



Universidad
Politécnica
de Cartagena

FERROCARRILES



Curso 2024/2025

4º Grado Ingeniería Civil

Profesora: Pilar Jiménez Gómez

E-mail: pilar.jimenez@upct.es



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Índice

**Bloque 1.
Sección transversal ferroviaria.**

**Bloque 2.
Geometría de la vía. Trazado**

**Bloque 3
Comportamiento mecánico de la vía**

**Bloque 4.
Calidad y mantenimiento**

**Bloque 5.
Instalaciones**



Universidad
Politécnica
de Cartagena

BLOQUE 1. SECCIÓN TRANSVERSAL FERROVIARIA

Índice

1. Introducción
2. El material móvil
3. La vía ferroviaria
4. Los aparatos de vía
5. Interacción rueda – carril



5

Interacción rueda – carril

Tracción ferroviaria

Dinámica longitudinal del tren

- 5.1. Introducción
- 5.2. Resistencia al avance
- 5.3. Potencia de la locomotora o bogies motores
- 5.4. La adherencia
- 5.5. Curvas del movimiento del tren
- 5.6. Frenado



5.1. Introducción

Rodadura acero – acero

- **Ventajas:**
 - ✓ Débil resistencia al avance
 - ✓ Elevada capacidad portante (20 – 22,5 tn / eje)
 - ✓ Bajo desgaste en carriles y ruedas
- **Inconvenientes:**
 - ✓ Débil adherencia
 - ✓ Limitación de pendientes de traza
 - ✓ Contacto rígido
 - ✓ Valor elevado de la relación tara/carga: vehículos muy pesados



5.1. Introducción

- **Dinámica longitudinal del tren:** estudio del movimiento del tren en la dirección de la vía y las fuerzas (aceleradoras o retardadoras) que inciden sobre ese movimiento.
- **Fuerzas longitudinales:**
 - **Fuerzas pasivas:** aquellas que soporta el tren sin que el mismo realice ninguna acción especial. Por ejemplo, la resistencia al avance (en recta y en curva) y la fuerza gravitatoria.
 - **Fuerzas activas:** aquellas que se derivan de acciones del propio tren, en concreto, las fuerzas de tracción y frenado.



5.1. Introducción

Movimiento del tren:

*ESFUERZO que debe proporcionar el material motor capaz de vencer los **ESFUERZOS RESISTENTES** que se oponen a la marcha*

Tracción ferroviaria

1. Los **ESFUERZOS RESISTENTES** que hay que vencer para arrancar, acelerar y hacer rodar un tren a velocidad V
2. El esfuerzo motor F a prever para el arranque, aceleración y para mantener la velocidad V. De este esfuerzo se deduce la **POTENCIA** de la locomotora o coches motores

$$\text{Energía} = \text{Trabajo} = \text{Fuerza} * \text{distancia} = F.L$$

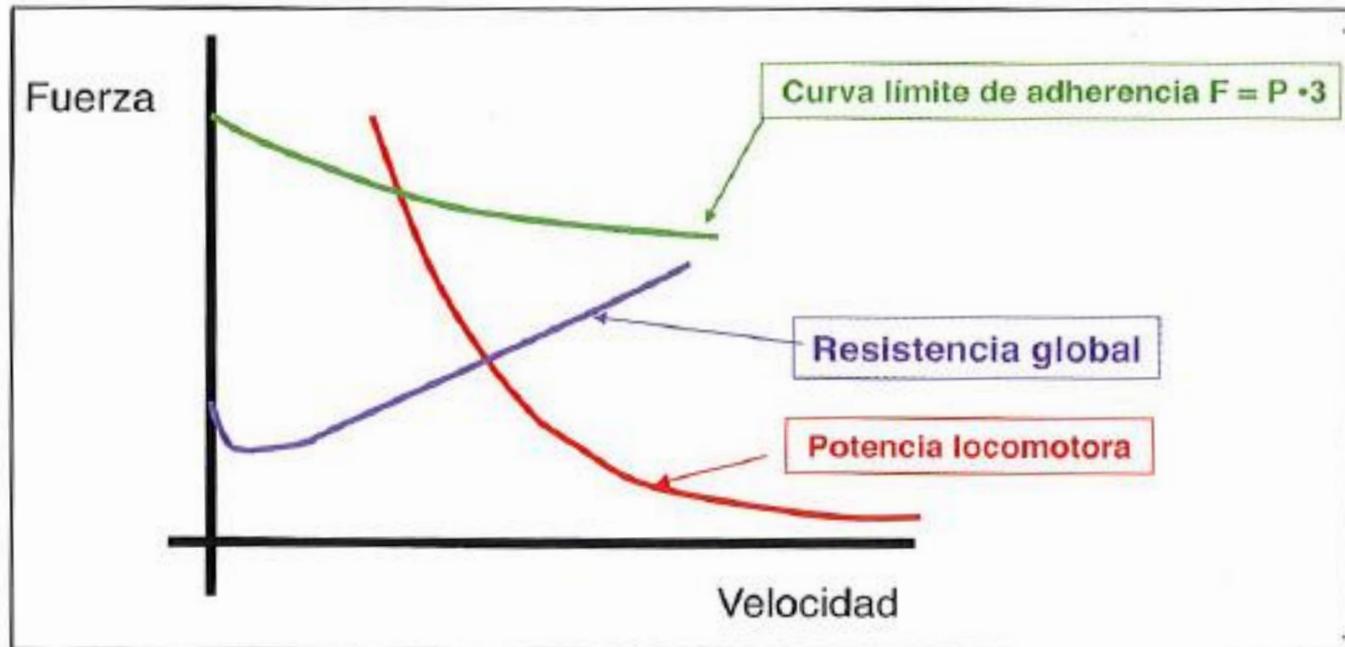
$$\text{Potencia} = \text{Trabajo} / \text{tiempo} = \text{Fuerza} * \text{distancia} / \text{tiempo} = F.V$$

3. Las limitaciones que impone la **ADHERENCIA** al esfuerzo motor en llanta
4. El movimiento en régimen de **FRENADO**



5.1. Introducción

Tracción ferroviaria



Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.



5.1. Introducción

Problemas prácticos que resuelve la tracción ferroviaria:

- Determinar la **potencia** de las locomotoras (consumo de energía del tren)
- Determinar la **carga** máxima remolcada
- Calcular la **velocidad** máxima de un tren (tiempos de viaje)
- Calcular la capacidad de **aceleración** de un tren
- **Pendientes** máximas



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**

Esfuerzos de resistencia al avance por unidad de peso (1 daN para mover 1 t de masa de tren a velocidades bajas en horizontal)

Resultante de las fuerzas pasivas (de distinta naturaleza) que se oponen al movimiento del tren en la dirección longitudinal de la vía.

- **Tipos**

- ✓ A velocidad constante – **Resistencia al avance total**

- En recta y horizontal

- Resistencia a la rodadura (rueda – carril)
- Rozamientos internos de las partes móviles y giratorias del tren

} Resistencia mecánica

- Resistencia debida a la entrada de aire (refrigeración de motores y renovación del aire interior)
- Resistencias aerodinámicas (clave en Alta Velocidad)

- En curva

- Rozamiento de las pestañas sobre el carril y otras fuerzas debido a la curva

- En rampa

- ✓ En arranque

- ✓ En aceleración



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**

Esfuerzos de resistencia al avance por unidad de peso (1 daN para mover 1 t de masa de tren a velocidades bajas en horizontal)

- **Tipos**

- ✓ A velocidad constante – **Resistencia al avance total**

- En recta y horizontal

- Resistencia a la rodadura (rueda – carril)
- Rozamientos internos de las partes móviles y giratorias del tren

} Resistencia mecánica

- Resistencia debida a la entrada de aire (refrigeración de motores y renovación del aire interior)
- Resistencias aerodinámicas (clave en Alta Velocidad)
- **Choques y deformaciones en juntas***
- **Flexión del carril***

Aparecen en vías con juntas ($r=1,5$ daN/t)

- En curva

- Rozamiento de las pestañas sobre el carril y otras fuerzas debido a la curva



5.2. Resistencia al avance

• Concepto de resistencia específica (r en daN/t)

• Tipos

✓ A velocidad constante

• En recta y horizontal

Davis, 1926

Modelo de la realidad – modelos ajustados de fenómenos muy complejos – no es una solución exacta

MATERIAL MOTOR

$$r = a + b v + c v^2 \text{ [daN / t]} \quad (V \text{ en km/h})$$

Fórmulas experimentales, 2004

TREN	Masa t	a	b	c
Locomotora BB	80	1,25	0,01	3,75 10 ⁻⁴
Locomotora CC	120	1,2	0,01	2,50 10 ⁻⁴
2 locomotoras + 6 coches	400	1,15	0,00975	2,87 10 ⁻⁴
Clásico viajeros	variable	1,5-2	0	2,22 10 ⁻⁴
Mercancías de bogies	variable	1,5-2	0	2,50 10 ⁻⁴
Clásico mercancías	variable	1,5-2	0	6,25 10 ⁻⁴
Alaris (Valencia)	177	1,5-2	0	6,25 10 ⁻⁴
TGV SudEst	418	0,562	0,00739	1,28 10 ⁻⁴
TGV Duplex	424	0,637	0,00755	1,26 10 ⁻⁴
ICE 3 Regional	231	0,735	0,00654	1,47 10 ⁻⁴
AVE Sevilla	416	0,702	0,00923	1,19 10 ⁻⁴

*a: resistencias a la rodadura [daN/t]
 bv: resistencias al rozamiento de las pestañas, oscilaciones, choques [(daN/t)/(km/h)]
 cv²: resistencia aerodinámica [(daN/t)/(km/h)²]*

VEHÍCULOS REMOLCADOS

$$r = \alpha + \beta V^2$$

Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.

