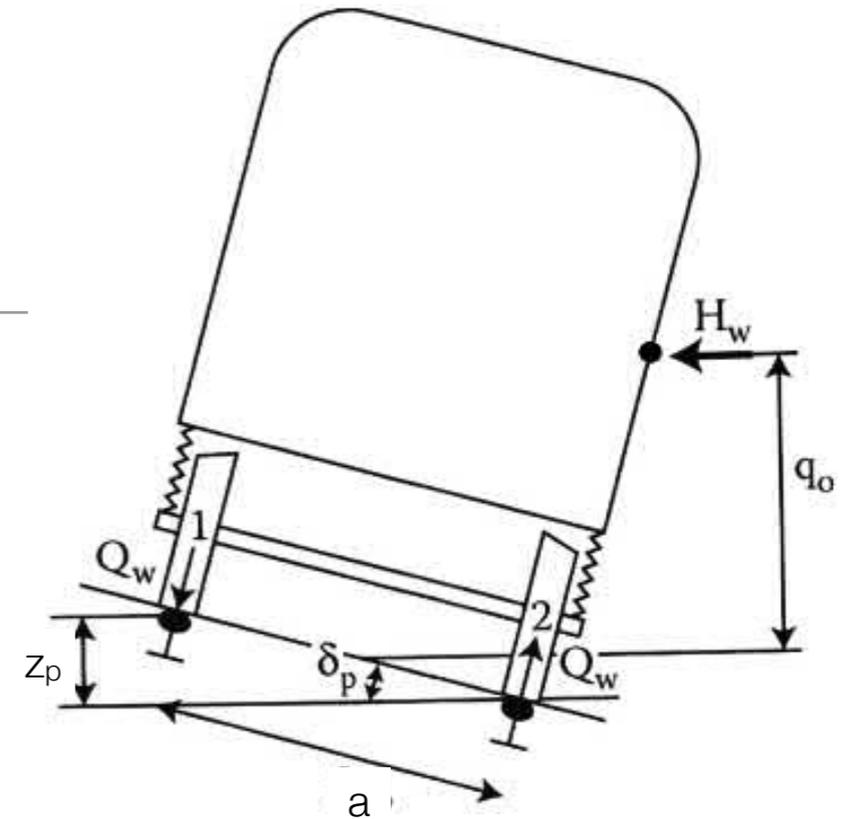
$H_w$ : Fuerza transversal del viento aplicada en el centro geométrico de la superficie lateral de la carrocería

$q_o$ : Distancia vertical entre el centro geométrico de la superficie lateral de la carrocería y la superficie de rodadura del carril.

$a$ : Distancia entre el eje vertical de simetría de los dos carriles.

Cuando la fuerza  $H_w$  se dirige desde la rueda 2 hacia la rueda 1, la carga de la rueda 1 aumenta en  $Q_w$ , mientras que la carga de la rueda 2 disminuye en el mismo valor.

Como consecuencia de los vientos transversales, la carga se aplica durante el movimiento, tanto en una trayectoria recta como en curvas, y se anula una vez que desaparecen las cargas del viento.



# Cargas Verticales Cuasiestáticas

## Carga vertical de la rueda debida a la fuerza centrífuga no compensada

La carga vertical  $Q_{sc}$ , debida a la fuerza centrífuga no compensada  $F_{sc}$ , se expresa como (figura):

$$\pm Q_{sc} = \frac{F_{sc} \cdot h_{kB}}{a} = \frac{Q \cdot l \cdot h_{kB}}{a^2}$$

donde:

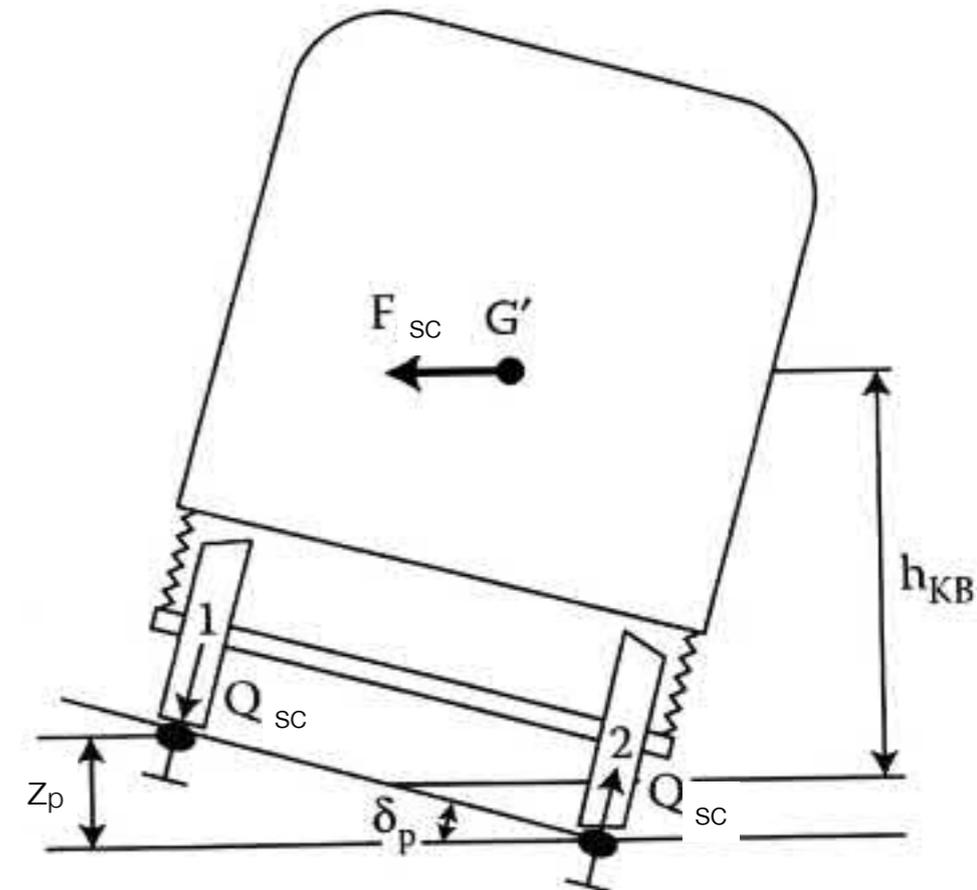
$F_{sc}$ : Fuerza centrífuga no compensada.

$l$ : Insuficiencia de peralte.

$h_{kB}$ : Distancia entre el centro de gravedad del vehículo  $G'$  y la superficie de rodadura del carril.

$z_p$ : Peralte de la vía.

$\delta_p$ : Ángulo del peralte.



La carga debida a la fuerza centrífuga residual **sólo se aplica durante el movimiento en los segmentos curvos de la vía** y su medida suele ser del **10-25% del valor de la carga estática** de la rueda. La carga de la rueda que rueda sobre el carril exterior aumenta en  $Q_{sc}$ , mientras que la carga de la rueda interior disminuye, respectivamente, en el mismo valor.

# Cargas Verticales Dinámicas

---

## Carga dinámica vertical por rueda

La **carga vertical dinámica total por rueda** ( $Q_{dyn}$ ) es suma de:

- las **masas suspendidas del vehículo** ( $Q_{dyn1}$ ): Caja vehículo
- las **masas semisuspendidas del vehículo** ( $Q_{dyn2}$ ). Bogies
- las **masas no suspendidas del vehículo** ( $Q_{dyn3}$ ). Ejes
- las **masas debida a las oscilaciones de las partes elásticas del sistema de fijación carril-traviesa** ( $Q_{dyn4}$ ).

Las fuerzas dinámicas que se ejercen sobre la vía debido a la interacción con el material rodante son aleatorias.

Empleando la hipótesis de la linealidad, su estudio puede realizarse en diferentes rangos de frecuencia, en función del mecanismo preciso de oscilación, de las causas de la oscilación y también en función del cuerpo que participa en el movimiento.

# Cargas Verticales Dinámicas

---

## Carga dinámica vertical por rueda

Así pues, la carga dinámica vertical total por rueda  $Q_{dyn}$  es el resultado de sumar todas las fuerzas anteriores:

$$Q_{dynj} = Q_{dyn1j} + Q_{dyn2j} + Q_{dyn3j} + Q_{dyn4j}$$

donde:

$j = 1,2$ : Índice relativo a las dos ruedas de un mismo eje.

Las **velocidades muy elevadas**, el peso en continuo aumento y la rigidez de los componentes de la vía provocan un [incremento del efecto de los fenómenos dinámicos](#) y un aumento de las cargas ejercidas sobre la superestructura de la vía, la plataforma y el vehículo.

El **cálculo de las fuerzas dinámicas** sigue siendo extremadamente complejo y, en algunos casos, no es posible en absoluto. La mayoría de los análisis se limitan a [especulaciones cuasiestáticas](#). En la mayoría de los casos, se adopta un [enfoque puramente empírico basado en mediciones](#) (Giannakos, 2014, 2016).

La **carga dinámica adicional** puede alcanzar valores de **hasta el 50 % de la carga estática** de la rueda (Alias, 1977). Según la bibliografía pertinente (Profillidis, 1995; Zicha, 1989), para velocidades de [hasta 200 km/h, el factor de impacto dinámico varía entre 1,35 y 1,6](#). Así pues, para velocidades de hasta 200 km/h, se sugiere un factor de impacto dinámico de 1,5. Para velocidades superiores a 200 km/h, podría realizarse un estudio analítico basado en datos experimentales.

# Cargas Verticales

---

## Carga vertical total de la rueda

La carga vertical total de la rueda  $Q_t$  se calcula como la suma de todas las cargas verticales estáticas, cuasiestáticas y dinámicas transferidas a cada rueda por el material rodante:

$$Q_{tj} = Q_{oj} \pm Q_{wj} \pm Q_{scj} \pm Q_{dynj}$$

# Cargas Verticales

---

## Carga vertical de proyecto por rueda

El término "**carga vertical de proyecto por rueda**"  $Q_d$  se refiere al **valor característico de la carga vertical de la rueda ejercida sobre la vía, que cubre la probabilidad teórica máxima posible de no superar dicha carga durante el ciclo de vida de la vía.**

Se considera que la carga vertical de proyecto por ruedas  $Q_d$  es igual a la suma de la **carga estática de las ruedas**, la **carga cuasiestática** de las ruedas y la **media de la desviación cuadrada de las desviaciones típicas de las fuerzas dinámicas de las masas no suspendida, suspendida/semisuspendida** del vehículo. La media se incrementa para cubrir la probabilidad estadística de no superar la carga calculada en condiciones reales (Esveld, 2001; Giannakos, 2002). Así, se aplica la siguiente ecuación matemática:

$$Q_{dj} = Q_{oj} + Q_{Hj} + n_p \cdot \sqrt{\sigma(Q_{dyn3i})^2 + \sigma(Q_{dyn1i} + Q_{dyn2i})^2}$$

donde:

$Q_d$ : Carga vertical de proyecto por rueda.

$Q_o$ : carga vertical estática por rueda.

$Q_H$ : carga vertical cuasiestática por rueda.

$\sigma(Q_{dyn3})$ : Desviación típica de las fuerzas dinámicas verticales de las masas no suspendidas del vehículo.

$\sigma(Q_{dyn1}, Q_{dyn2})$ : Desviación típica de las fuerzas dinámicas verticales de las masas suspendidas y semisuspendidas del vehículo.

$n_p$ : Coeficiente del aumento de probabilidad del valor cuadrático medio de las desviaciones típicas de las fuerzas dinámicas verticales de un vehículo, tomando un valor igual a 5,00 (Demiridis y Pyrgidis, 2010).

$j = 1,2$ : Índice relativo a las dos ruedas del mismo juego de ruedas.

# Cargas Transversales

---

Las fuerzas transversales están directamente relacionadas con la seguridad de la circulación ferroviaria y el confort dinámico de los viajeros.

Pueden provocar el fenómeno del descarrilamiento.

