



Universidad
Politécnica
de Cartagena

BLOQUE 3. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA VÍA

Índice

1. Introducción

2. Comportamiento vertical

3. Comportamiento transversal

4. Comportamiento longitudinal



2

Comportamiento vertical

1. Características de las cargas
2. Evaluación de las cargas
3. Determinación de esfuerzos
4. Dimensionamiento
 - Carril
 - Traviesas
 - Capas de asiento
 - Plataforma
5. Conclusiones



1. Características de las cargas

- **Diferentes tipos de cargas**
 - Por el material (locomotoras, coches, vagones, etc.)
 - Circulación en recta: velocidades mayores
 - Circulación en curva: aceleraciones transversales
- **Diferentes velocidades**
 - Mercancías (60-100 km/h.)
 - Regionales (100-160 km/h.)
 - Larga distancia (150-220 km/h.)
 - Alta velocidad (200-350 km/h.)
- **Consecuencias en la evaluación de las cargas**
 - ✓ Aleatoriedad
 - ✓ Gran importancia de las cargas dinámicas



2. Evaluación de las cargas

- ✓ Cargas estáticas (Q_e)
 - Peso por rueda del tren

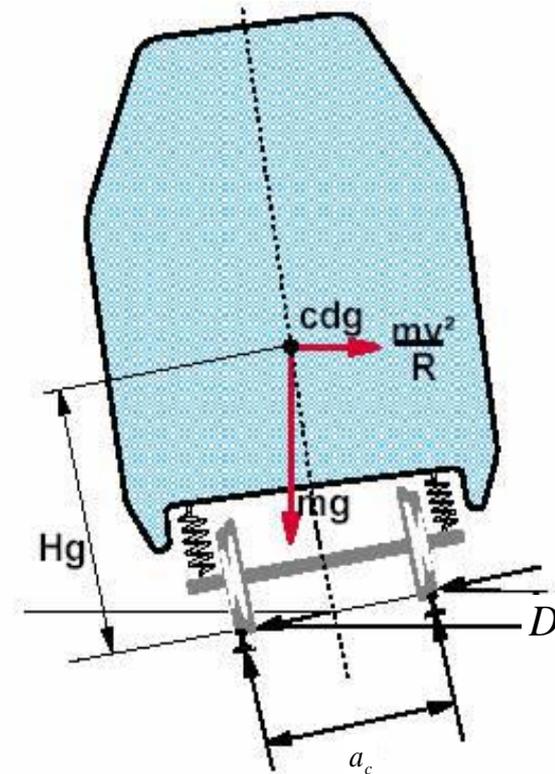
$$Q_e = Q$$

- ✓ Cargas cuasiestáticas (Q_c)
 - Insuficiencia (o exceso) de peralte

$$Q_c = Q \frac{2I_p Hg}{a_c^2}$$

- ✓ Cargas dinámicas (Q_d)
 - Cálculos empíricos

$$Q_d = \alpha Q_e + Q_c$$



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



2. Evaluación de las cargas

□ Expresiones para calcular $Q_d(\alpha)$

$$Q_d = \alpha Q_e + Q_c$$

✓ Fórmula de la ORE D-71 (años 60-70)

$$\alpha = 1 + k \left(\frac{V}{100} \right)^3 + ab \left(0,10 + 0,017 \left(\frac{V}{100} \right)^3 \right)$$

- k es un parámetro de calidad de vía. Normalmente 0,04
- a parámetro que recoge el concepto de danza de traviesas
 - a = 1,3 para $V < 140$ km/h
 - a = 1,2 para $V > 140$ km/h
- b parámetro función de las características del material
 - b = 2 para $V < 140$ km/h
 - b = 1,5 para $V > 140$ km/h



2. Evaluación de las cargas

□ Expresiones para calcular $Q_d(\alpha)$

- ✓ Fórmula de la DB alemana (años 70-80)