****Válidas para velocidades superiores a 7-10 km/h**



5.2. Resistencia al avance

- Concepto de resistencia específica (r en daN/t)

Davis, 1926

Modelo de la realidad – modelos ajustados de fenómenos muy complejos – no es una solución exacta

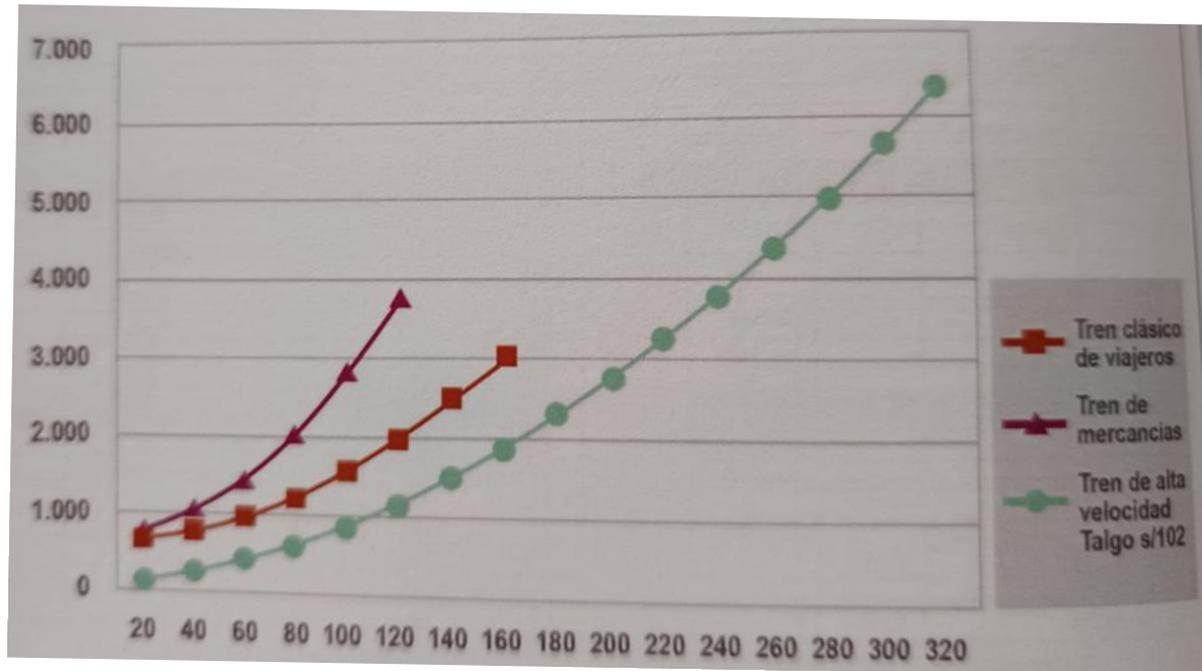
- Tipos

✓ A velocidad constante

- En recta y horizontal

MATERIAL MOTOR

$$r = a + b v + c v^2 \text{ [daN / t]} \quad (V \text{ en km/h})$$





5.2. Resistencia al avance

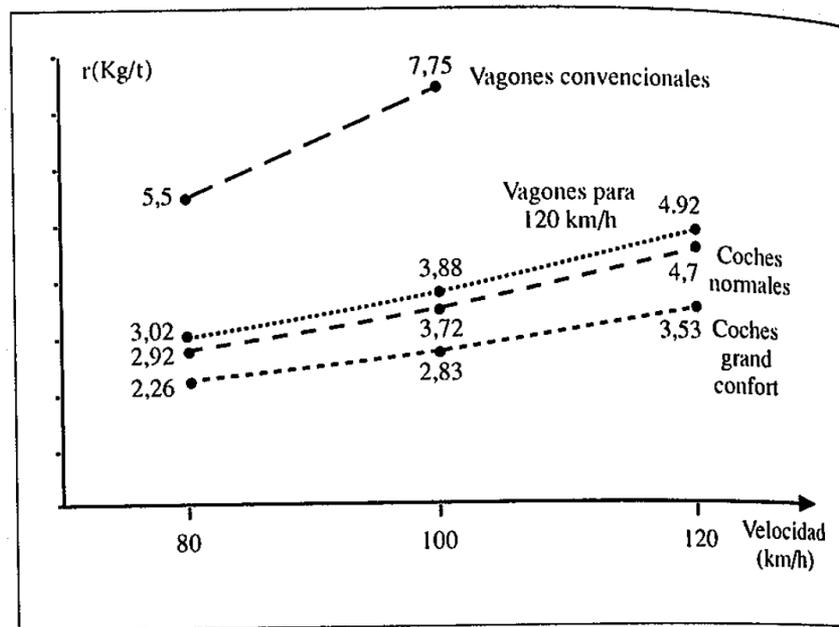
- Concepto de resistencia específica (r en daN/t)

- Tipos

- ✓ A velocidad constante
 - En recta y horizontal

VEHÍCULOS REMOLCADOS

$$r = \alpha + \beta V^2$$



Variación de la resistencia con la velocidad coches de viajeros y vagones de mercancías. Fuente: Explotación de líneas de ferrocarril, Andrés López Pita



5.2. Resistencia al avance

- Concepto de resistencia específica (r en daN/t)

- Tipos

- ✓ A velocidad constante

- En recta y horizontal

- Resistencia a la rodadura

$$r_{fc} = 0.5 - 0.9 \text{ daN/t}$$

($r_{carretera} = 12-15 \text{ daN/t}$)

- Resistencia de los rozamientos internos (cojinetes y manguetas en las cajas de grasa)

$$r = 1.3 - 1.4 \text{ daN/t}$$

Resistencia mecánica total:

Locomotoras y trenes clásicos $r = 1.2$ a 2 daN/t

Trenes de alta velocidad $r = 0,6$ a $0,8 \text{ daN/t}$

Sobre el valor total de la resistencia al avance en recta el peso relativo de la resistencia mecánica total es muy reducido (5%) → ¿Cuál es el factor clave en trenes de AV?



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**

Esfuerzos de resistencia al avance por unidad de peso

- **Tipos**

- ✓ A velocidad constante

- En recta y horizontal (**resistencia general al avance**)

- Resistencia debida a la entrada de aire ($r = b \cdot V$)

Entrada de aire necesaria para la refrigeración de los motores y renovación del aire de los coches de viajeros

Por ejemplo: Tren AV con 320 plazas necesita 77,3 m³/s

ICE 3 con 400 plazas necesita 150 m³/s

**Se estima entre 10 y 20 m³/plaza·hora según la temperatura exterior*

Puede representar entre un 10-15% del consumo de energía en un tren de alta velocidad

$r \sim 0,034 \cdot Q \cdot V$ (siendo Q el flujo de aire que entra en el tren –m³/s)



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**

Esfuerzos de resistencia al avance por unidad de peso

- **Tipos**

- ✓ A velocidad constante

- En recta y horizontal (**resistencia general al avance**)

- **Resistencias aerodinámicas**

Fuerza longitudinal que se opone al movimiento del tren como consecuencia de la interacción entre el tren y el aire circundante con el que choca y lo envuelve. Resistencia de presión + resistencia de fricción.

$$r = C \cdot V^2$$

C : coeficiente de resistencia aerodinámica (adimensional) propio de cada vehículo. En trenes es relevante la sección frontal y la superficie lateral. Se calcula de forma empírica.



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**

Esfuerzos de resistencia al avance por unidad de peso

- **Tipos**

- ✓ A velocidad constante

- En recta y horizontal (**resistencia general al avance**)

- **Resistencias aerodinámicas**

Fuerza longitudinal que se opone al movimiento del tren como consecuencia de la interacción entre el tren y el aire circundante con el que choca y lo envuelve. Resistencia de presión + resistencia de fricción.

$$\text{Túnel: } r = A + B \cdot V + T_f \cdot C \cdot V^2$$

T_f : Factor túnel o coeficiente de obstrucción por el aumento de la resistencia aerodinámica debido a la mayor fricción del aire contra la pared exterior del tren. Depende de la relación entre las áreas de las secciones transversales del tren y del túnel. Para velocidades de 100 km/h puede variar entre 1,2-1,6 y para 300 km/h entre 1,3 – 2.



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**

- **Tipos**

- ✓ A velocidad constante
 - En recta y horizontal
 - En curva

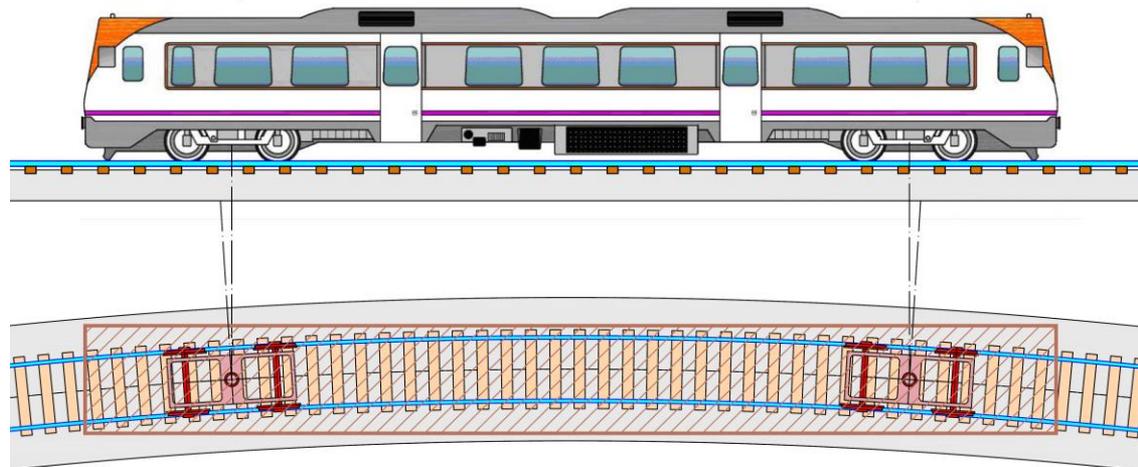
Renfe: $r=800/R$

UIC: $r=600/R$

Resistencia en curva debida a:

- Ejes rígidos (solidaridad ruedas y ejes)
- Ejes paralelos
- Fuerza centrífuga

**Esta resistencia no es relevante a velocidad altas o curvas de $R > 5000$ m*





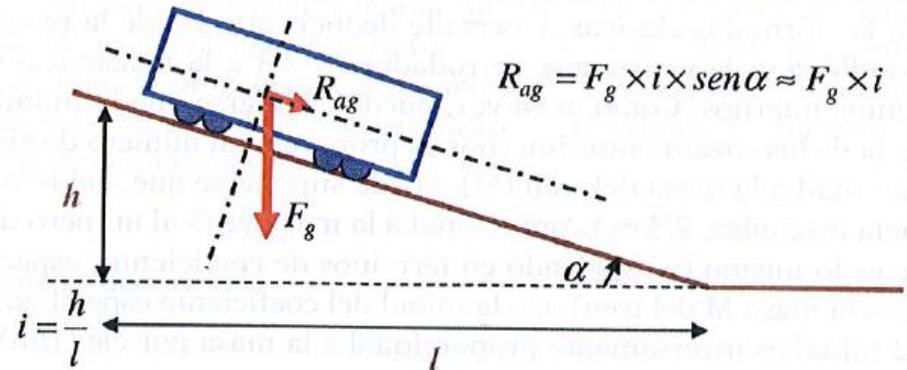
5.2. Resistencia al avance

- Concepto de resistencia específica (r en daN/t)

- Tipos

- ✓ A velocidad constante

- En recta y horizontal
 - En curva
 - **En rampa ($r=i$)**



Fuente: Ingeniería ferroviaria. Fco Javier González Fernández, Julio Fuentes Losa. UNED, 2010.