Se distinguen en:

A. ***fuerzas provocadas por la interacción rueda-carril:***

Comprende las fuerzas gravitatorias, las fuerzas de guiado, las fuerzas de rozamiento y las fuerzas debidas a las oscilaciones del vehículo. Las fuerzas de rozamiento se dividen a su vez en transversales y longitudinales.

B. ***fuerzas debidas a otras causas***, (viento transversal, movimiento en curvas con exceso o insuficiencia de peralte).

Comprende la fuerza centrífuga no compensada y la fuerza del viento transversal.

# Fuerzas Gravitatorias

En la superficie de contacto rueda-carril en cada rueda, la **fuerza de reacción  $R_o$**  se puede dividir en dos componentes,  $Q_o$  y  $S_{po}$  (Figura). La componente transversal  $S_{po}$  se define como "**fuerza gravitatoria**" o "**fuerza restauradora**" o "**rigidez gravitatoria**". Se debe exclusivamente a la conicidad de las ruedas y actúa a través del eje sobre la superficie de rodadura del carril.

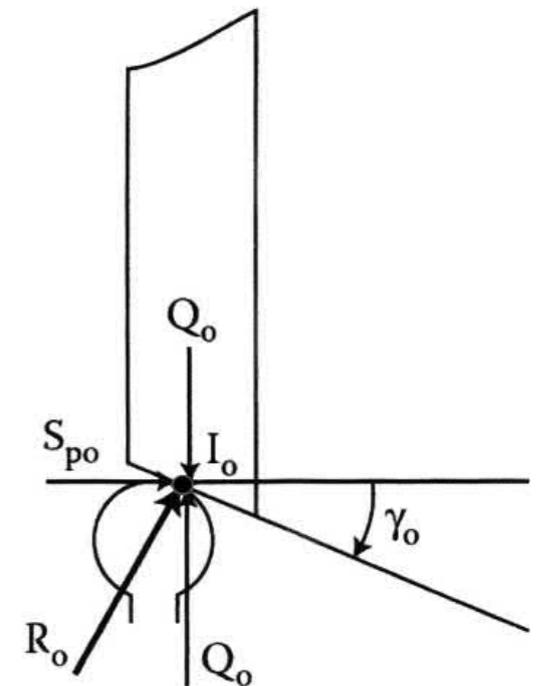
Se considera una **fuerza dinámica** y es igual a:

$$S_{po} = Q_o \cdot \tan \gamma_o$$

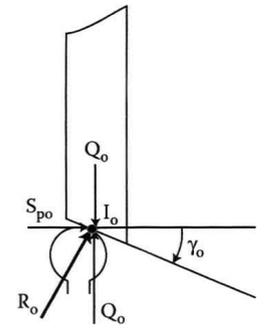
donde:

$Q_o$ : Carga estática de la rueda.

$\gamma_o$ : Ángulo entre el plano tangente y el eje horizontal de las ruedas en posición central.



# Fuerzas Gravitatorias



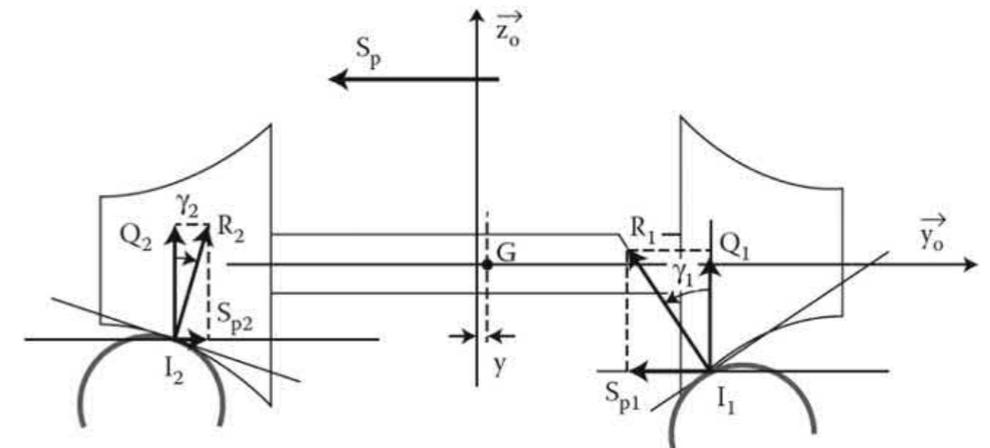
En el caso de un **eje de ruedas único**, existen dos fuerzas gravitatorias, una para cada rueda ( $S_{pj}$ ,  $j = 1,2$ ) (figura).

Si " $y$ " simboliza el desplazamiento transversal del eje de ruedas, según la figura se aplican las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$S_{p1} = Q_1 \cdot \tan \gamma_1 = Q_1 \cdot \gamma_1$$

$$S_{p2} = Q_2 \cdot \tan \gamma_2 = Q_2 \cdot \gamma_2$$

donde:



$Q_1$ ,  $Q_2$ : Componentes verticales de las reacciones  $R_1$  y  $R_2$  en los puntos de contacto  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente.

$\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ : Ángulos formados por el plano horizontal y los planos tangentes en los puntos de contacto  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente (como  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  son cantidades muy pequeñas, se aplica  $\tan \gamma_1 = \gamma_1$  y  $\tan \gamma_2 = \gamma_2$ ).

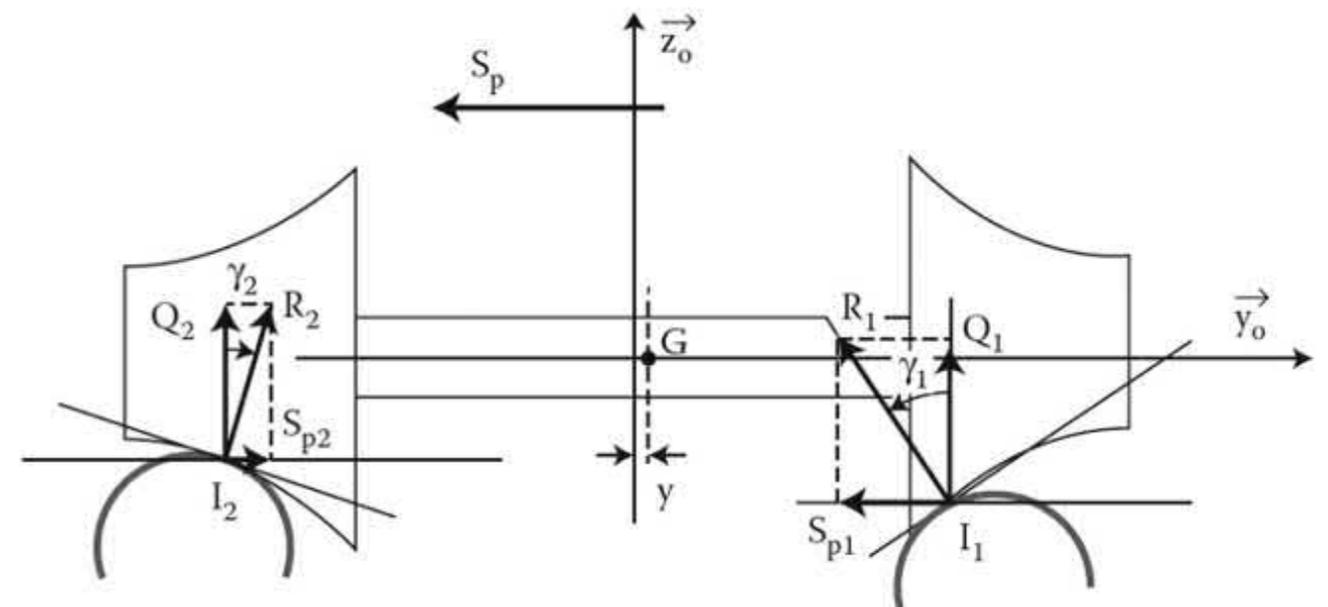
# Fuerzas Gravitatorias

A partir de la resolución matemática de la geometría del contacto rueda-carril y suponiendo que **las ruedas son de forma cónica con inclinaciones curvas de radio constante** mientras que **las cabezas de los carriles son esféricas**, se derivan las siguientes ecuaciones lineales (Pyrgidis, 1990):

$$\gamma_1 = \gamma_o + \frac{\gamma_e}{R \cdot \gamma_o} \cdot y$$

$$\gamma_2 = -\gamma_o + \frac{\gamma_e}{R \cdot \gamma_o} \cdot y$$

$$\gamma_e = \frac{R \cdot \gamma_o}{R - R'}$$



$R$  = Radio de curvatura de la banda de rodadura de la rueda

$R'$  = Radio de curvatura de la superficie de rodadura de la cabeza de carril

$\gamma_o$ : Ángulo entre el plano tangente y el eje horizontal de las ruedas en posición central.

# Fuerzas Gravitatorias

---

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores y **suponiendo una distribución igual de la carga en cada rueda**, se obtienen las dos ecuaciones matemáticas siguientes para la fuerza gravitatoria total:

$$S_p = S_{p1} + S_{p2} = 2Q_o \cdot \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o}$$

$$S_p = 2Q_o \cdot \frac{1}{(R - R')} \cdot y$$

donde:

R: Radio de curvatura de la banda de rodadura.

$\gamma_e$ : Conicidad equivalente (efectiva) de la rueda.

$R'$ : Radio de curvatura de la superficie de rodadura de la cabeza de carril.

# Fuerzas de rozamiento

## Circulación en línea recta

Las fuerzas de rozamiento longitudinales provocan el desgaste de la superficie de rodadura de la rueda y el carril, la fatiga de los materiales de contacto y ruido.

En el caso de un **eje convencional que circula por una trayectoria recta**, las expresiones analíticas de las fuerzas de rozamiento resultantes de la aplicación de la teoría lineal de Kalker vienen dadas por las ecuaciones:

$$X_1 = -c_{11} \cdot \left( \frac{X'}{V} - \frac{a}{2 \cdot V} \cdot \alpha' - \frac{\gamma_e}{r_o} \cdot y \right)$$

$$T_1 = -c_{22} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{23} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} - \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right)$$

$$M_1 = -c_{23} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{33} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} - \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right)$$

$$X_2 = -c_{11} \cdot \left( \frac{X'}{V} + \frac{a}{2 \cdot V} \cdot \alpha' + \frac{\gamma_e}{r_o} \cdot y \right)$$

$$T_2 = -c_{22} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{23} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} + \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right)$$

$$M_2 = -c_{23} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{33} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} + \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right)$$

donde:

$X_1, X_2$ : Fuerzas de rozamiento longitudinales aplicadas en ambas ruedas.

$T_1, T_2$ : Fuerzas de rozamiento laterales aplicadas en ambas ruedas.

$M_1, M_2$ : Momento de giro en ambas ruedas.

$r_o$ : radio de la rueda en su posición central de equilibrio

$R$ : Radio de curvatura de la banda de rodadura de la rueda

$x$ : Desplazamiento longitudinal del eje de ruedas.

$y$ : Desplazamiento lateral del eje de ruedas.

$\alpha$ : Ángulo de ataque del eje de ruedas.

$\varphi$ : Ángulo de giro de las ruedas y del juego de ruedas.