$$Q_d = \alpha Q_e + Q_c$$

Criterio Eisenmann

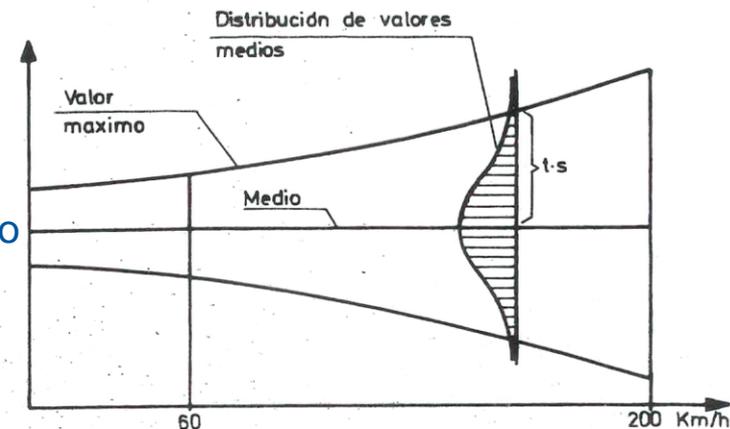
$$\alpha = 1 + ab\varphi$$

- a intervalo de confianza
 - a = 1 seguridad estadística del 60%
 - a = 2 seguridad estadística del 95%
 - a = 3 seguridad estadística del 99%
- b parámetro de calidad de vía
 - b = 0,1 para vías en muy buen estado
 - b = 0,2 para vías en buen estado
 - b = 0,3 para vías en mal estado
- φ parámetro de velocidad

$$\bullet \varphi = 1 + \frac{V - 60}{140} \quad V > 60 \text{ km/h}$$

$$\bullet \varphi = 1 \quad V < 60 \text{ km/h}$$

$$\boxed{\varphi = 1 + \frac{V - 60}{380}} \quad V > 200 \text{ km/h}$$



Fuente: López Pita, A. 2006. Infraestructuras ferroviarias. Ediciones UPC.



2. Evaluación de las cargas

Expresiones para calcular Q_d

- ✓ Fórmula de la SNCF (años 80-90) Criterio Prud'homme

Reflexiones iniciales:

- Análisis estadístico de las cargas dinámicas (naturaleza aleatoria)
- Cuantificación de la frecuencia propia de oscilación del peso suspendido del vehículo y del no suspendido

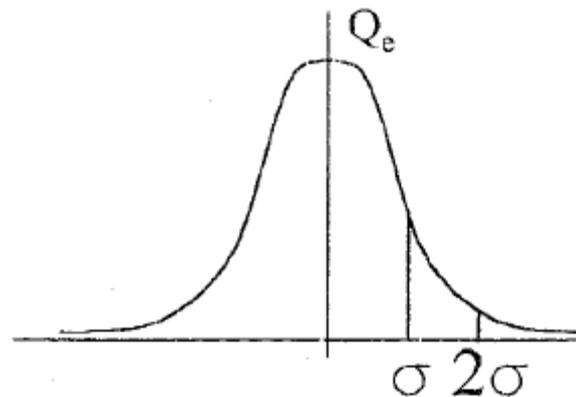


2. Evaluación de las cargas

□ Expresiones para calcular Q_d

✓ Fórmula de la SNCF (años 80-90) Criterio Prud'homme

- Análisis estadístico de las cargas dinámicas (naturaleza aleatoria)



- Carga dinámica total (95 % nivel de confianza)

$$Q_d = Q_e + Q_c + 2\sigma_{\Delta Q}$$



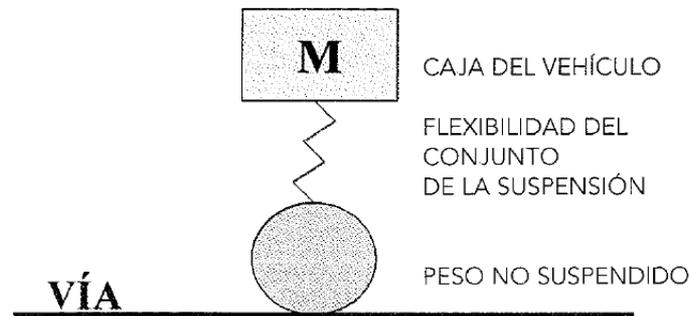
2. Evaluación de las cargas

□ Expresiones para calcular Q_d

- ✓ Fórmula de la SNCF (años 80-90) Criterio Prud'homme

Valor de $\sigma_{\Delta Q}$

- Cuantificación de la frecuencia propia de oscilación del peso suspendido del vehículo y del no suspendido