Resistencia en rampa:

A la resistencia en recta y en curva se le suma **1 daN/t** por cada milésima de inclinación de la rampa y tonelada de masa del tren.

$$R_{ag} \text{ (daN)} = M \text{ (ton)} \cdot i \text{ (mm/m)}$$

$$r = i \text{ (daN / t)}$$

Valor **positivo** o **negativo** según sea subida (**rampa**) o bajada (**pendiente**)



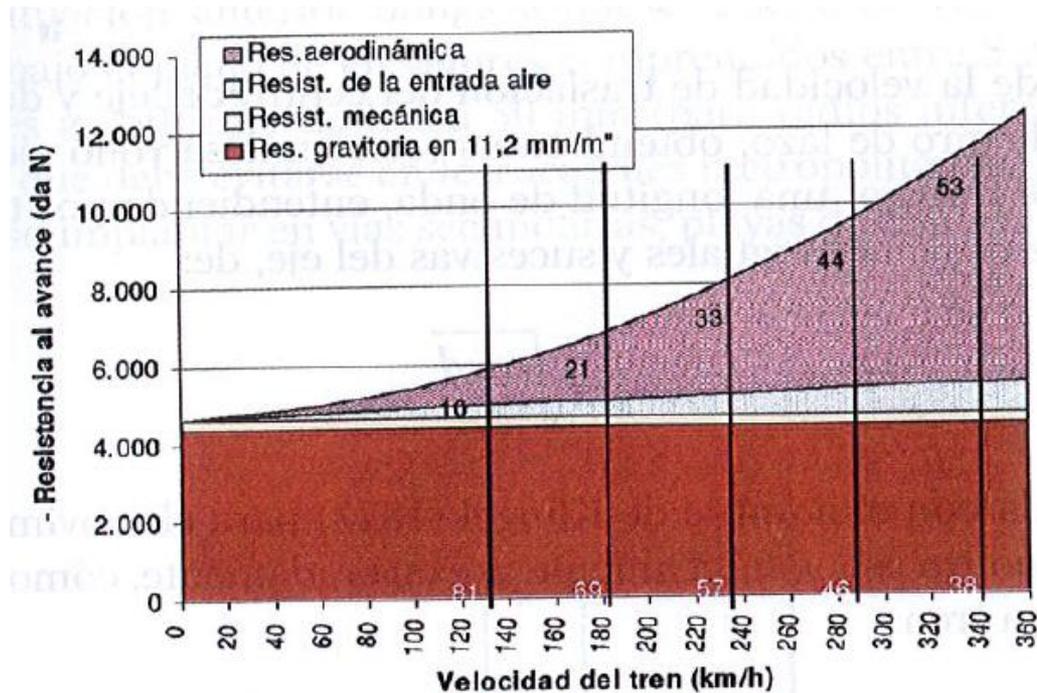
5.2. Resistencia al avance

- **Resistencia total al avance**

Factores claves: **velocidad** y **pendiente**

- **Ejemplo:**

Talgo 102 a velocidad hasta 350 km/h en una rampa de 11,2 mm/m (media de las zonas con rampas de la línea AV M-BCN)





5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**
- **Tipos**
 - ✓ A **velocidad constante**
 - En recta y horizontal
 - Resistencia a la rodadura
 - Rozamiento en cajas de grasa
 - Resistencia debida a la entrada de aire
 - Resistencias aerodinámicas
 - En curva
 - En rampa
 - ✓ **Resistencias debidas a la inercia**
 - ✓ En arranque
 - ✓ En aceleración (cambios de velocidad durante la marcha)



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**
- **Tipos**
 - ✓ A **velocidad constante**
 - En recta y horizontal
 - En curva
 - En rampa
 - ✓ Resistencias debidas a la inercia:
 - ✓ En **arranque**

Resistencia específica al arranque	
daN/t	rampa (milésimas)
7	<15
8	15-20
9	21-25
10	26-29

daN/t	rampa (milésimas)
7	<15
8	15-20
9	21-25
10	26-29



5.2. Resistencia al avance

- **Concepto de resistencia específica (r en daN/t)**
- **Tipos**
 - ✓ A velocidad constante
 - En recta y horizontal
 - En curva
 - En rampa
 - ✓ Resistencias debidas a la inercia:
 - ✓ En arranque
 - ✓ En aceleración (**r = aceleración cm/s²**)

Esfuerzo resultante = masa x aceleración

$$E_T - R = M(1 + \lambda)a$$

E_T : Esfuerzo de tracción

R: Resistencia total (en arranque)

M: Masa total

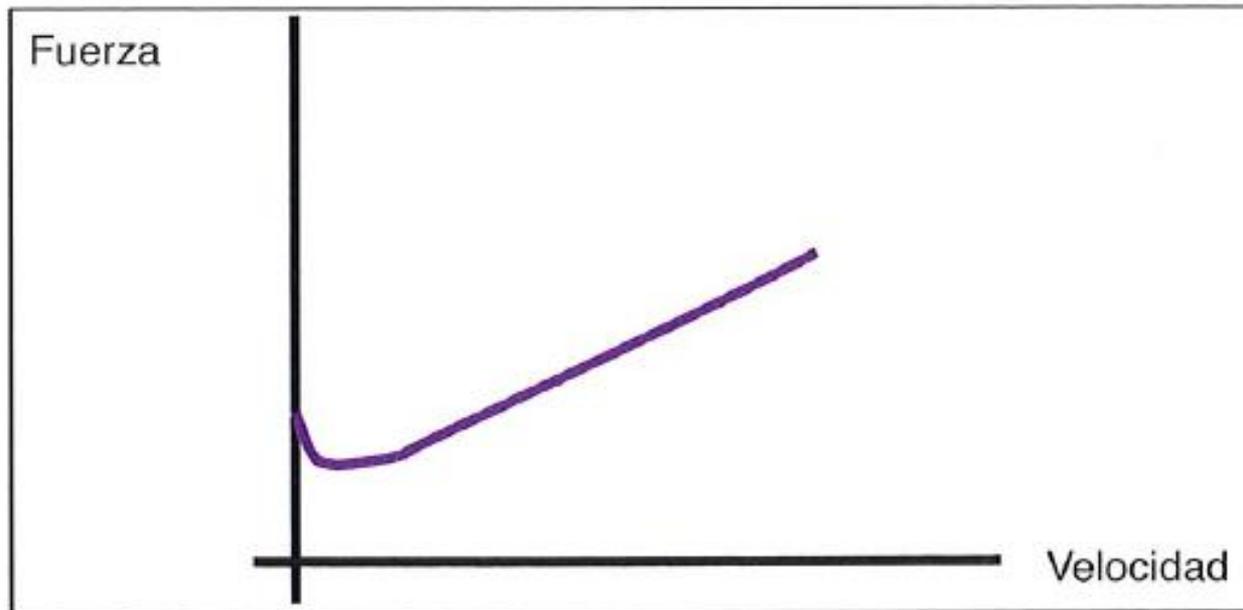
λ : Coeficiente de inercia (debido al giro de las masas rotativas)

a: aceleración



5.2. Resistencia al avance

Curva de resistencia global al movimiento del tren



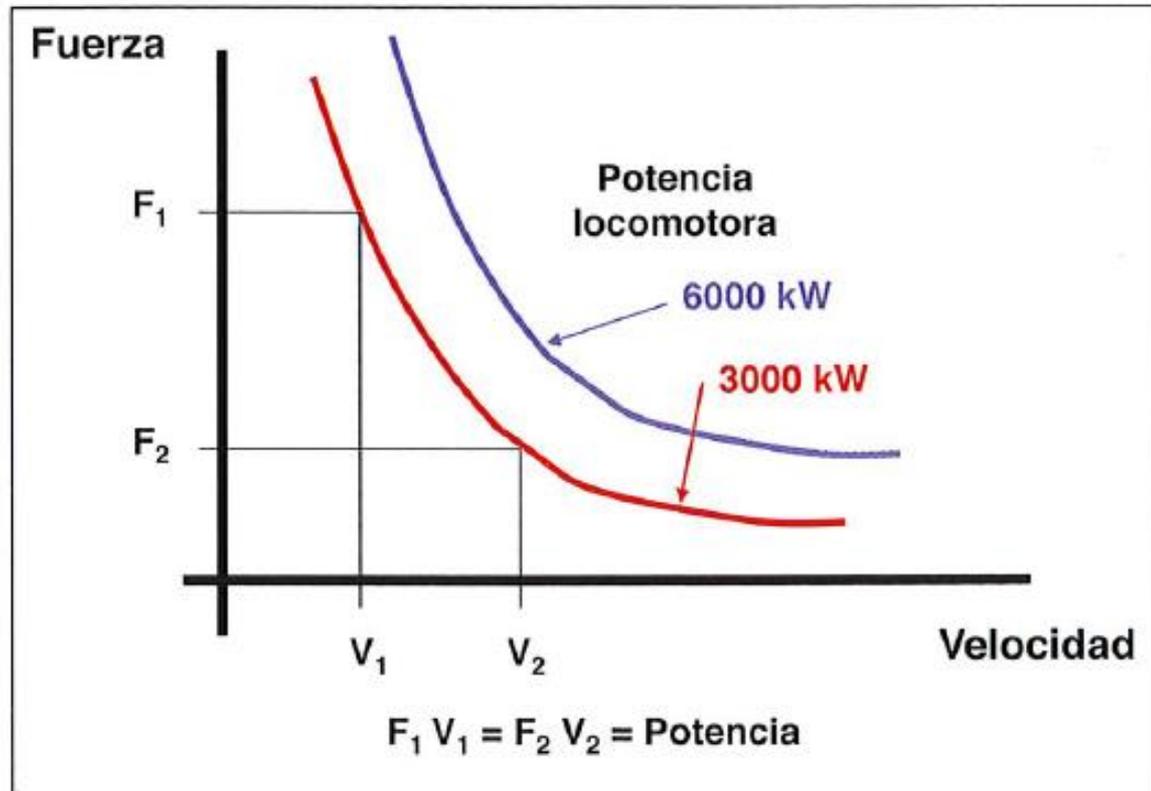
Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.

Resistencia avance = $a + b V + c V^2 + i + 800/ R$ (ancho RENFE)

Resistencia avance = $a + b V + c V^2 + i + 600/ R$ (ancho UIC)