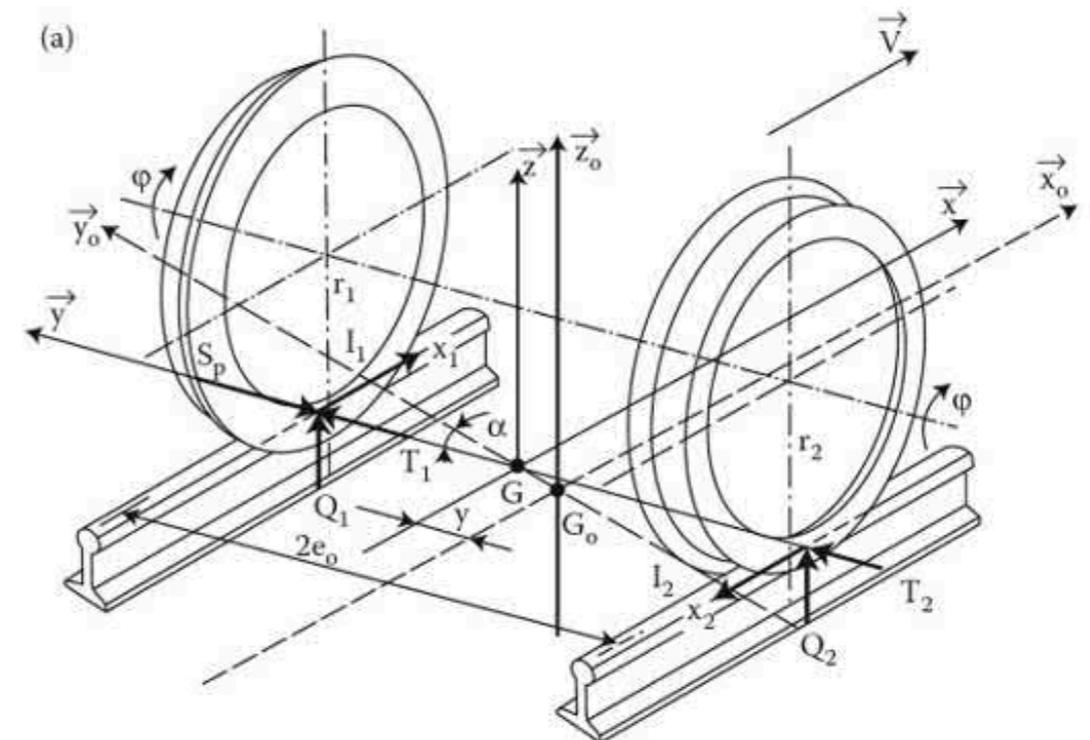
$x', y', \alpha', \varphi'$ : Derivadas de los desplazamientos  $x, y$ ,

del ángulo de ataque  $\alpha$ , y del ángulo de giro  $\varphi$ .

$c_{11}$ : Coeficiente longitudinal de Kalker.

$c_{22}$ : Coeficiente transversal de Kalker.

$c_{23}, c_{33}$ : Coeficientes de giro del Kalker.

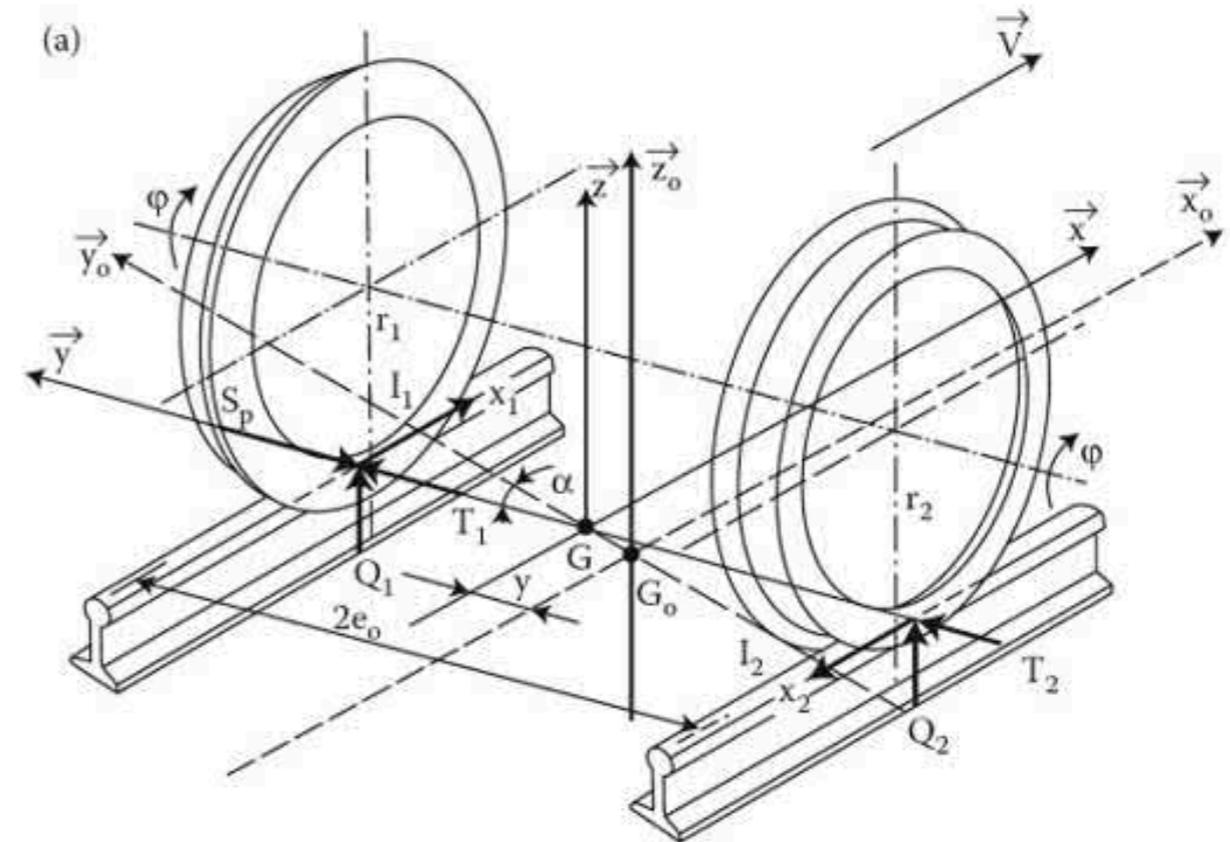


# Fuerzas de rozamiento

## Circulación en curvas

En el caso de un **eje convencional que circula por una curvatura de la vía**, las expresiones analíticas de las fuerzas de rozamiento resultantes de la aplicación de la teoría lineal de Kalker vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= -c_{11} \cdot \left( -\frac{\gamma_e}{r_o} \cdot y - \frac{a}{2 \cdot V} \cdot \alpha' + \frac{a}{2 \cdot R_c} \right) \\
 X_2 &= -c_{11} \cdot \left( +\frac{\gamma_e}{r_o} \cdot y + \frac{a}{2 \cdot V} \cdot \alpha' - \frac{a}{2 \cdot R_c} \right) \\
 T_1 &= -c_{22} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{23} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} - \frac{1}{R_c} - \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right) \\
 T_2 &= -c_{22} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{23} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} - \frac{1}{R_c} + \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right) \\
 M_1 &= -c_{23} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{33} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} - \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{1}{R_c} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right) \\
 M_2 &= -c_{23} \cdot \left( \frac{y'}{V} - \alpha \right) - c_{33} \cdot \left( \frac{\alpha'}{V} + \frac{\gamma_o}{r_o} - \frac{1}{R_c} - \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o \cdot r_o} \right)
 \end{aligned}$$



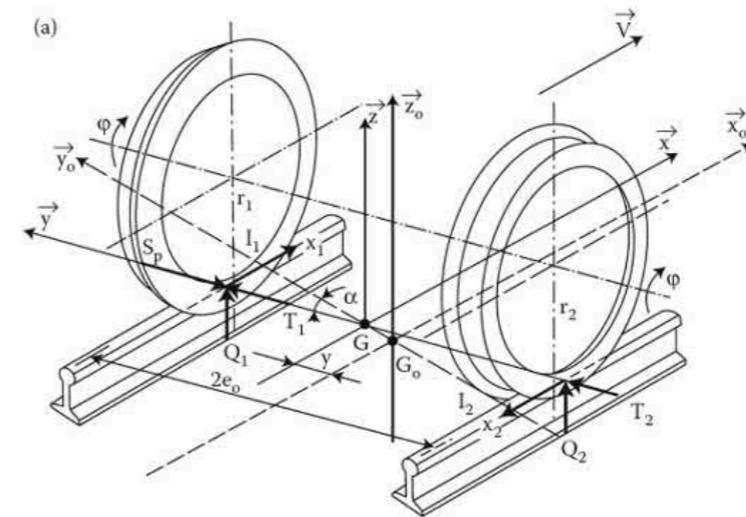
$R_c$ : radio de curvatura de la alineación horizontal.

# Fuerzas de rozamiento

## Circulación en curvas

En el caso de **movimiento en curvas de radio pequeño**, con una velocidad de desplazamiento aproximadamente igual a la velocidad de equilibrio, las fuerzas de inercia y amortiguación pueden despreciarse frente a las fuerzas elásticas. Además, al ignorar el impacto del giro, se aplican las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$X_1 = -c_{11} \cdot \left( -\frac{\gamma_e}{r_o} \cdot y + \frac{a}{2 \cdot R_c} \right)$$
$$X_2 = -c_{11} \cdot \left( +\frac{\gamma_e}{r_o} \cdot y - \frac{a}{2 \cdot R_c} \right)$$
$$T_1 = T_2 = -c_{22} \cdot \left( \frac{y'}{V} \right)$$



Como se muestra en la figura, **las fuerzas de rozamiento longitudinales** dan lugar a la **rotación horizontal del eje** y, junto con **las fuerzas de rozamiento laterales**, **activan el movimiento sinusoidal (hunting)** de los ejes de los bogies, provocando oscilaciones.

Las fuerzas de rozamiento **aparecen cuando hay una desviación entre el sentido de rodadura de las ruedas y el sentido de desplazamiento del eje**. Esto ocurre cuando se produce un **desplazamiento transversal "y"** o un **ángulo "a"** del eje con respecto a la posición de equilibrio inicial. Por lo tanto, para hacer frente a las fuerzas de rozamiento, es necesario centrarse en los **parámetros que causan dichas fuerzas: defectos de la vía**.

# Fuerzas de rozamiento

---

## ***Circulación en curvas***

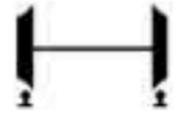
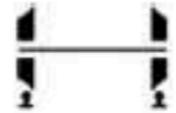
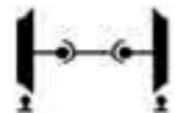
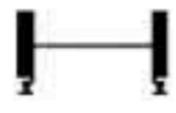
Otras medidas que contribuyen a *reducir las **fuerzas de rozamiento*** son:

- A. el giro de las ruedas a intervalos regulares,
  - B. la elección adecuada de las características constructivas de los bogies (perfil de las ruedas, diámetro de las ruedas, rigidez de la suspensión primaria, distancia entre ejes de los bogies) y
  - C. la elección adecuada de la tecnología de los bogies para la operatividad de la red.
- La presencia o ausencia de la **componente longitudinal y lateral** de las fuerzas de rozamiento depende de cómo estén conectadas las ruedas al eje,
  - La presencia o ausencia de **momento de giro** depende del ángulo formado por el plano de la superficie de rodadura de la rueda y el ángulo de rotación.

La tabla siguiente presenta las fuerzas que se desarrollan en la superficie de contacto rueda-carril para diversas tecnologías de ejes de ruedas ferroviarias (ya fabricados y teóricos) (Frederich, 1985).

# Fuerzas de rozamiento

## *Circulación en curvas*

Tecnología	Representación esquemática	Sp	T	X	M
Ejes convencionales - Ruedas de conicidad variable		Si	Si	Si	Si
Ejes con ruedas que ruedan de forma independiente - Ruedas de conicidad variable		Si	Si	No	Si
Ejes articulados - Ruedas de conicidad variable		Si	No	Si	Si
Ejes convencionales - Ruedas cilíndricas		No	Si	Si	No
Ejes convencionales - Ruedas de conicidad constante		No	Si	Si	Si
Ruedas que ruedan de forma independiente - Ruedas de conicidad variable		Si	No	No	Si
Ejes con ruedas que ruedan de forma independiente - Ruedas inclinadas de conicidad variable		Si	No	No	No
Ejes convencionales - Ruedas inclinadas de conicidad variable		Si	Si	Si	No

# Fuerzas de rozamiento

---

## ***Circulación en curvas***

Para evitar el **golpeteo de los ejes**, es esencial que se rompa el vínculo rígido entre las dos ruedas y el eje. De este modo, las dos ruedas podrán girar a **velocidades angulares diferentes**, mientras que, al mismo tiempo, seguirá siendo aplicable la siguiente ecuación matemática:

$$\omega_1 \cdot r_1 = \omega_2 \cdot r_2 = V$$

donde:

$\omega_1, \omega_2$ : Velocidades angulares de las dos ruedas.