5.3. Potencia de la locomotora o bogies motores



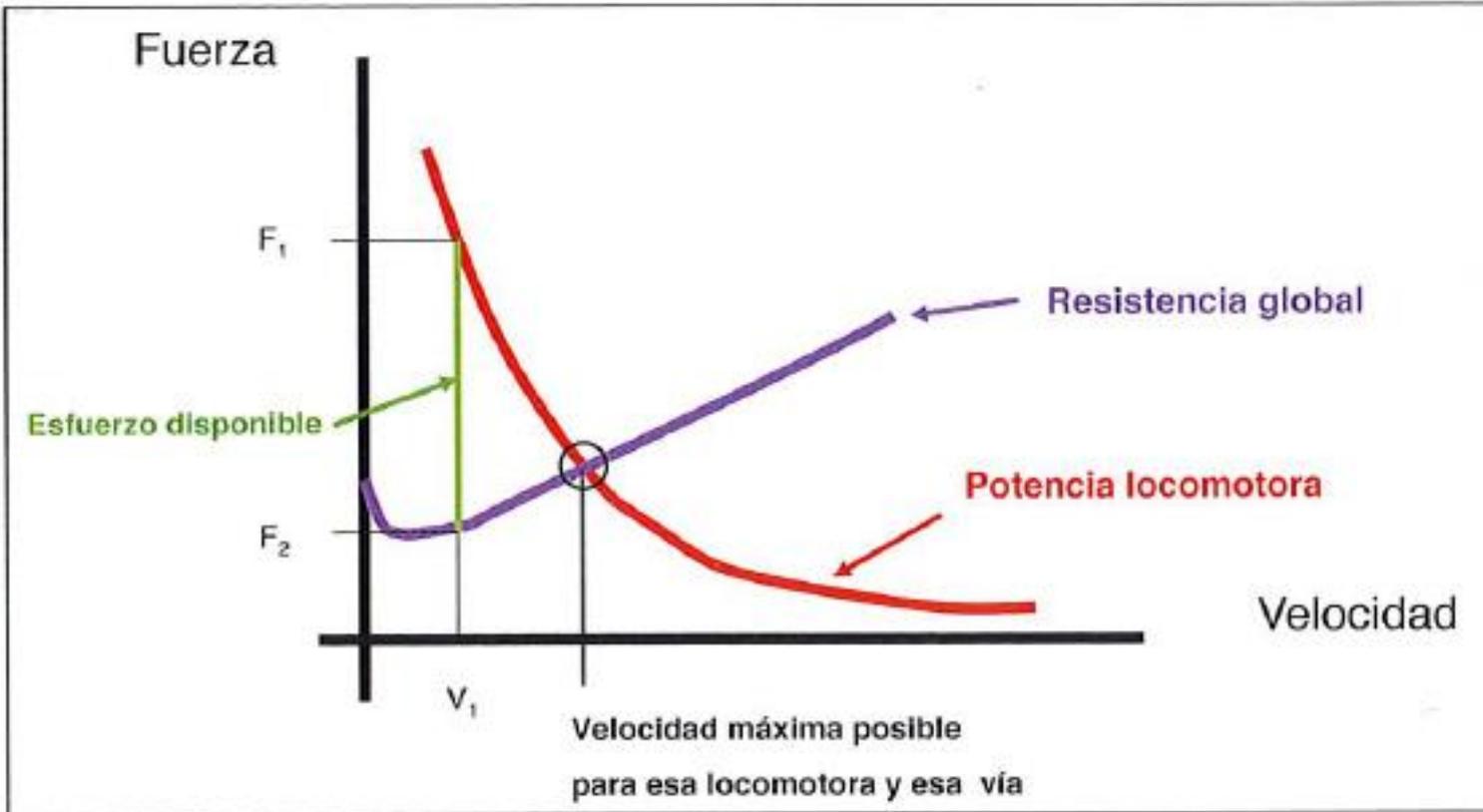
Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.

Tracción concentrada: las locomotoras tiran/traccionan del tren (vehículos motores o tractores).

Tracción distribuida en trenes autopropulsados: coches motores (uno o varios en la composición) con bogies motores que producen la fuerza para mover el tren.



5.3. Potencia de la locomotora o bogies motores

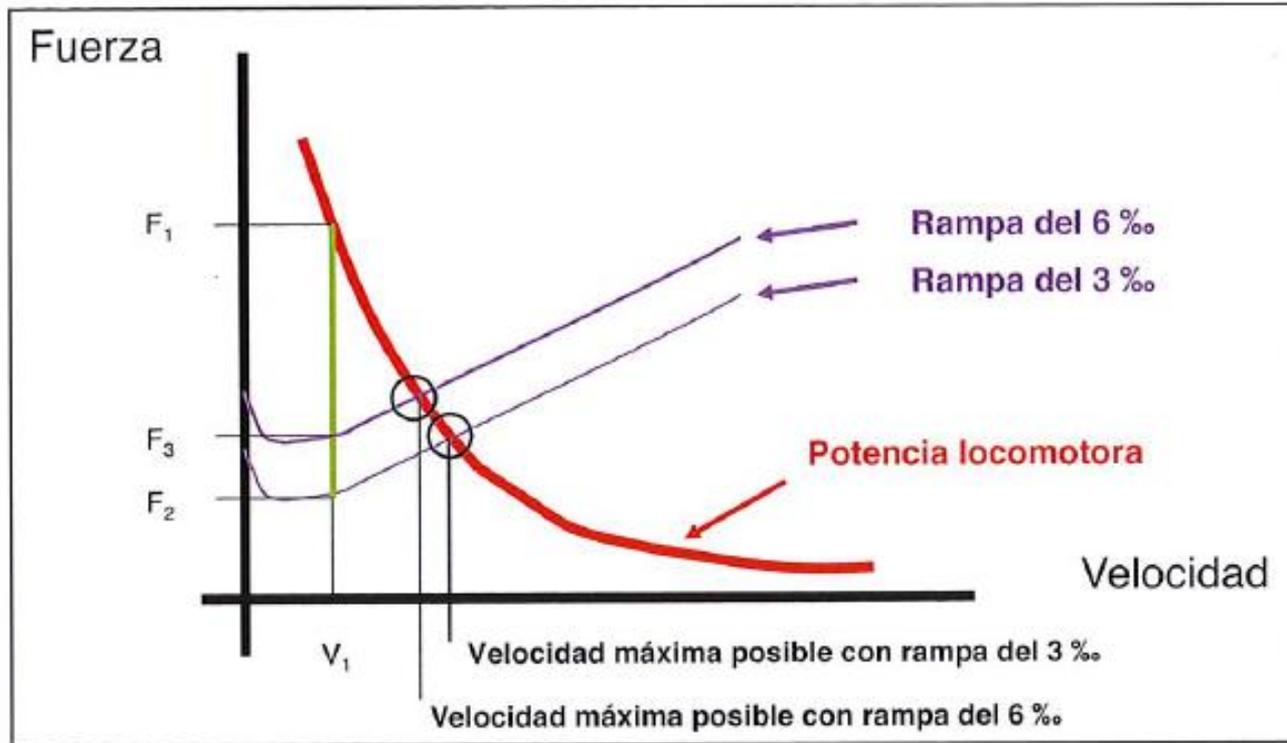


Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.



5.3. Potencia de la locomotora o bogies motores

Aumento de la resistencia de un tren

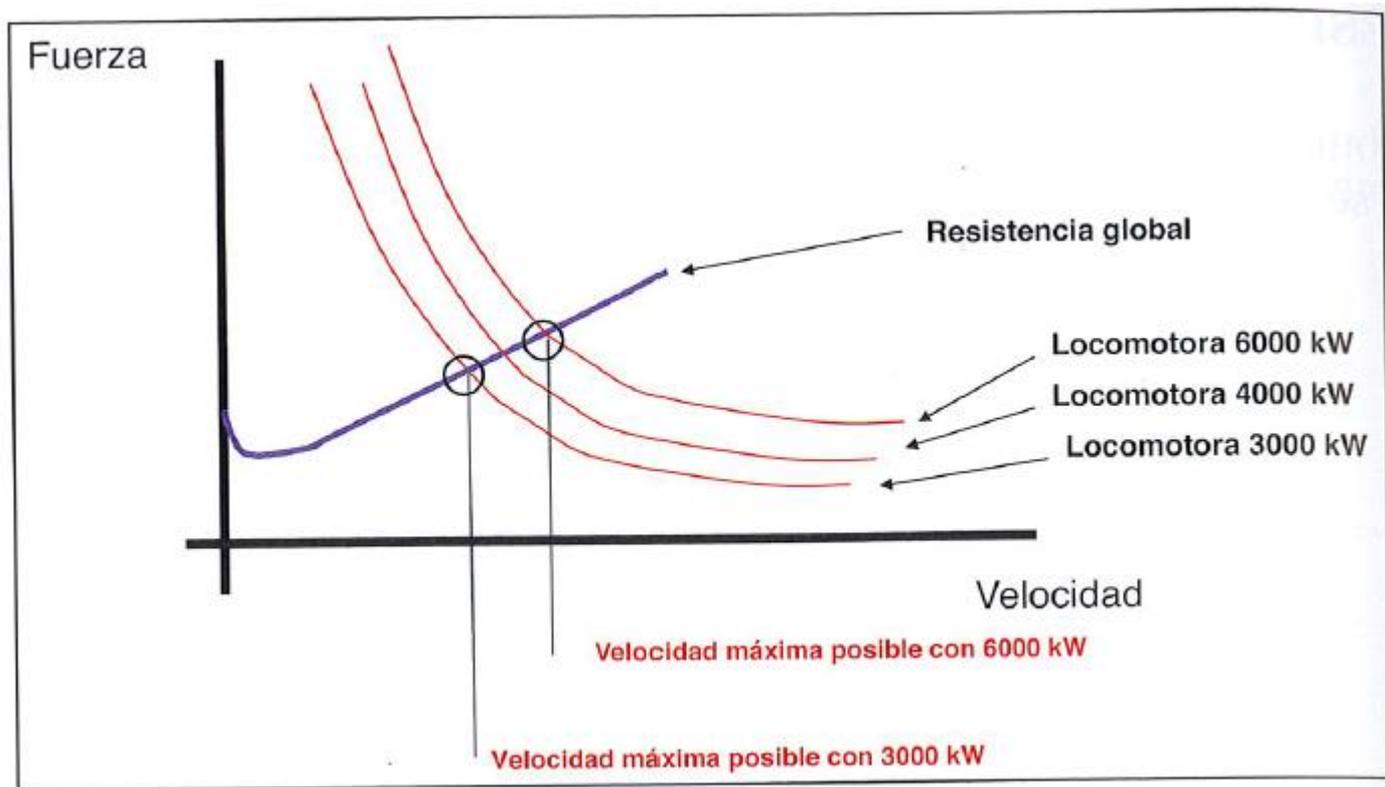


Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.



5.3. Potencia de la locomotora o bogies motores

Aumento de la potencia de un tren



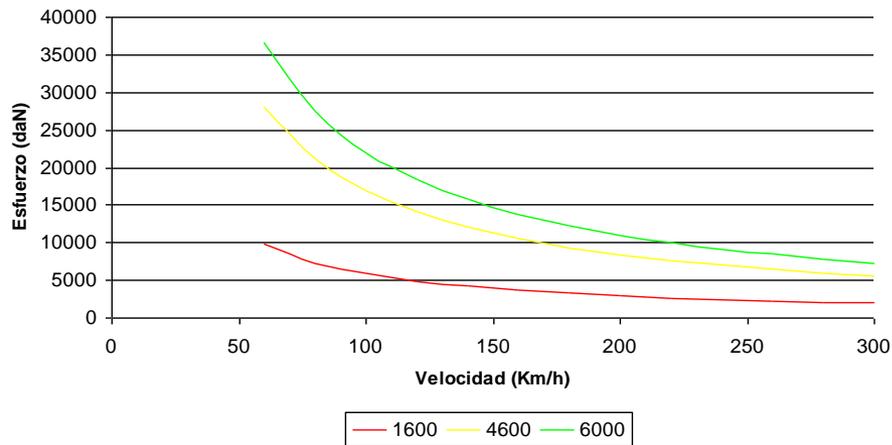
Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.



5.3. Potencia de la locomotora o bogies motores

$$E_T \cdot V = cte = W$$

Hipérbolas de tracción



333 2 BOGIES 3 EJES - 120 t - 1.900 kW - 2.600 CV (93)



251 3 BOGIES 2 EJES - 120 t - 4.650 kW - 6.330 CV (29)



252 2 BOGIES 2 EJES - 90 t - 5600 kW - 7.620 CV (75)

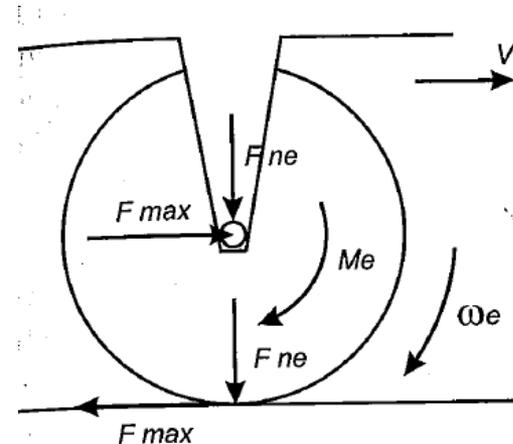


5.4. La adherencia

- **Concepto:** Cuando el par motor es superior al par resistente, la rueda desliza o patina sobre el carril.

La adherencia de la rueda sobre el carril es más grande cuanto mayor sea la masa que apoya sobre la rueda motriz, que se denomina **masa adherente**.

$$F_{\max} = \varphi \cdot F_{ne}$$



Coeficiente de adherencia: cociente entre la fuerza horizontal máxima que puede transmitir el eje motriz sin que la rueda patine y la masa que soporta dicho eje.

medida de la efectividad con que un vehículo puede emplear su peso a la tracción o al freno, sin que las ruedas patinen.



5.4. La adherencia

- **Formulación**

- **Esfuerzo adherente**

$$E_{adh} \leq \varphi \cdot P_{adh}$$

- **Coeficiente de adherencia**

[V]= Km/h

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{1 + 0.03 \cdot V}$$

- **Ejemplos**

Tracción concentrada y tracción distribuida



5.4. La adherencia

Tracción concentrada y tracción distribuida

Características y requisitos para tracción concentrada y distribuida.

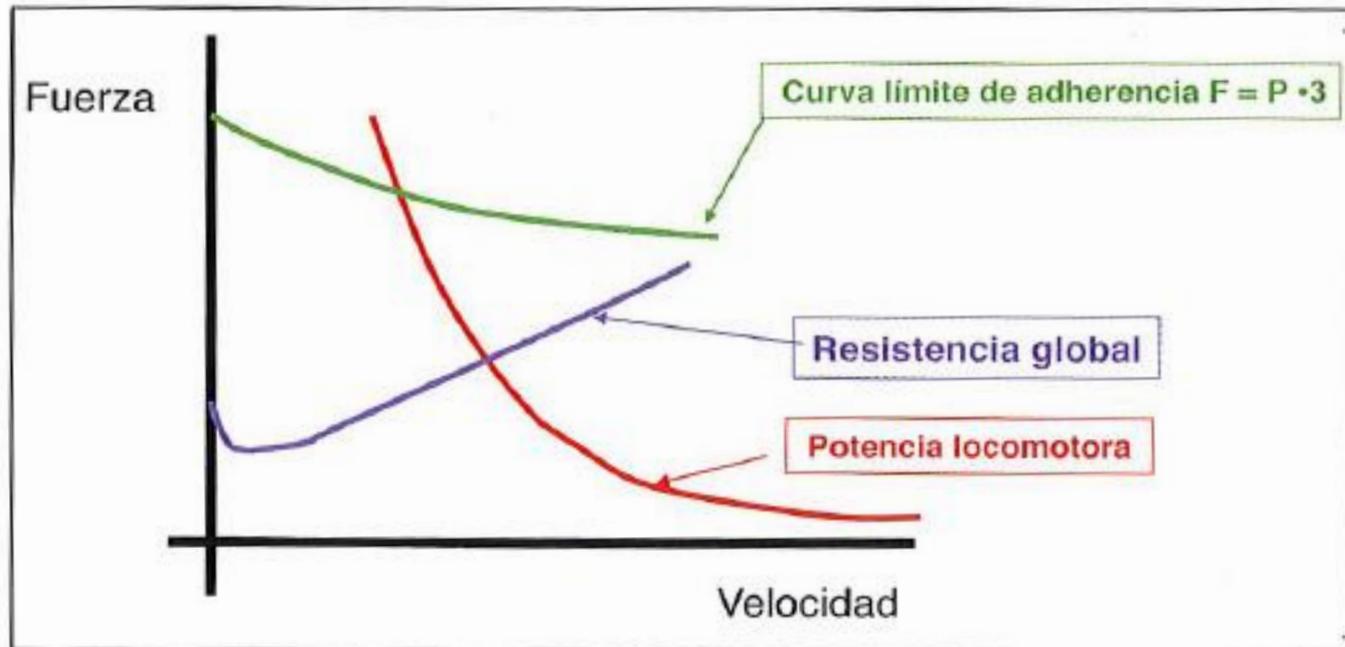
Fuente: Ruano Gómez, A. Las líneas de Alta Velocidad frente a las convencionales.

Adaptación de las líneas convencionales a Velocidad Alta. UPC, 2007.

	Tracción concentrada	Tracción distribuida
Motor	En cabeza	Distribuidos a lo largo del tren
Potencia de tracción	Elevada	Menor
Cargas por eje	17 t/eje	15-12 t/eje
Velocidad admisible	$v < 300$ km/h	$v > 300$ km/h
Estabilidad frente al vuelco	Buena	Regular
Adherencia	Buena	Muy buena



5.5. Curvas del movimiento del tren



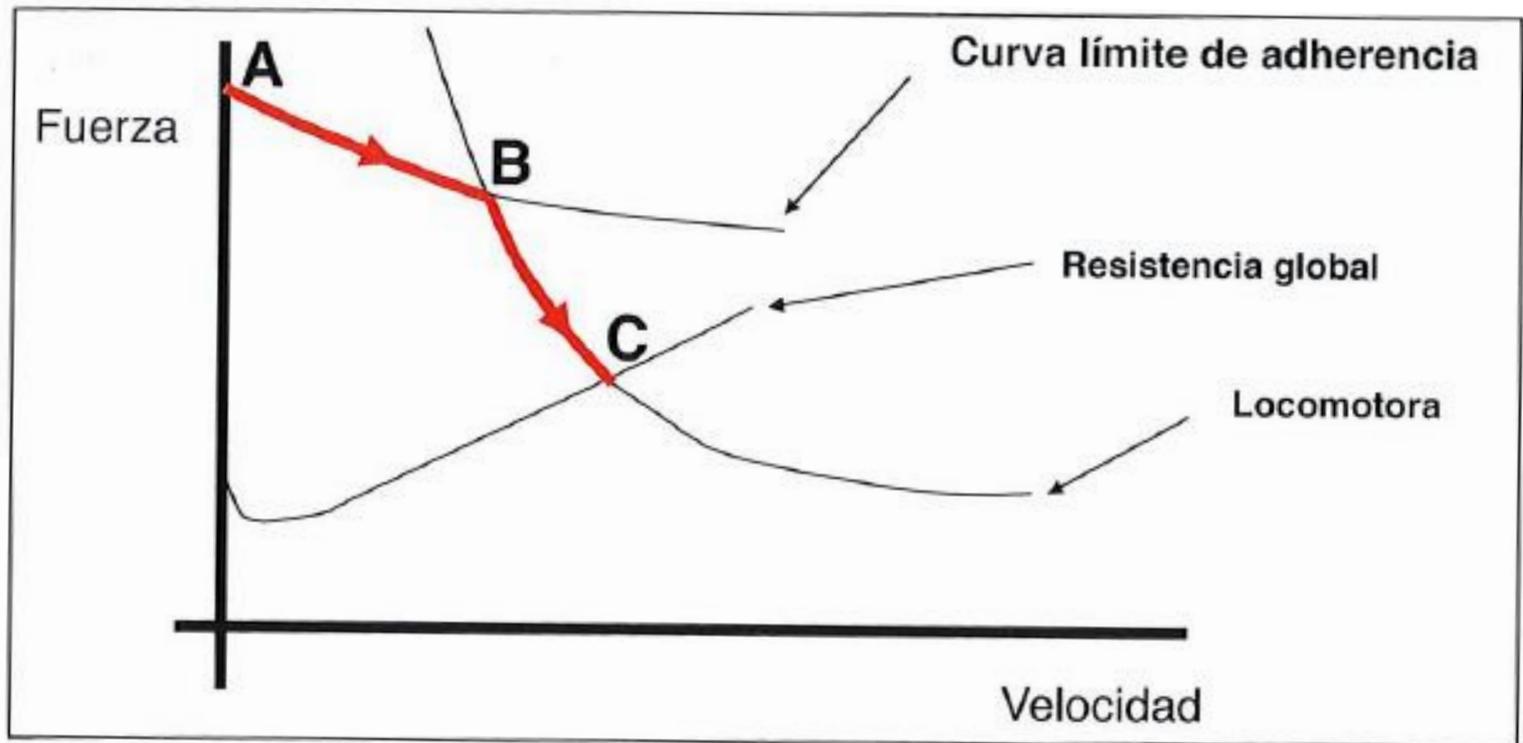
Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.

$$E_T \geq R$$

$$E_T \leq E_{adh}$$



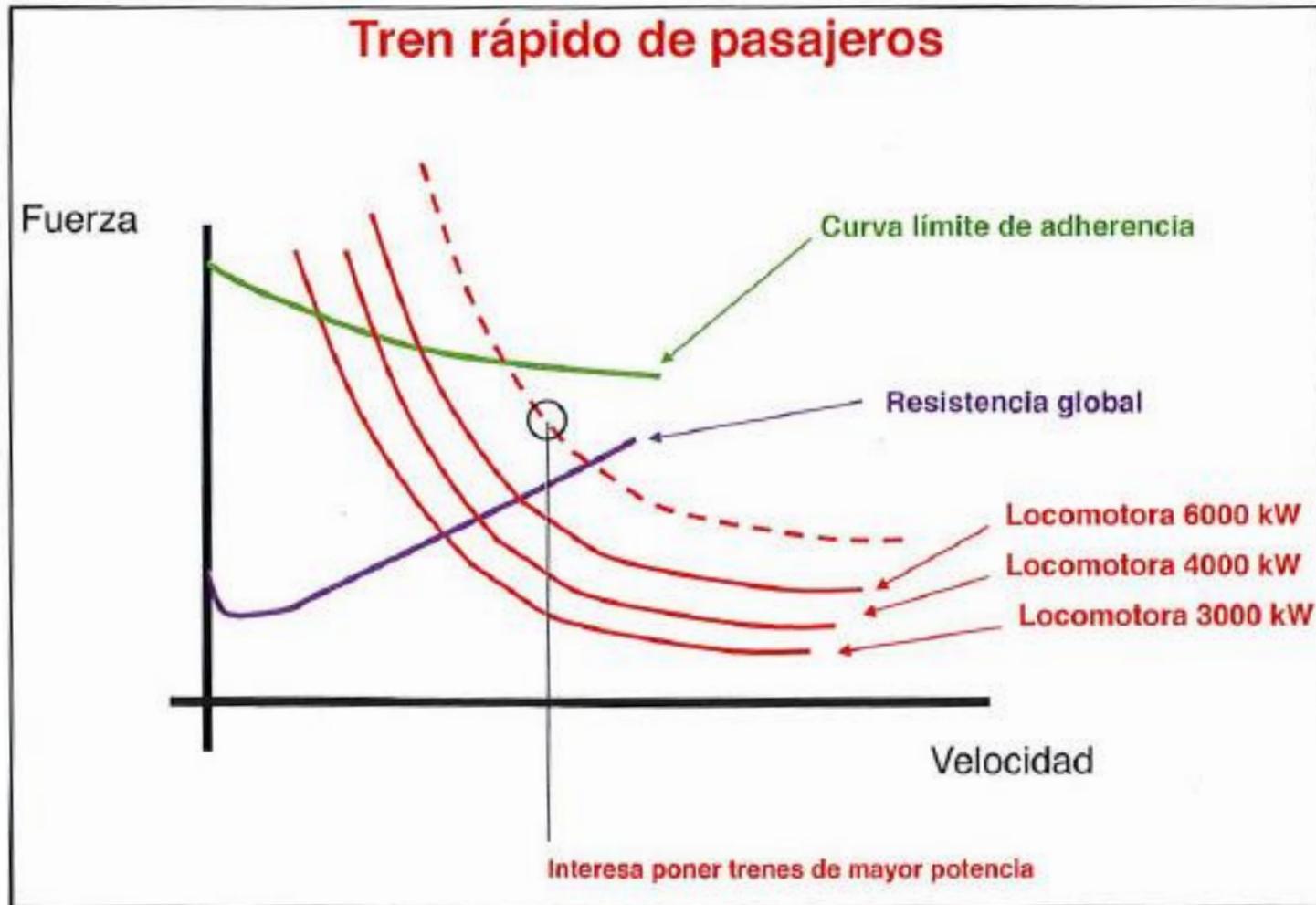
5.5. Curvas del movimiento del tren



Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.