$r_1, r_2$ : Sus radios de rodadura.

Esto garantiza la rodadura de las dos ruedas sin rozamiento y la **eliminación de las fuerzas de rozamiento longitudinales**. La tecnología de bogies con ruedas de rotación independiente se basa en esta lógica.

# Fuerzas de viento transversal

---

En el caso de vientos transversales, una fuerza transversal  $H_w$  se transfiere a través de los ejes a la superficie de rodadura del carril. Esta fuerza se considera *cuasiestática* y su dirección depende de la dirección del viento. Su punto de aplicación inicial es el centro geométrico de la superficie lateral de la caja. Se aplica la ecuación (Hibino et al., 2010).

$$H_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot V_w^2 \cdot K_2$$

donde:

$H_w$ : Fuerza del viento transversal (o lateral) (en N).

$V_w$ : Velocidad del viento (en m/seg).

$\rho$ : Densidad del aire (en kg/m<sup>3</sup>).

$S_2$ : Superficie lateral del vehículo (en m<sup>2</sup>).

$K_2$ : Coeficiente de fuerza del viento lateral (parámetro que depende de la superficie lateral externa del vehículo).

***La fuerza del viento transversal  $H_w$  no es deseable, ya que provoca un aumento del desplazamiento transversal de los ejes de las ruedas y favorece el mecanismo de vuelco del vehículo.***

Para hacer frente a los vientos transversales, se pueden aplicar las siguientes medidas:

- Instalación de barreras contra el viento.
- Reducción de la velocidad o interrupción de la circulación en zonas sometidas a fuertes vientos transversales.

# Fuerza Centrifuga no compensada

---

Cuando un vehículo de masa  $m$  circula a una velocidad  $V$  en una curva cuyo radio de curvatura es  $R$ , el centro de gravedad del vehículo genera la **fuerza centrífuga  $F_c$** , que empuja el vehículo hacia el lado exterior de la curva (figura):

$$F_c = m \cdot \alpha_c = \frac{m \cdot V^2}{R}$$

Debido al peralte de la vía  $z_p$ , actúan simultáneamente la componente transversal del peso (en dirección opuesta) y la fuerza centrífuga. Siendo:  $I = \alpha_{sc} \cdot \frac{a}{g}$

La diferencia entre estas fuerzas es la **fuerza centrífuga no compensada  $F_{nc}$** . A nivel de los ejes de ruedas y, por consiguiente, de la superficie de rodadura del carril, se aplica lo siguiente:

$$F_{c,sc} = m \cdot \alpha_{sc} = \frac{Q}{g} \cdot \alpha_{sc} = \frac{Q}{g} \cdot \left( \frac{V^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a} \right) = \frac{Q \cdot I}{a}$$

*El aumento de la velocidad  $V$  del vehículo, así como la disminución del radio de curvatura  $R$  y la disminución del peralte  $z_p$  contribuyen al aumento de la aceleración centrífuga residual.*

# Fuerza Centrifuga no compensada

---

La  $F_{c,sc}$  se considera una **fuerza cuasiestática** y siempre es indeseable, ya que no sólo provoca el desplazamiento de los ejes de las ruedas (riesgo de contacto de las pestañas), sino también problemas de confort transversal dinámico de los pasajeros. Además, ayuda al mecanismo de descarrilamiento del vehículo. Sin embargo, razones de tráfico como la coexistencia de trenes de baja y alta velocidad en la misma vía y el riesgo de deslizamiento transversal del eje de ruedas hacia el carril interior hacen indispensable la adopción de un peralte inferior al peralte de equilibrio (peralte teórico), lo que provoca la aparición de una aceleración centrífuga residual.

**Por ejemplo, cuando  $Q = 18 t$ ,  $V = 150 km/h$ ,  $R = 1.500 m$ ,  $g = 9,81 m/s^2$ ,  $a = 1,50 m$  y  $z_p = 130 mm$ , entonces  $F_{c,sc} = 5,6 kN$  y  $\alpha_{sc} = 0,307 m/s^2$ .**

Para reducir la fuerza centrífuga residual, pueden aplicarse las siguientes medidas:

- Elección racional de los datos geométricos de la curva (insuficiencia y exceso de peralte).
- Utilización de trenes basculantes.

# Fuerzas transversal total transmitida del vehículo al carril

---

Según Alias (1977) y Profillidis (1995), la fuerza transversal total  $H$  (en t) transmitida del vehículo al carril se calcula aplicando la siguiente fórmula empírica:

$$H = H_o + H_a = a_i \cdot \left( \frac{Q \cdot I}{a} \right) + \left( \frac{Q \cdot V}{1.000} \right)$$

donde:

$I$ : Insuficiencia de peralte (en caso de movimiento a lo largo de tramos curvos de vía) o defecto o torsión transversal de vía (en caso de movimiento en trayectoria recta) (en mm).

$Q$ : Carga por eje (en t).

$V$ : Velocidad de marcha (en km/h).

$a$ : distancia entre ejes de carriles en mm.

$a_i$ : Coeficiente que indica el reparto desigual de la fuerza centrífuga entre los dos ejes de un bogie (valores 1-1,1) (Montagné, 1975).

El **primer término** de la ecuación se refiere a las **fuerzas cuasiestáticas** y, concretamente, a la **fuerza centrífuga residual**.

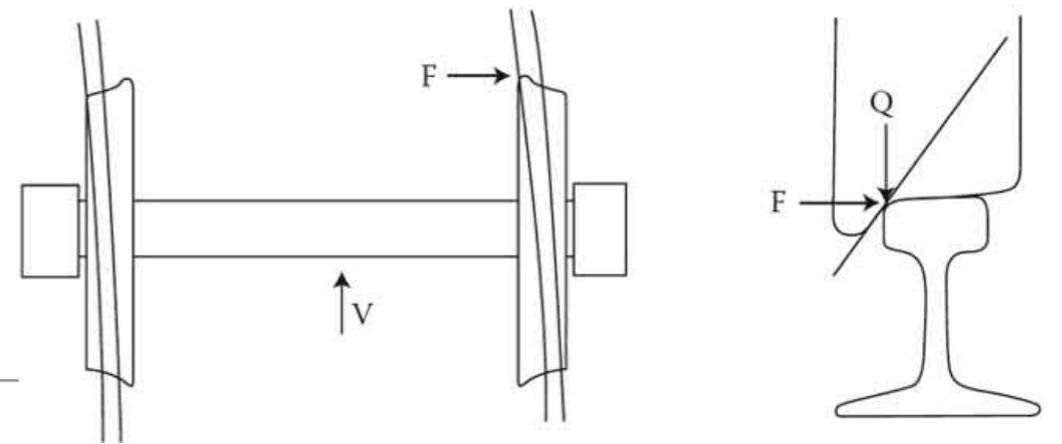
El **segundo término** se refiere a las **fuerzas dinámicas aleatorias** derivadas de las irregularidades de la alineación de la vía y de los movimientos del propio vehículo, o de sus bogies, que provocan inestabilidad por encima de una velocidad crítica (fuerzas debidas a las oscilaciones del vehículo, fuerzas de rozamiento, fuerzas gravitatorias, etc.) (Montagné, 1975).

# Fuerzas debida a alas oscilaciones del vehículo

---

Estas cargas dinámicas transversales  $P_{dyn}$ , cuyas causas son similares a las de las cargas dinámicas verticales, confieren aceleraciones transversales suplementarias a las distintas partes del vehículo. Para resolver el problema, es preciso eliminar los defectos de la vía y aplicar el rectificado de carriles.

# Fuerzas de guiado



Cuando el **desplazamiento transversal "y"** de un juego de ruedas de ferrocarril es igual al **juego "J"** entre la pestaña de la rueda y el carril, el lado exterior de la pestaña de la rueda entra en contacto con la parte interior de los carriles (figura).

Las cargas dinámicas transversales se ejercen sobre el punto de contacto y se denominan **fuerzas de guiado  $F_j$**  ( $j = 1$  ó  $2$ ).

Las fuerzas de guiado crean problemas no sólo a los pasajeros, sino también al material rodante y a la vía. Más concretamente:

- Reducen el confort dinámico de los pasajeros (> aceleraciones transversales, sacudidas).
- Aumentan considerablemente el ruido de rodadura.
- Provocan el desgaste de las ruedas y los raíles.
- Aumentan la fatiga de los bogies.
- Pueden provocar un desplazamiento lateral de la vía y el descarrilamiento de los vehículos.
- Pueden provocar el descarrilamiento debido a la subida de las ruedas.

Por lo tanto, siempre que sea posible, durante el movimiento de los vehículos ferroviarios debe evitarse el contacto de las pestañas de las ruedas.

# Fuerzas de guiado

---

Para reducir la fuerza de guiado, pueden adoptarse las siguientes medidas:

- Elección adecuada de las **características constructivas de los bogies** (perfil de la rueda, diámetro de la rueda, rigidez de la suspensión primaria del bogie, distancia entre ejes del bogie).
- Elección adecuada de la **tecnología de los bogies** para que sirva a la operatividad de la red.
- **Ampliación del juego J** en los tramos curvos estrechos de la vía ( $R_c < 150-200$  m).
- **Lubricación de la cara interior de los carriles** en los tramos curvos de la vía.

La fuerza de guiado  $F$  es de naturaleza **estocástica** (Profillidis, 2014). Su valor depende de varios parámetros. En casi todos los casos el cálculo de su valor se consigue por aproximación y mediante:

- a) Mediciones in situ a lo largo del carril con dinamómetros colocados en las ruedas.
- b) Modelos de simulación.

Existen en el mercado varios modelos de este tipo, utilizados tanto por la industria como por los investigadores (SIMPACK, UMLAB, Vampire Pro, Adams/Rail, etc.).

# Fuerzas de guiado

Las fuerzas de guiado  $F_j$  se derivan como resultado de la ecuación (todas las fuerzas individuales de esta ecuación se derivan del modelo).

$$F_j = \pm (T_1 + T_2) \pm S_p \pm F_{sc} \pm F_{res}$$

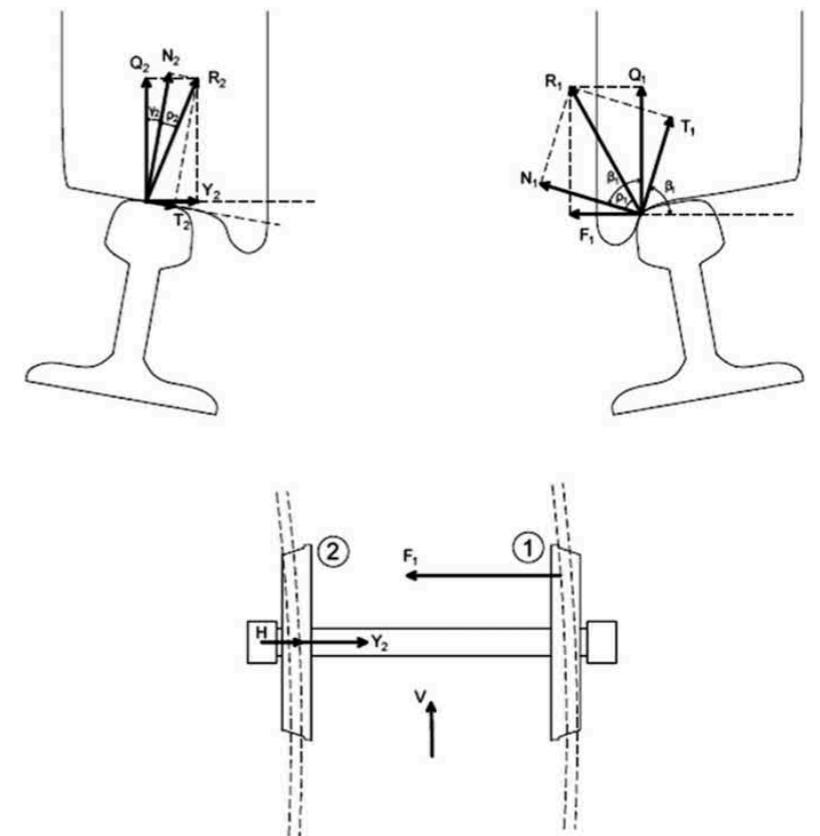
donde:

$T_1, T_2$ : Fuerzas de rozamiento laterales aplicadas en ambas ruedas.

$S_p$ : Fuerza gravitatoria total.

$F_{nc}$ : Fuerza centrífuga no compensada.

$F_{res}$ : Fuerzas laterales de los muelles de la suspensión primaria.



# Fuerzas de guiado

La ecuación siguiente es aplicable cuando el ángulo de ataque del juego de ruedas bajo descarrilamiento es grande ( $\alpha \geq 5$  rad).

$$F_1 = H + Y_2$$

donde (véase la figura):

$F_1$ : Fuerza de guiado aplicada en la rueda en fase de descarrilamiento.

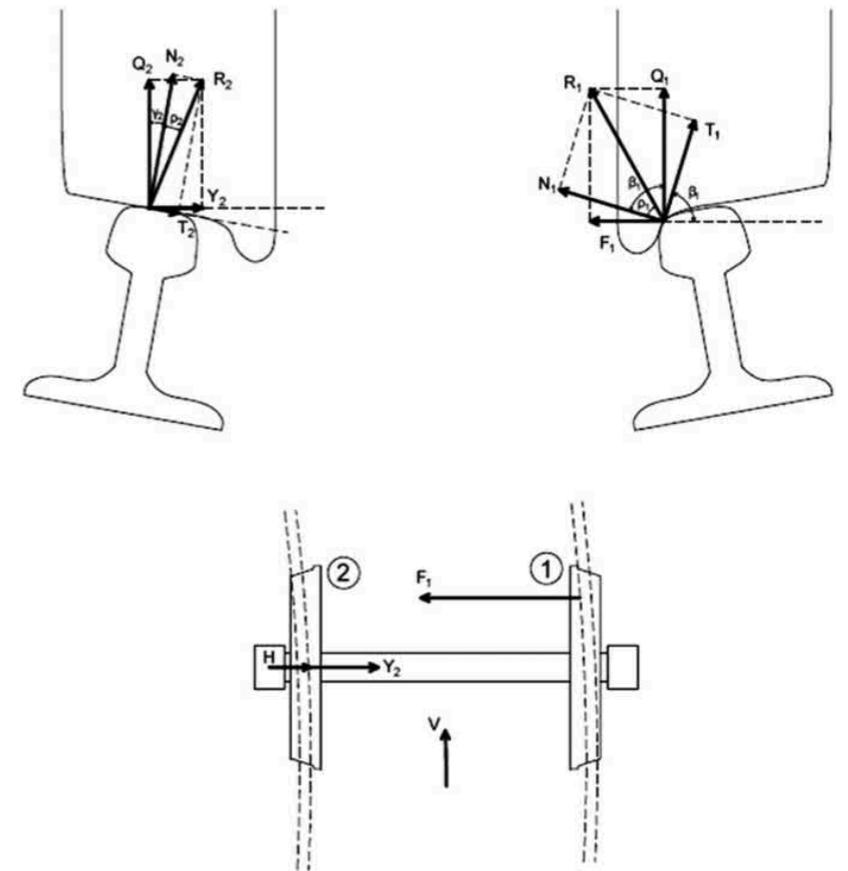
$H$ : La fuerza lateral total que se transmite del vehículo al carril (a nivel del eje de las ruedas).

$$Y_2 = Q_2 \cdot \tan(\gamma_2 + \rho_2)$$

$Q_2$ : Carga vertical estática de la rueda 2.

$\gamma_2$ : Ángulo entre la superficie de rodadura de la rueda 2 y el plano horizontal (ángulo de contacto rueda-carril).

$\rho_2$ : Ángulo de rozamiento rueda-carril de la rueda 2.



# Fuerzas de guiado

$$\tan(\gamma_2 + \rho_2) = \frac{135}{(150 + R)} \quad (\text{Amans y Sauvage, 1969; Joly, 1983})$$

El valor de  $\tan\rho_2$  depende de las condiciones atmosféricas y oscila entre 0,15 y 1,25 (Amans y Sauvage, 1969).

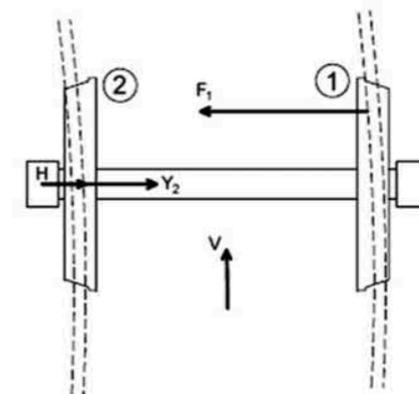
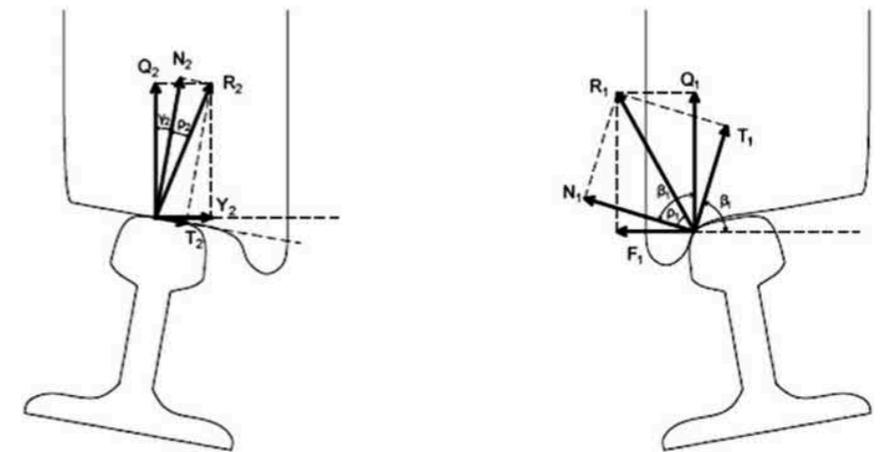
$\gamma_2 = 0,02$  (para una inclinación del carril de 1:40).

$R_c$ : Radio de alineación horizontal (en m).

$$\frac{135}{(150 + R_c)} \approx \mu \quad (\text{Joly, 1983})$$

$\mu$ : Coeficiente de adherencia.

$\beta_1$ : Ángulo de contacto carril-brida de la rueda 1.



# Descarrilamiento

---

**Definición:** El término "descarrilamiento" se utiliza para describir la pérdida definitiva de contacto de al menos una rueda del vehículo con la superficie de rodadura de la cabeza del carril.

El descarrilamiento de un vehículo ferroviario puede producirse como resultado de:

- Desplazamiento lateral (desplazamiento) de la vía.
- Vuelco/inclinación del vehículo.
- Subida de la rueda.

Las **causas** del descarrilamiento pueden ser:

- **internas al sistema ferroviario** (grandes fuerzas ejercidas por el vehículo sobre la vía, velocidad excesiva del tren, mal estado y diseño del material rodante, mala calidad de la vía y del trazado de la vía, derrumbamiento de terraplenes, etc.) o
- **externas al sistema ferroviario** (error humano, viento cruzado, obstáculos en la vía,,etc.).

# Descarrilamiento

---

## ***Descarrilamiento debido al vuelco del vehículo***

El descarrilamiento del vehículo debido al vuelco puede producirse tanto durante el movimiento a lo largo de *segmentos curvos* de la vía como durante el movimiento a lo largo de una *trayectoria recta*.

## ***Comprobación de descarrilamiento por vuelco a lo largo de segmentos curvos de la vía***

El vuelco puede producirse hacia el *exterior* o hacia el *interior* de la curva.

***Vuelco hacia el exterior de la curva*** (Esveld, 2001) se puede deber:

- **Déficit de peralte** significativo en relación con la velocidad de paso  $V_p$  y el radio de curvatura, lo que se traduce en un aumento del valor de la fuerza centrífuga residual lateral  $F_{nc}$ .
- **Fuerza de viento** cruzado  $H_w$  dirigida hacia el exterior de la curva.
- **Distribución desigual de la carga en las dos ruedas** con menor carga en la rueda interior ( $Q_1 > Q_2$ ). Todas las razones anteriores dan lugar al desarrollo de momentos, que tienden a volcar el vehículo hacia el carril exterior.

# Descarrilamiento

---

## *Descarrilamiento debido al vuelco del vehículo*

**Vuelco hacia el interior de la curva** se debe deber:

- **Fuerza del viento** cruzado  $H_w$  dirigida hacia el interior de la curva.
- **Inmovilización de los vehículos** ( $V = 0$ ) en un segmento de vía curvada con un peralte  $z_p$  elevado.
- **Baja carga por eje.**
- **Desplazamiento de la carga** hacia las ruedas interiores.

En estas circunstancias, se desarrollan momentos que tienden a volcar el vehículo hacia el carril interior, lo que, en última instancia, provoca el descarrilamiento.

*La comprobación del descarrilamiento por vuelco puede realizarse mediante formulaciones **analíticas** o **empíricas**.*

# Descarrilamiento

---

## *Descarrilamiento debido al vuelco del vehículo*

### **Utilización de relaciones analíticas**

Esta comprobación se realiza teniendo en cuenta el momento de fuerzas con respecto a la cabeza de carril sobre la que vuelca el vehículo (figura). Se aplica la ecuación (Rivier, 1984/85):

$$V_{der,ov}^2 = \frac{R \cdot g \cdot \left( \frac{z_p}{a} + \frac{a}{2h_{KB}} \right)}{1 - \left( \frac{z_p}{a} \cdot \frac{a}{2h_{KB}} \right)}$$

donde:

$V_{der,ov}$ : Velocidad a la que se produce el descarrilamiento por vuelco.

$h_{KB}$ : Distancia entre el centro de gravedad del vehículo y la superficie de rodadura del carril.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$a$ : Distancia entre los ejes verticales de simetría de los dos carriles.

# Descarrilamiento

---

## *Descarrilamiento debido al vuelco del vehículo*

### *Utilización de fórmulas empíricas*

Sólo es aplicable cuando  $h_{KB} > 2,25$  m y se refiere únicamente a los casos en que el vuelco se produce hacia el exterior de la vía (Amans y Sauvage, 1969).

Para que se produzca el descarrilamiento por vuelco debe darse la siguiente condición:

$$\alpha_{sc,max} > \frac{g}{3}$$

donde:  $\alpha_{sc,max}$ : Aceleración sin compensar lateral máxima permitida.

Además, se aplican las siguientes ecuaciones:

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

De las ecuaciones puede deducirse que para que se produzca un descarrilamiento hacia el exterior de la vía por vuelco debe cumplirse la siguiente condición:

$$\alpha_{sc} = g \cdot \frac{I}{a} > \frac{g}{3} \rightarrow I > \frac{a}{3} \rightarrow V > V_{der,ov} = \sqrt{R \cdot g \cdot \left( \frac{1}{3} + \frac{z_p}{a} \right)}$$

# Descarrilamiento

---

## *Descarrilamiento debido al vuelco del vehículo*

### **Comprobación de descarrilamiento por vuelco - movimiento a lo largo de segmentos de vía rectos**

Al moverse a lo largo de segmentos de vía rectos, este tipo particular de descarrilamiento puede producirse debido a **fuertes vientos transversales** y siempre siguiendo la dirección del viento.