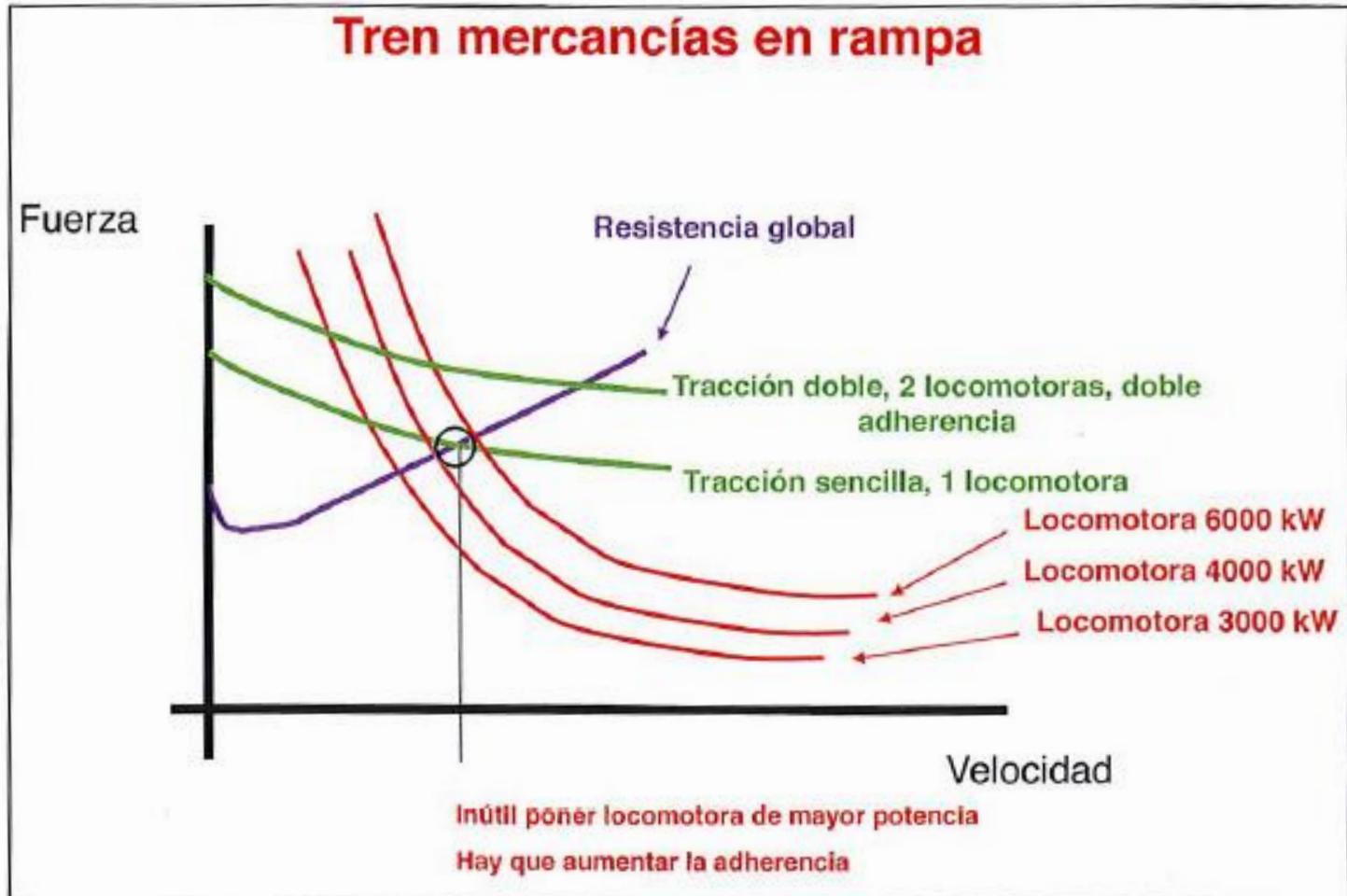
5.5. Curvas del movimiento del tren



Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.



5.5. Curvas del movimiento del tren



Fuente: Melis Maynar, M. y González Fernández, F.J., 2008. Ferrocarriles Metropolitanos.



5.5. Curvas del movimiento del tren

Limitaciones complementarias para establecer la **carga práctica remolcable**:

- Limitaciones del gancho de tracción

- Máximo número de ejes que puede llevar una composición ferroviaria por imperativos de frenado

- Longitud máxima existente en los andenes de las estaciones.
Se puede establecer como límite superior los 600 metros.



5.6. Frenado

Funciones:

- ✓ Parada del tren en estaciones, señales o incidencias
- ✓ Moderación de la velocidad del tren en pendientes o cuando lo indiquen las señales
- ✓ Impedir que, en caso de rotura del enganche entre vehículos, la parte fraccionada del tren pueda continuar en movimiento sin control

Características:

- ✓ Diferentes sistemas de freno en función de las velocidades máximas de circulación en cada momento
- ✓ Esfuerzos de frenado repartidos por todos los vehículos del tren
- ✓ Distancia de frenado condicionante de la seguridad



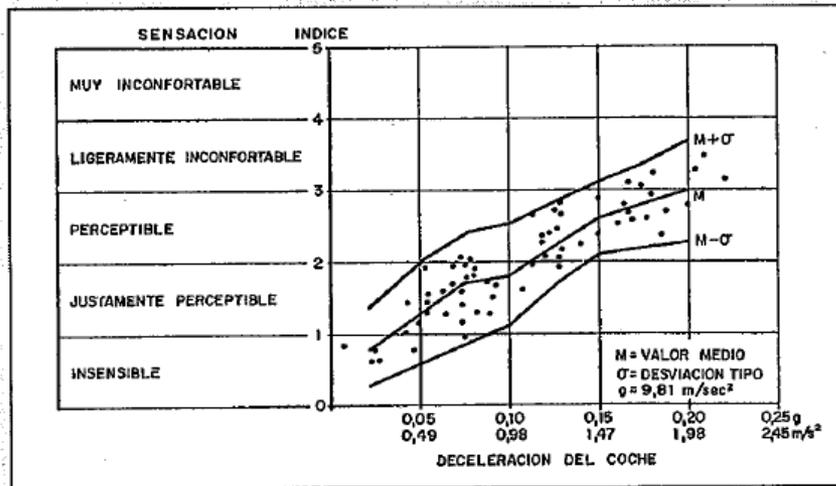
5.6. Frenado

Condicionantes principales. El freno con zapatas

1. Confort del viajero

Magnitud máxima de la deceleración a efectos de diseño: **1 m/seg²**

RELACIÓN ENTRE LA DECELERACIÓN DEL TREN Y EL CONFORT DE LOS VIAJEROS



Fuente: ORE/UIC

Fig. 11.2

Valores adoptados internacionalmente:

Trenes convencionales de mercancías: 0,1 m/seg²

Trenes rápidos de mercancías: 0,25 m/seg²

Trenes interurbanos de viajeros: 0,4 – 0,5 m/seg²

Trenes de cercanías: 0,6 m/seg²

Valores adoptados por RENFE para trenes convencionales:

V_{max} = 100 km/h 0,47 m/seg²

V_{max} = 120 km/h 0,61 m/seg²

V_{max} = 140 km/h 0,74 m/seg²

V_{max} = 160 km/h 0,77 m/seg²



5.6. Frenado

Condiciones principales. El freno con zapatas

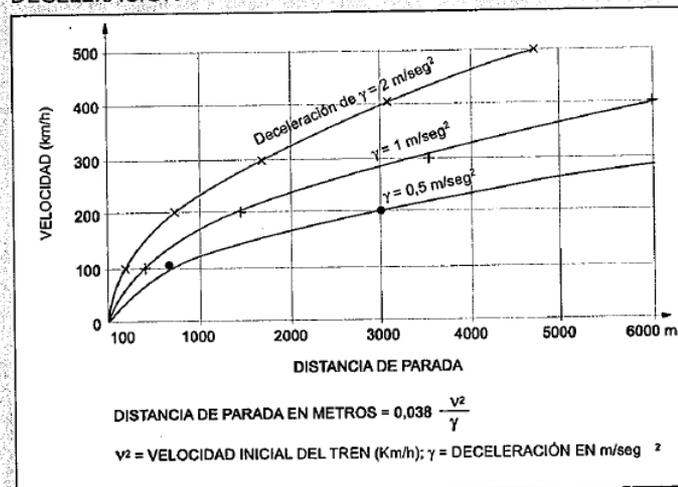
1. Confort del viajero
2. Distancia en que debe detenerse

$$D = 0,038 \frac{V^2}{\gamma}$$

$D(\text{m})$; $V(\text{km/h})$ y $\gamma(\text{m/seg}^2)$

Considerando movimiento uniformemente desacelerado

DISTANCIA DE PARADA PARA DIFERENTES VALORES DE LA DECELERACIÓN



Fuente: SNCF

Fig. 11.4



5.6. Frenado

Condiciones principales. El freno con zapatas

1. Confort del viajero
2. Distancia en que debe detenerse
3. Adherencia rueda-carril

Inecuación fundamental del frenado:

$$N \cdot f < \varphi \cdot P$$

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{1 + 0.01V}$$

$$f = \frac{f_0}{1 + 0.02V}$$

$$\varphi_0 \approx 0,25 \text{ _ para } V = 0$$

$$f_0 \approx 0,33 \text{ _ para } V = 0$$

Deceleración máxima admisible:

$$\gamma_{\max} \leq \varphi \cdot g$$

Ferrocarril

$$\varphi=0,2 \rightarrow \gamma= 2 \text{ m/s}^2 \rightarrow 14 \text{ s} \rightarrow 100 \text{ km/h}$$

Carretera

$$\varphi=0,6 \rightarrow \gamma= 6 \text{ m/s}^2 \rightarrow 5 \text{ s} \rightarrow 100 \text{ km/h}$$



5.6. Frenado

Condicionantes principales. El freno con zapatas

1. Confort del viajero
2. Distancia en que debe detenerse
3. Adherencia rueda-carril
4. Disipación de energía → problemas térmicos
 - Desgaste rápido por incremento de la temperatura
 - Destrucción bajo la acción del calor (fusión de la misma)



5.6. Frenado: peso-freno y coeficiente de frenado

- Unos vehículos ferroviarios frenan más que otros → **análisis individual** de su capacidad de frenado.
- La capacidad de frenado se mide con un **valor proporcional al esfuerzo que las zapatas efectúan sobre las llantas de las ruedas.**

¿Por qué se mide con un valor proporcional y no el valor directo?