### **Utilizando relaciones analíticas**

Esta comprobación se efectúa teniendo en cuenta los momentos:

- A. de la fuerza del viento transversal, y
- B. del peso total del vehículo en relación con la cabeza de carril sobre la que vuelca el vehículo.

Se aplican las siguientes ecuaciones:  $M_t \cdot g \cdot \frac{a}{2} = q_o^* \cdot H_w$        $H_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot V_w^2 \cdot K_2$

$$V_w = \sqrt{\frac{M_t \cdot g \cdot a}{q_o^* \cdot \rho \cdot S_2 \cdot K_2}}$$

donde:

$M_t$ : Masa total del vehículo (en kg).

$H_w$ : Fuerza del viento transversal (o lateral) (en N).

$V_w$ : Velocidad del viento (en m/seg).

$\rho$ : Densidad del aire (en kg/m<sup>3</sup>).

$S_2$ : Superficie lateral del vehículo (en m<sup>2</sup>).

$K_2$ : Coeficiente de fuerza del viento lateral (parámetro que depende de la superficie exterior lateral de un vehículo).

$q_o^*$  (= 1,25 $q_o$ ): Valor compensado de la altura nominal del centro de la fuerza del viento transversal, tomado de la superficie de rodadura de los raíles (en m).

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por desplazamiento de la vía**

En el caso de descarrilamiento por desplazamiento de la vía, el paquete de vía (carriles + traviesas) de un segmento de vía se desplaza por efecto de fuerzas laterales importantes, provocando el descarrilamiento de uno o varios vehículos del tren.

El descarrilamiento por desplazamiento de la vía se produce cuando:

$$H > H_R$$

donde:

H: Fuerza lateral total, que se transfiere del vehículo al carril.

H<sub>R</sub>: Resistencia lateral de la vía.

Este tipo de descarrilamiento se debe únicamente a **causas internas al sistema ferroviario** y [es el tipo más común de descarrilamiento](#).

La fuerza lateral total H (en t) puede calcularse mediante la fórmula empírica:

$$H = H_o + H_a = a_i \cdot \left( \frac{Q \cdot I}{a} \right) + \left( \frac{Q \cdot V}{1.000} \right)$$

# Descarrilamiento

---

## ***Descarrilamiento por desplazamiento de la vía***

En cuanto al cálculo de la resistencia lateral de la vía  $H_R$  se han propuesto diversas fórmulas (ORE, 1984; Amans y Sauvage, 1969; Prud'homme, 1967). A título indicativo, se ofrecen las siguientes fórmulas (la  $H_R$  se calcula en t).

### **Límite de Prud'homme**

$$H_R = 0,85 \cdot \left( 1 + \frac{Q}{3} \right)$$

donde:

$H_R$ : Resistencia lateral de la vía (en t).

$Q$ : Carga vertical por eje (en t).

La ecuación (con el factor multiplicador 0,85) tiene en cuenta la alineación de la vía y las fuerzas térmicas aplicadas sobre los carriles, pero supone una vía desestabilizada.

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por desplazamiento de la vía: Otras formulas empíricas**

### **Para traviesas de hormigón**

$$H_R = 0,6 \cdot (Q + 6) \cdot \left( 1 - 0,4 \cdot e^{\frac{T_t}{60.000}} \right)$$

donde:

Q: Carga vertical por eje (en t).

T<sub>t</sub>: Carga de tráfico total (en t).

Para una vía totalmente estabilizada ( $T_t = \infty$ ,  $e^{\frac{T_t}{60.000}} = 0$ ) la ecuación anterior se transforma como sigue:

$$H_R = 0,6 \cdot Q + 3,6$$

Para una vía sin estabilizar ( $T_t = 0$ ,  $e^{\frac{T_t}{60.000}} = 1$ ) la ecuación anterior se transforma como sigue:

$$H_R = 0,36 \cdot Q + 2,16$$

# Descarrilamiento

---

**Descarrilamiento por desplazamiento de la vía: Otras formulas empíricas**

**Para traviesas de madera**

$$H_R = 0,5 \cdot (Q + 4) \cdot \left( 1 - 0,4 \cdot e^{\frac{T_t}{60.000}} \right)$$

Para vía totalmente estabilizada ( $T_t = \infty$ ):

$$H_R = 0,5 \cdot Q + 2$$

Para una vía sin estabilizar ( $T_t = 0$ ):

$$H_R = 0,3 \cdot Q + 1,2$$

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por desplazamiento de la vía: Otras formulas empíricas**

Además, si consideramos que:  $z_{t,max}(mm) = 11,8 \cdot \frac{V_{max}^2(Km/h)}{R(m)}$  y  $I = z_{t,max} - z_p$

Teniendo en cuenta las ecuaciones:

$$H_R = 0,6 \cdot (Q + 6) \cdot \left(1 - 0,4 \cdot e^{\frac{T_t}{60.000}}\right) \quad H_R = 0,5 \cdot Q + 2 \quad H = a_i \cdot \left(\frac{Q \cdot I}{a}\right) + \left(\frac{Q \cdot V}{1.000}\right)$$

así como suponiendo una distribución uniforme de la fuerza centrífuga entre los dos ejes del bogie ( $a_i = 1$  y  $a = 1500$ ), puede concluirse, basándose en la ecuación  $H > H_R$ , que la velocidad  $V_{der,dis}$  a partir de la cual se produce el descarrilamiento debido al desplazamiento lateral de la vía (para traviesas de hormigón o de madera sobre una vía totalmente estabilizada) viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Vía con traviesas de hormigón: } & \left(11,8 \cdot \frac{Q}{R}\right) \cdot V_{der,dis}^2 + 1,5 \cdot Q \cdot V_{der,dis} - Q \cdot (z_p + 900) - 5400 = 0 \\ \text{Vía con traviesas de madera: } & \left(11,8 \cdot \frac{Q}{R}\right) \cdot V_{der,dis}^2 + 1,5 \cdot Q \cdot V_{der,dis} - Q \cdot (z_p + 750) - 3000 = 0 \end{aligned}$$

donde: Q (t), R (m),  $z_p$  (mm), y  $V_{der,dis}$  (km/h)

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por desplazamiento de la vía: Otras formulas empíricas**

En los segmentos de vía rectos, debido a la ausencia de peralte, el parámetro  $I$  (insuficiencia de peralte) expresa el defecto transversal de la vía (o la torsión de la vía). En los casos en que el defecto transversal de la vía es nulo, teóricamente no existe riesgo de descarrilamiento debido al desplazamiento lateral de la vía. Si fijamos  $I = 0$ , las ecuaciones anteriores se transforman :

$$\text{Vía con traviesas de hormigón: } V_{der,dis} = 600 + \frac{3600}{Q}$$

$$\text{Vía con traviesas de madera: } V_{der,dis} = 500 + \frac{2000}{Q}$$

Para  $Q = 22,5$  t requiere  $V_{der,dis} \geq 760$  km/h (para traviesas de hormigón) y  $V_{der,dis} \geq 588,99$  km/h (para traviesas de madera), para que se produzca un descarrilamiento por desplazamiento lateral de la vía.

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por desplazamiento de la vía: Otras formulas empíricas**

Como se deriva de lo anterior, para **reducir el riesgo de un desplazamiento lateral de la vía**, debemos:

- A. reducir la fuerza horizontal  $H$  que se transfiere del vehículo al carril o
- B. aumentar la resistencia transversal de la vía  $H_R$  o
- C. ambas.

En cuanto a  $H$ , los parámetros que la afectan se derivan directa o indirectamente de la ecuación:

$$H = a_i \cdot \left( \frac{Q \cdot I}{a} \right) + \left( \frac{Q \cdot V}{1.000} \right).$$

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por desplazamiento de la vía: Otras formulas empíricas**

En lo que respecta a  $H_R$ , las siguientes opciones/parámetros aumentan su valor:

- traviesas de hormigón pesadas,
- carriles soldados continuos pesados,
- sujeciones elásticas,
- vía totalmente estabilizada,
- vía en placa,
- muy buen estado de la subestructura del lecho de vía

En el caso de la vía con balasto:

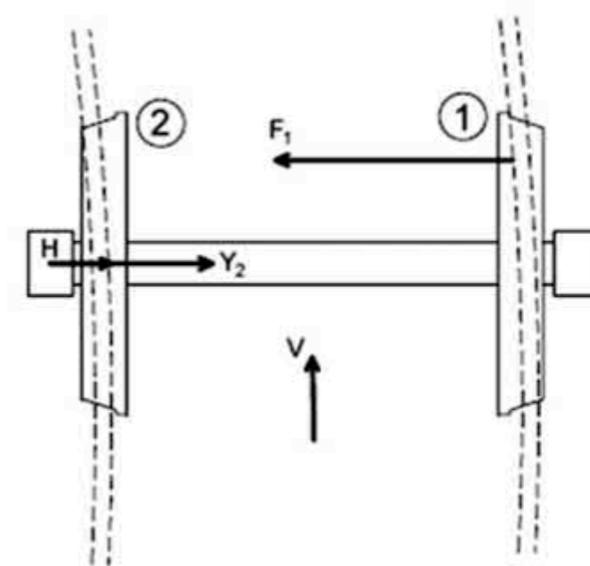
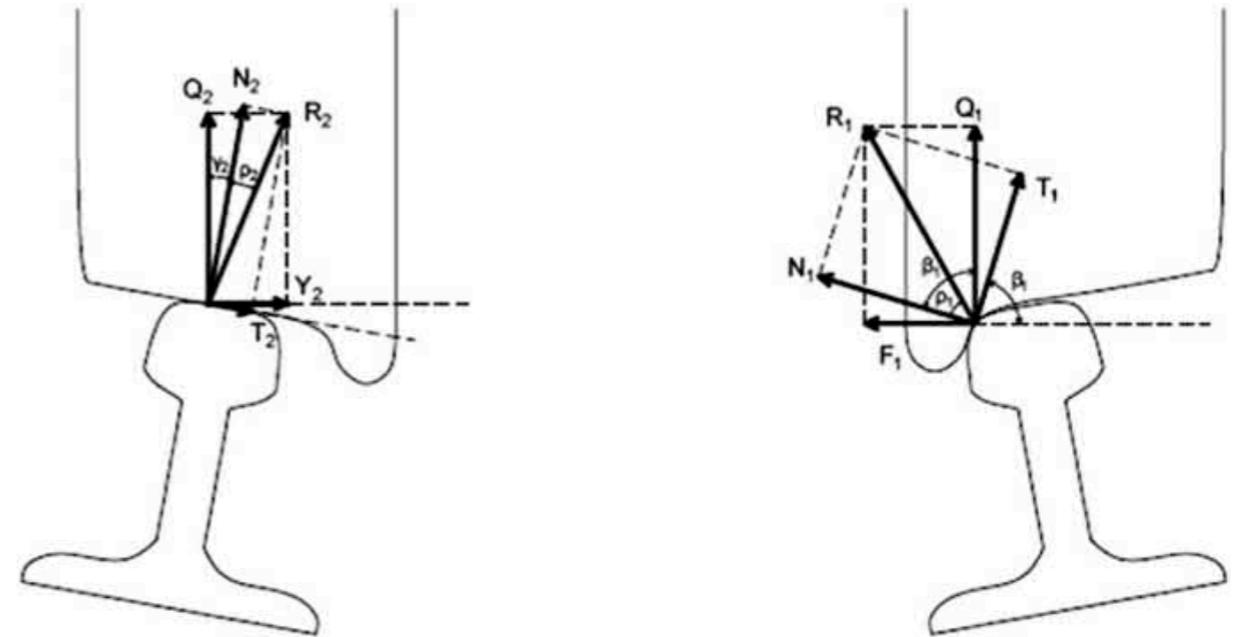
- gran anchura de la superficie de apoyo de balasto;
- elevado espesor de balasto;
- alto grado de compactación y dureza del balasto; y
- d) bateo poco frecuente.

# Descarrilamiento

## **Descarrilamiento por remonte de la pestaña**

Para que se produzca un descarrilamiento por remonte de la pestaña, en primer lugar debe producirse el **contacto** de la **pestaña** con la **cara interior del carril** y, por tanto, aplicarse una **fuerza de guiado (F)**.

En la superficie de contacto de la pestaña de la rueda con la cara interior del carril (figura), la rueda impone al carril una fuerza de guiado  $F_1$  y la carga vertical de la rueda  $Q_1$ . Recibe la reacción vertical  $N_1$  y la fuerza de rozamiento lateral  $T_1$  (cuando se produce el deslizamiento, la fuerza  $T_1$  es igual a la fuerza de Coulomb).



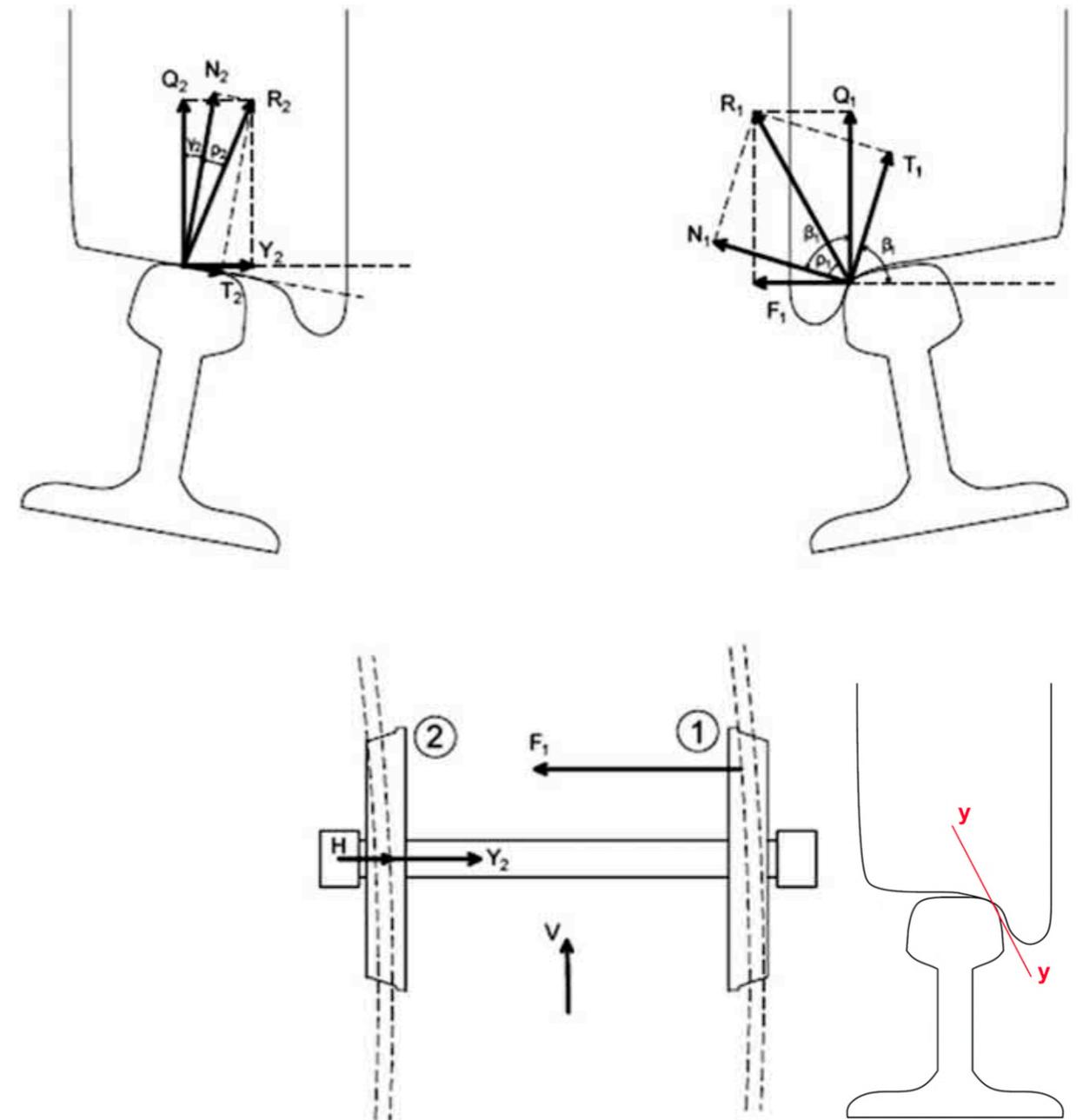
# Descarrilamiento

## **Descarrilamiento por remonte de la pestaña**

En la práctica, el descarrilamiento por remonte de la pestaña se produce cuando la **resultante de las proyecciones de todas estas fuerzas** sobre el **eje  $yy$**  (eje de la fuerza de descarrilamiento) se dirige **hacia arriba** y el tiempo de aplicación de esta fuerza resultante es lo suficientemente largo como para que la rueda ascienda por encima del carril (figura).

El descarrilamiento puede producirse cuando se produce una descarga significativa de la rueda descarrilada con carga simultánea de la rueda no descarrilada.

**Este fenómeno puede observarse en caso de movimiento a baja velocidad en curvas con un radio de curvatura pequeño y valores elevados de peralte y torsión.**



# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por remonte de la pestaña**

Normalmente se produce por causas externas al sistema ferroviario, es decir, por **mal funcionamiento y ajuste de las agujas**, etc.

La mayoría de los descarrilamientos se producen en zonas de agujas y cruzamientos debido a varias causas. El descarrilamiento puede producirse en desvíos, en zonas de agujas, cuando la fuerza centrífuga desarrollada es significativamente grande (en desvíos rectos no se da peralte a la vía) y la resistencia lateral de la vía es alta (descarrilamientos repentinos) (Centre for Advanced Maintenance Technology, 1998).

El riesgo de descarrilamiento por remonte de la pestaña aumenta cuando se produce:

- Un aumento del valor de la fuerza de guiado.
- Un aumento del tiempo de aplicación de la fuerza de guiado.
- Un aumento del valor del coeficiente de rozamiento rueda-carril (durante la lluvia el riesgo de descarrilamiento por remonte de la pestaña es menor).
- Aumento del valor del ángulo de inclinación del juego de ruedas
- Una disminución del valor del ángulo de contacto entre el carril y la pestaña de la rueda.
- Una disminución del valor de la carga vertical sobre la rueda descarrilada con un aumento simultáneo de la carga vertical de la rueda no descarrilada.

Se requiere un cierto tiempo, por lo que la rueda descarrilada recorre cierta distancia en la vía, normalmente algunos metros. Esta distancia se denomina "distancia de subida de la pestaña" y se define como la distancia recorrida desde el momento en que se aplica el valor total de la fuerza de guiado hasta el momento en que el ángulo de la pestaña de contacto rueda-carril alcanza los  $26,6^\circ$  (Dos Sandos et al., 2010).

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por remonte de la pestaña**

Para comprobar el descarrilamiento debido al remonte de la pestaña pueden utilizarse las siguientes "herramientas":

## **Criterios que evalúan la relación $F_1 / Q_1$**

El descarrilamiento se evita cuando:

$$\frac{F_1}{Q_1} < K_d$$

donde:

$K_d$ : Factor de descarrilamiento (descarrilamiento debido a la subida de la rueda).

$Q_1$ : Carga estática vertical de la rueda bajo descarrilamiento (suponiendo la rueda 1).

$F_1$ : Fuerza de guiado.

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento por remonte de la pestaña**

Para comprobar el descarrilamiento debido al remonte de la pestaña pueden utilizarse las siguientes "herramientas":

### **Criterios que evalúan la relación $F_1 / Q_1$**

Tales criterios se encuentran en la bibliografía pertinente (FP7, 2011; Iwnicki, 2006; Ishida y Matsuo, 1999; Alias, 1977; Profillidis, 2005) e incluyen de forma indicativa los siguientes:

- Criterio de Nadal (se supone que el ángulo de ataque rueda-carril no es cero).
- Criterio de Weinstock.
- Criterio de Chartet (se aplica para ángulos de ataque de  $\alpha > 1^\circ$ ).
- Criterio de descarrilamiento para ángulos de ataque de  $\alpha > 5$  mrad.

Según la bibliografía pertinente (FP7, 2011; Iwnicki, 2006; Ishida y Matsuo, 1999; Umdrucke zur Grundvorlesung, 2002/2003):

- En Japón y Europa Occidental se supone que  $K_d = 0,8$ .
- En Sudamérica se supone que  $K_d = 1,0$ .
- En China se supone que el valor límite de  $K_d$  es 1,0 mientras que el límite de riesgo se toma igual a  $K_d = 1.2$

# Descarrilamiento

## Descarrilamiento por remonte de la pestaña

Para comprobar el descarrilamiento debido al remonte de la pestaña pueden utilizarse las siguientes “herramientas”:

### Fórmula empírica que calcula la velocidad a partir de la cual un vehículo descarrila debido al remonte de la pestaña

Igualando las siguientes formulas (Rivier, 1984/85):

$$F_{c,sc} = \frac{Q}{4} \quad F_{c,sc} = \frac{Q}{g} \cdot \left[ \frac{V^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a} \right]$$

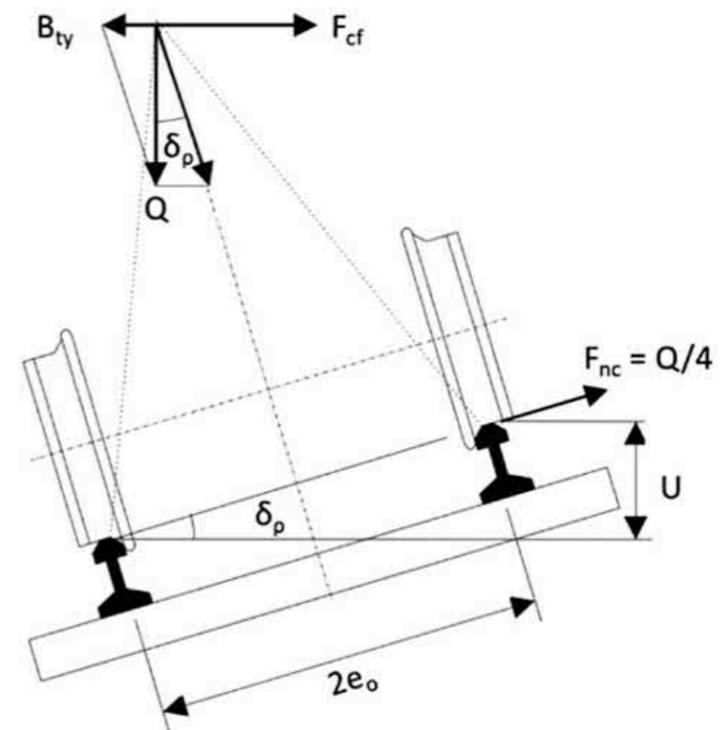
Se obtiene:

$$V_{der,wcl} = \sqrt{R \cdot g \cdot \left( \frac{z_p}{a} + \frac{1}{4} \right)}$$

donde:

$V_{der,wcl}$ : Velocidad a partir de la cual se produce el descarrilamiento debido al remonte de la pestaña.

Las ecuaciones  $F_{c,sc} = \frac{Q}{4}$  y la de  $V_{der,wcl}$  han sido sugeridas por el Profesor Rivier de la Escuela Politécnica Federal de Lausana y se basan en datos puramente experimentales. Corresponden a las condiciones menos favorables para el descarrilamiento debido al remonte de la pestaña.



# Descarrilamiento

## **Descarrilamiento por incremento del ancho de vía o vuelco del carril**

En este caso, debido a las grandes fuerzas laterales que de las ruedas ejercen en los carriles en las curvas, ambos carriles pueden experimentar un desplazamiento lateral significativo y/o el vuelco de la cabeza del carril, lo que a menudo provoca que la rueda que no descarrila caiga entre los dos carriles (Figura) (Iwnicki, 2006; Blader, 1990).