- Porque el esfuerzo de frenado no solo se ve afectado por el efecto directo de la zapata sino que entran en juego otras variables como la **presión** de la zapata, el **tiempo de aplicación** del freno y la **velocidad de circulación** a la que se aplica el freno.
- La UIC estableció una normativa común adoptando el indicador denominado **peso-freno** de un vehículo como referencia para expresar la eficacia de su equipo de freno

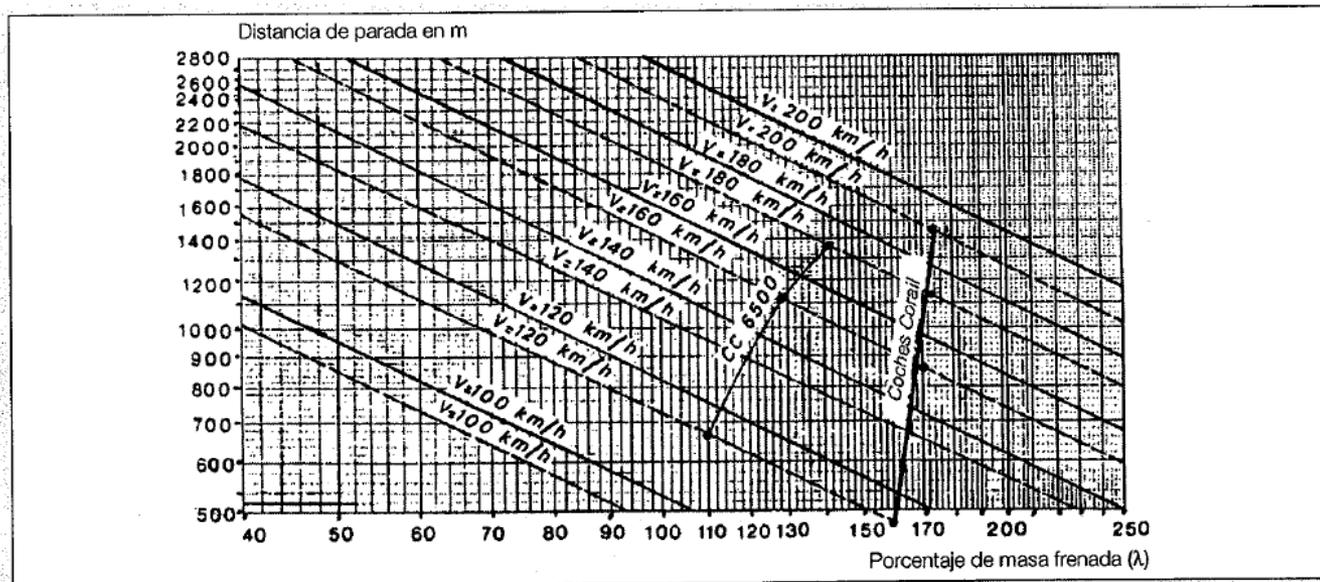


5.6. Frenado: peso-freno y coeficiente de frenado

Peso-freno de un vehículo: caracteriza la potencia de frenado de ese vehículo en un régimen de frenado determinado. Se expresa en **toneladas** y depende de la distancia de parada de dicho vehículo medida bajo determinadas condiciones. Se evalúa experimentalmente.

Coeficiente de frenado (λ): Relación existente entre el peso-freno (p) de los vehículos que componen un tren y el peso total del tren

$$\lambda = \frac{\sum p}{\sum P}$$



nte: M. Boiteux (1991)

Fuente: López Pita, A. 2008. *Explotación de líneas de ferrocarril*. Ediciones UPC.

Nota: Para cada velocidad hay dos rectas. La primera recta que encontramos desde el origen de coordenadas es para un vehículo considerado aisladamente. La segunda recta es para una composición de vehículos y locomotora (tren).



5.6. Frenado: sistemas de frenado

CUADRO 11.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FRENO UTILIZADOS EN EL FERROCARRIL

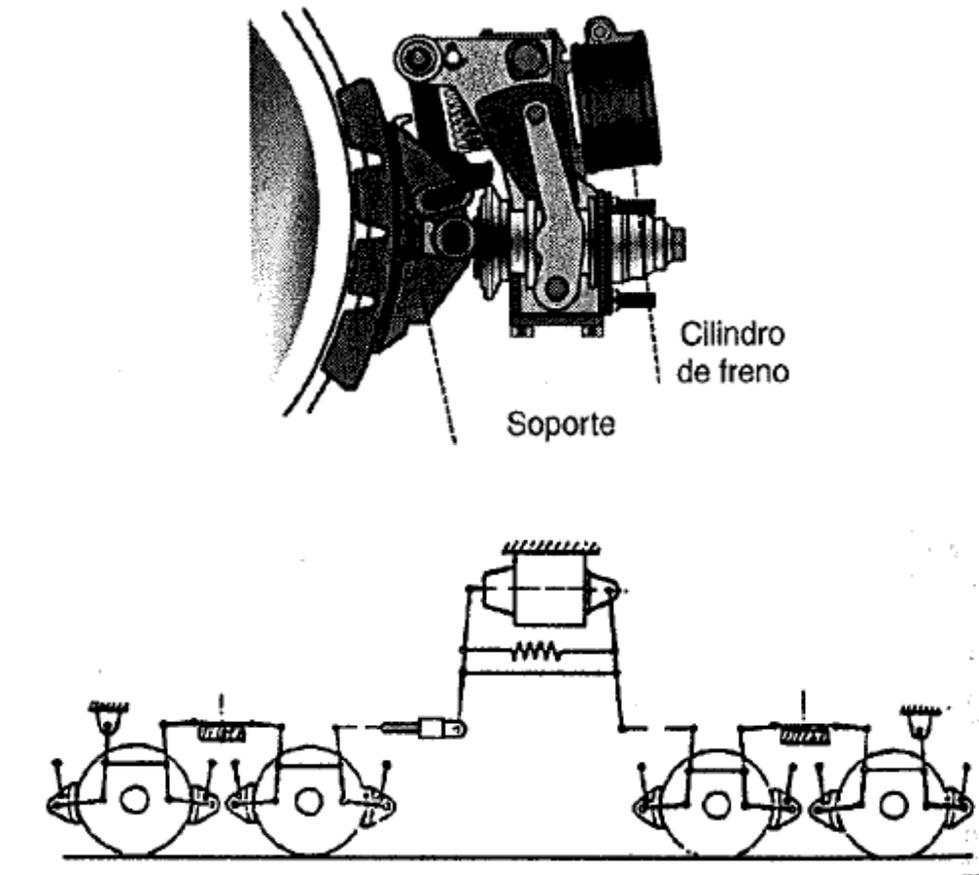
			<i>Ámbito de utilización principal</i>
Frenos que utilizan la fricción sólida	Recurriendo a la adherencia rueda-carril	Frenos de zapatas Frenos de discos	Normal $V \geq 160$ km/h
	Sin recurrir a la adherencia rueda-carril	Frenos electromagnéticos	Frenado de urgencia
Frenos Dinámicos	Recurriendo a la adherencia rueda-carril	Frenos reostáticos	–
		Frenos de recuperación	Ahorro de energía
		Frenos hidráulicos	–
		Frenos rotativos de corriente de Foucault	Alta velocidad
Sin recurrir a la adherencia rueda-carril	Freno lineal de corriente de Foucault	Alta velocidad	
	Freno aerodinámico	Alta velocidad	

Fuente: López Pita, A. 2008. *Explotación de líneas de ferrocarril*. Ediciones UPC.



5.6. Frenado: sistemas de frenado

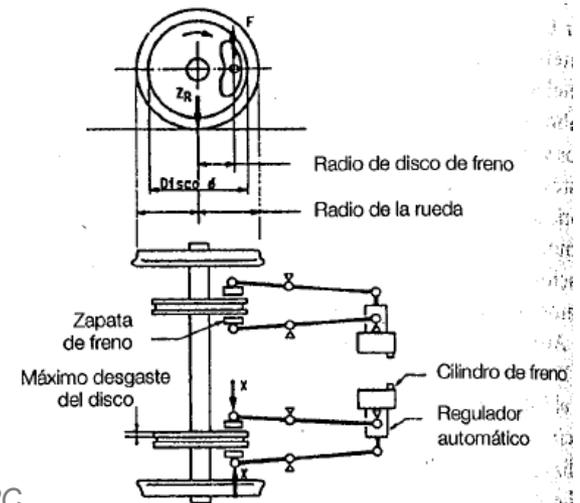
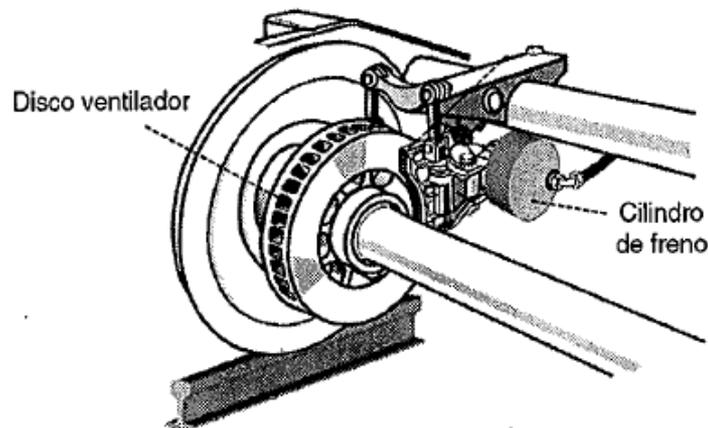
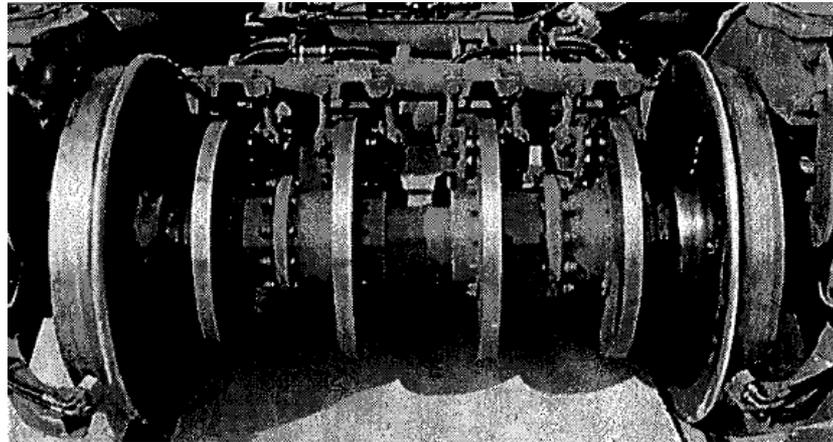
Freno de zapata: Actúa sobre la propia rueda. El sistema se compondrá de un cilindro que, bien neumáticamente o hidráulicamente, acciona un vástago que a su vez presiona la zapata sobre la rueda.