El desgaste del ancho de vía es otra de las causas del incremento del ancho de vía.

Para la comprobación del descarrilamiento causado por el incremento del ancho de vía se utiliza la siguiente fórmula (Figura):

$$G \geq B + e + w_{wh}$$

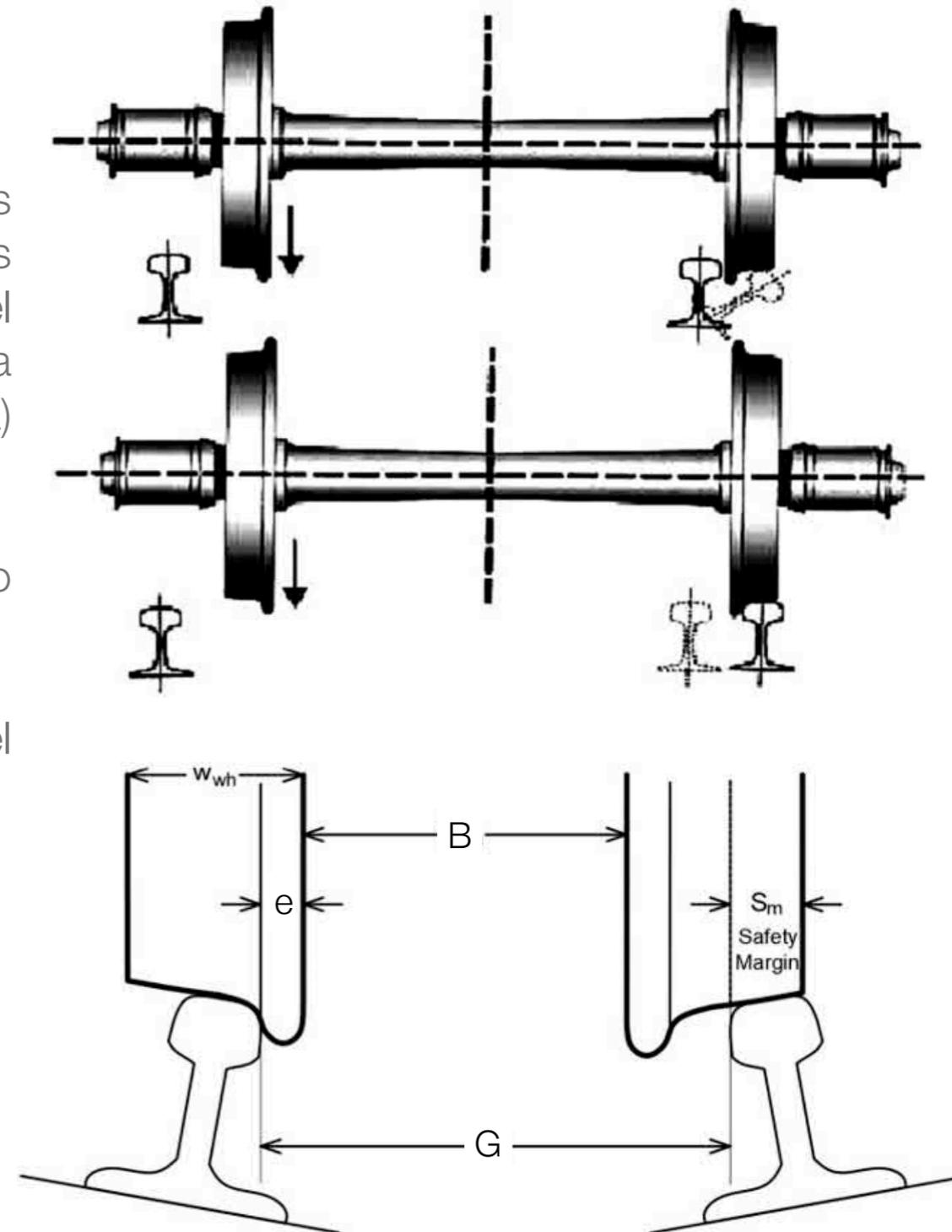
donde:

G: Ancho de vía.

e: Espesor de la pestaña.

B: Distancia entre ruedas (ancho interior).

$w_{wh}$ : Anchura de rueda.



# Descarrilamiento

## **Descarrilamiento por incremento del ancho de vía o vuelco del carril**

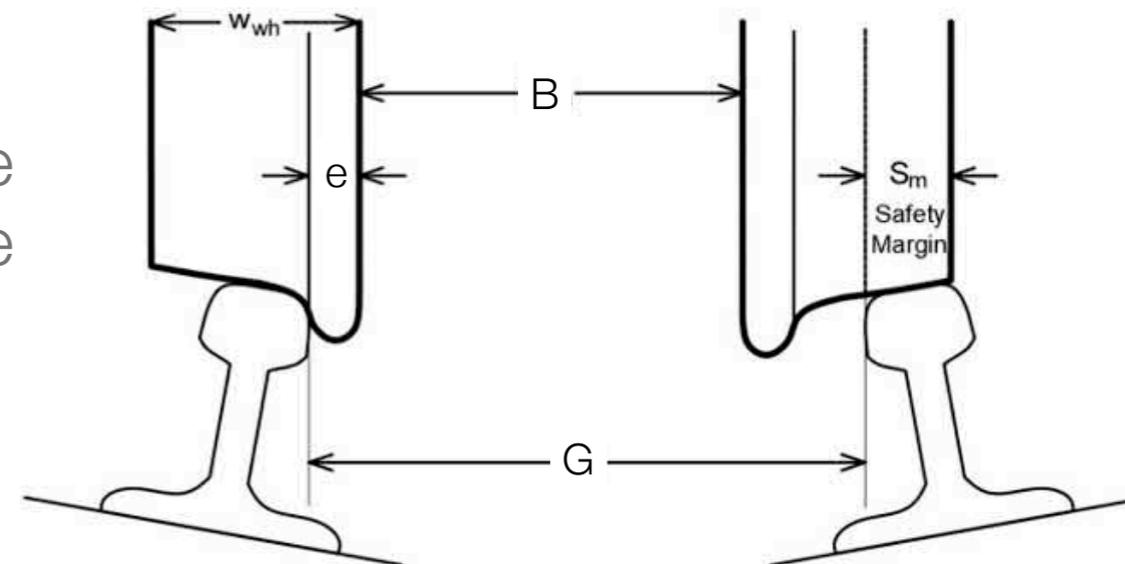
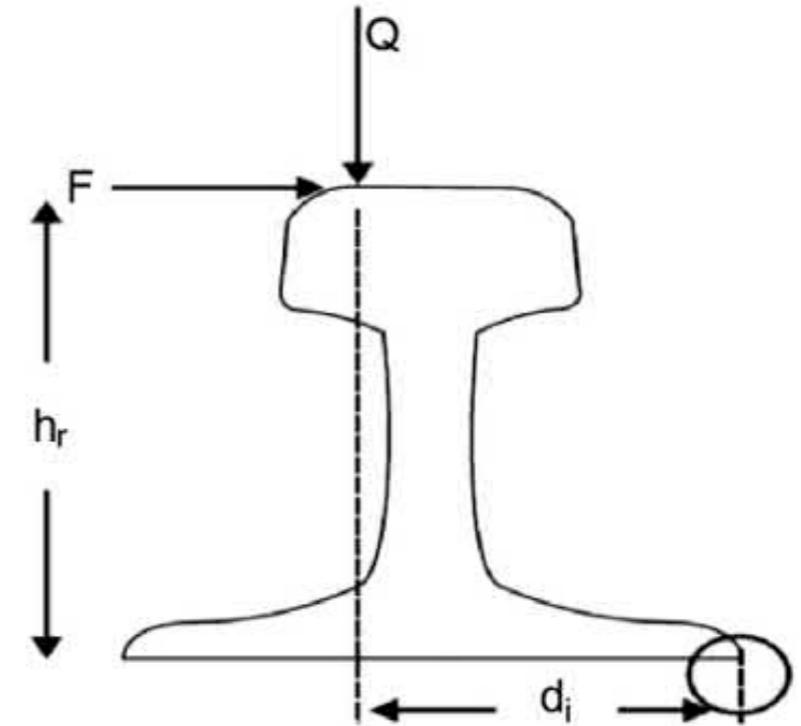
Para la comprobación del descarrilamiento causado por el vuelco del carril se utiliza la siguiente fórmula (Iwnicki, 2006) (Figura):

$$F > Q \cdot \frac{d_i}{h_r}$$

donde:

$h_r$ : Altura del carril.

$d_i$ : Distancia máxima entre el punto de contacto de las cargas verticales totales que se imponen sobre el carril, desde el borde del patin (Figura).



# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento en desvíos**

En los desvíos rectos y concretamente en la parte circular del desvío, no se prevé peralte de la vía ( $z_p = 0$ ), ni sobreaancho, ni curva de transición.

En caso de que tren entra en el cambio con una velocidad muy superior a la permitida por el radio de la alineación horizontal del desvío, debido al aumento de la fuerza centrífuga, puede producirse un descarrilamiento por remonte de la pestaña.

En desvíos rectos se aplica la siguiente ecuación:

$$z_p = z_t - I = 0 \quad \text{siendo:} \quad z_t = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R}$$

donde:

$z_t$ : Peralte teórico =  $11,8 V^2 / R$  (mm)

$I$ : Insuficiencia de peralte (en mm).

$V$ : Velocidad de paso por el desvío (en km/h).

$z_p$ : Peralte de la vía (en mm).

$R$ : Radio de curvatura del desvío (en m).

Sustituyendo la dos ecuaciones anteriores se concluye que:

$$V = 0,29 \cdot \sqrt{R \cdot I}$$

# Descarrilamiento

---

## **Descarrilamiento en desvíos**

Sustituyendo la dos ecuaciones anteriores se concluye que:

$$V = 0,29 \cdot \sqrt{R \cdot I}$$

En base a lo anterior y suponiendo  $z_p = 0$ , se puede calcular la velocidad de descarrilamiento para diversas causas de descarrilamiento, se transforman como sigue:

Descarrilamiento por vuelco del vehículo:

$$V_{der,ov} > \sqrt{R \cdot \frac{g}{3}} \qquad V_{der,ov} > \sqrt{\frac{R \cdot g \cdot a}{2 \cdot h_{KB}}}$$

Descarrilamiento debido al desplazamiento de la vía:

Para una vía totalmente estabilizada con traviesas de hormigón:

$$\left(11,8 \cdot \frac{Q}{R}\right) \cdot V_{der,dis}^2 + 1,5 \cdot Q \cdot V_{der,dis} - Q \cdot 900 - 5400 = 0$$

Para una vía totalmente estabilizada con traviesas de madera:

$$\left(11,8 \cdot \frac{Q}{R}\right) \cdot V_{der,dis}^2 + 1,5 \cdot Q \cdot V_{der,dis} - Q \cdot 750 - 3000 = 0$$

Descarrilamiento debido al remonte de la pestaña:  $V_{der,wcl} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{4}}$

Específicamente para los desvíos, el valor del factor de descarrilo  $K_d > F_1/Q_1$  debe reducirse. Según la bibliografía (Amans y Sauvage, 1969; Profillidis, 1995) debe tomarse igual a 0,4. Por último, de acuerdo con la bibliografía (Franklin, 2018), la observación y la experimentación indican que, por motivos de seguridad,  $F/Q$  en los desvíos y cruzamientos debe limitarse a un valor del orden de 0,8.

# Referencias bibliográficas

---

- Pyrgidis, C.N. (2022) Railway Transportation Systems. Design, Construction and Operation. Second Edition. CRC Press.
- Profillidis, V.A. (2022) Railway Planning Management and Engineering. Routledge.
- García Díaz-de-Villegas, J.M. (2007) Ferrocarriles. Publicaciones de la E.T.S. Ingenieros de Caminos, Santander.
- López Pita, A. (2006) Infraestructuras ferroviarias. Edición UPC.