5.6. Frenado: sistemas de frenado

Freno de disco: Los discos calados sobre el propio eje, disponen de unas mordazas, portazapatas y pastillas de freno o zapatas, que presionan a los discos también por un cilindro neumático, hidráulico o con resorte interno de muelle.





5.6. Frenado: sistemas de frenado

CUADRO 11.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FRENO UTILIZADOS EN EL FERROCARRIL

			<i>Ámbito de utilización principal</i>
Frenos que utilizan la fricción sólida	Recurriendo a la adherencia rueda-carril	Frenos de zapatas Frenos de discos	Normal $V \geq 160$ km/h
	Sin recurrir a la adherencia rueda-carril	Frenos electromagnéticos	Frenado de urgencia
Frenos Dinámicos	Recurriendo a la adherencia rueda-carril	Frenos reostáticos	–
		Frenos de recuperación	Ahorro de energía
		Frenos hidráulicos	–
		Frenos rotativos de corriente de Foucault	Alta velocidad
Sin recurrir a la adherencia rueda-carril	Freno lineal de corriente de Foucault		Alta velocidad
	Freno aerodinámico		Alta velocidad

Fuente: López Pita, A. 2008. *Explotación de líneas de ferrocarril*. Ediciones UPC.



5.6. Frenado

Frenos dinámicos: cuando se utiliza a la inversa el equipo de tracción del vehículo (freno motor en los coches de carretera). Por la forma de disipar la energía pueden ser:

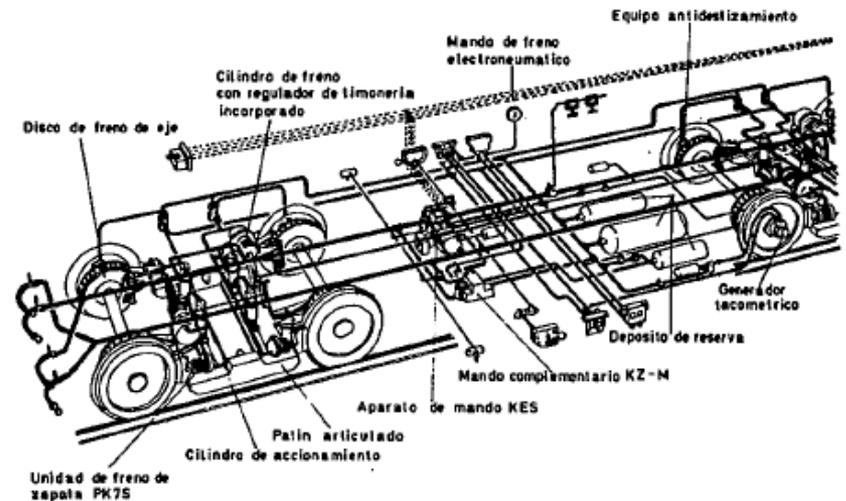
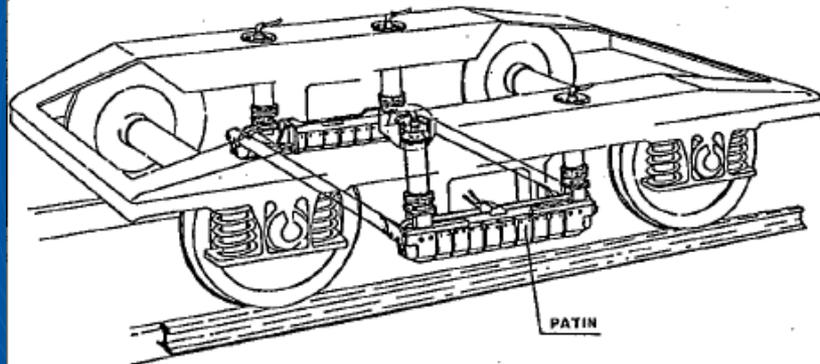
Freno reostático: Aparece con las locomotoras eléctricas. Sistema en el cuál la energía producida en el frenado se transformaba en calor a través de resistencias.

Freno de recuperación: Aparece con las locomotoras eléctricas. Sistema en el cuál la energía producida en el frenado se envía a la catenaria para ser utilizada por otros vehículos.



5.6. Frenado: sistemas de frenado

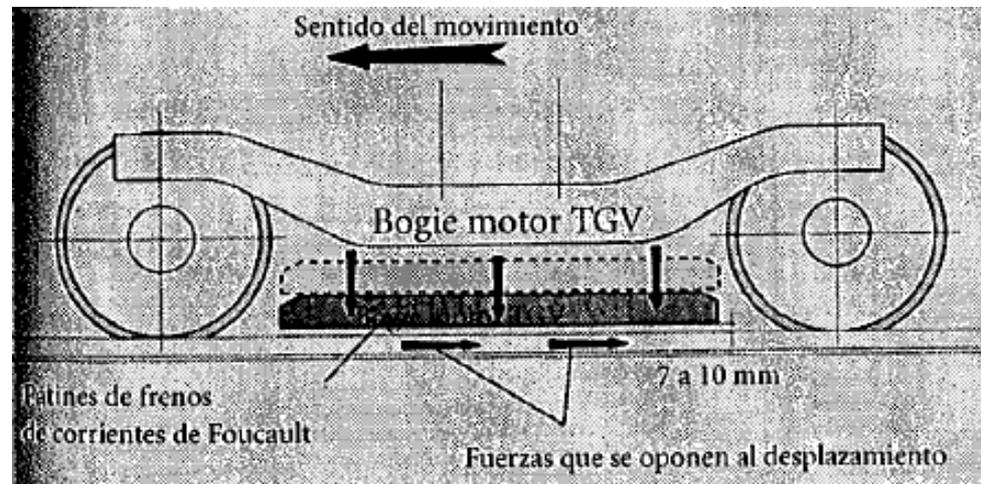
Freno electromagnético: Formado por dos patines electromagnéticos que se encuentran suspendidos del bastidor del bogie (a unos 55 mm del carril) y colocados entre las ruedas. En el momento del frenado se produce una fuerza de tracción entre el carril y los patines que, multiplicada por el coeficiente de rozamiento (carril-patín), proporciona el esfuerzo del frenado.





5.6. Frenado: sistemas de frenado

Freno de corrientes de Foucault: Frena del mismo modo que el freno electromagnético pero con mayor intensidad y no entra en contacto con el carril, permaneciendo suspendido unos 7 - 10 mm por encima del carril. La circulación de una corriente continua en el patín genera en el carril un campo magnético que se opone al movimiento del vehículo, produciéndose el frenado.



Fuente: López Pita, A. 2008. *Explotación de líneas de ferrocarril*. Ediciones UPC.

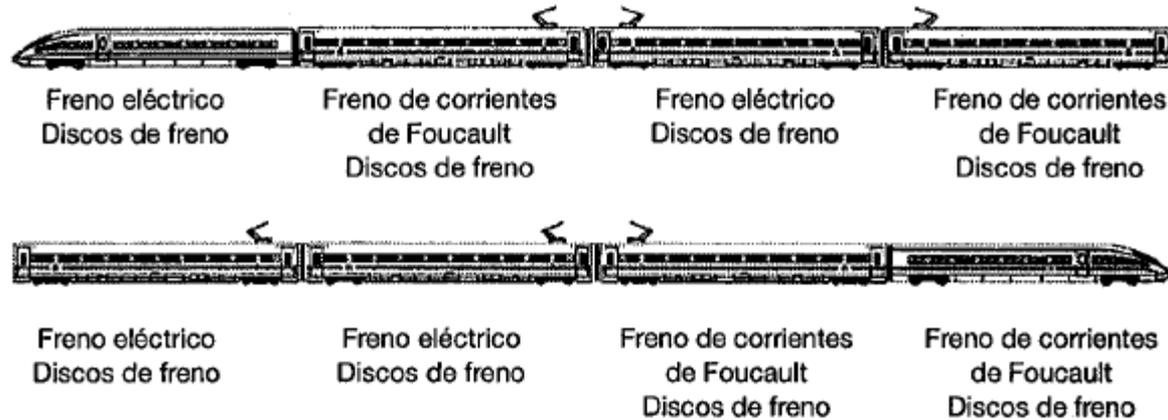
Ventaja: El freno se produce sin desgaste y sirve como freno de emergencia

Inconveniente: La elevación de la temperatura que provoca en el carril podría afectar a la estabilidad longitudinal de la vía



5.6. Frenado

Alta velocidad: los esfuerzos de frenado se obtienen mediante la combinación de los diversos tipos de freno.



Tren ICE

Fuente: López Pita, A. 2008. Explotación de líneas de ferrocarril. Ediciones UPC.

- ❑ **Frenado de servicio:** se emplea de forma regular en la marcha ordinaria del tren.
- ❑ **Frenado de emergencia:** se emplea el máximo esfuerzo de frenado y solo se utiliza en condiciones extraordinarias.



5.6. Frenado

CUADRO 11.7 PRESTACIONES MÍNIMAS DE LOS FRENOS DE ALTA VELOCIDAD (ETI)

		Deceleración entre 330 y 300 km/h	Deceleración entre 300 y 230 km/h	Deceleración entre 230 y 170 km/h	Deceleración entre 170 y 0 km/h
		m/s^2	m/s^2	m/s^2	m/s^2
Emergencia	Caso A	0,85	0,90	1,05	1,20
Emergencia	Caso B	0,65	0,70	0,80	0,90
Servicio	Caso B	0,35	0,35	0,60	0,60

CUADRO 11.8 DISTANCIAS MÁXIMAS DE FRENADO CON FRENO DE EMERGENCIA

		Distancia máxima de 330 a 0 km/h	Distancia máxima de 300 a 0 km/h	Distancia máxima de 250 a 0 km/h	Distancia máxima de 200 a 0 km/h
		m	m	m	m
Emergencia	Caso A	4.530	3.650	2.430	1.500
Emergencia	Caso B	5.840	4.690	3.130	1.940

Fuente: ETI de material rodante, 2003 (Tomada de Alberto García)

Se denomina Caso A el tren en horizontal, con una climatología normal, con carga normal (80 kg por asiento) y un módulo de freno aislado. Se considera Caso B las circunstancias del caso anterior y, además, un distribuidor de freno aislado, una adherencia rueda carril reducida y el coeficiente de fricción entre la guarnición y el disco de freno reducido por la humedad

Fuente: López Pita, A. 2008. Explotación de líneas de ferrocarril. Ediciones UPC.