$$Fp = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m}}$$

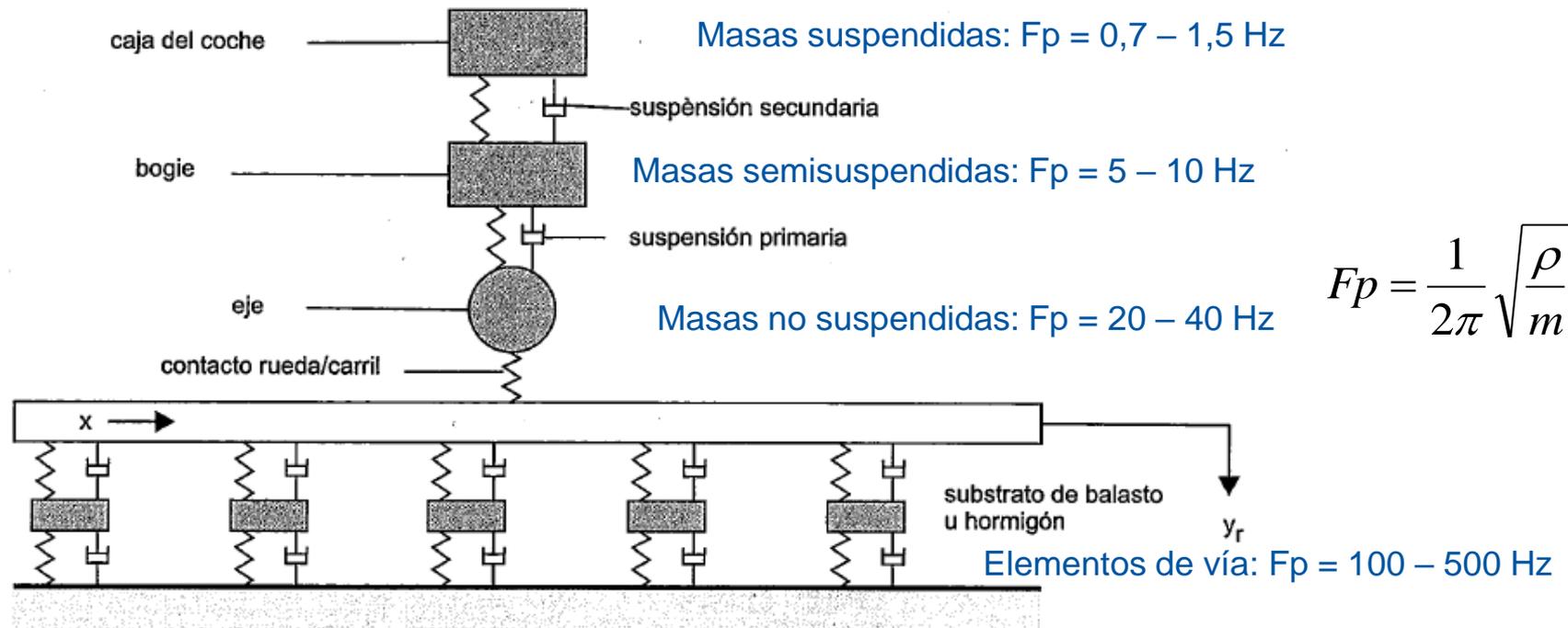


2. Evaluación de las cargas

□ Expresiones para calcular Q_d

✓ Fórmula de la SNCF (años 80-90) Criterio Prud'homme

Valor de $\sigma_{\Delta Q}$



$$F_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m}}$$

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

$$\sigma_{\Delta Q} = \sqrt{\sigma_{\Delta Q_{NS}}^2 + \sigma_{\Delta Q_S}^2}$$



2. Evaluación de las cargas

□ Expresiones para calcular Q_d

✓ Fórmula de la SNCF (años 80-90) Criterio Prud'homme

$$\sigma_{\Delta Q} = \sqrt{\sigma_{\Delta Q_{NS}}^2 + \sigma_{\Delta Q_S}^2} \quad Q_d = Q_e + Q_c + 2\sigma_{\Delta Q}$$

✓ Desviación típica de las cargas provocadas por las masas no suspendidas (m_{ns})

$$\sigma_{Q_{ns}} = 0,0042 b V \sqrt{m_{ns} \rho}$$

- b : desnivelación en cuerda de 3m. [mm]
- V : velocidad [km/h]
- m_{ns} : peso de las masas no suspendidas [ton/rueda]
- ρ : rigidez de vía [kN/mm]

✓ Desviación típica de las cargas provocadas por las masas suspendidas (m_s)

$$\sigma_{Q_s} = 0,2 \frac{V}{200} m_s$$

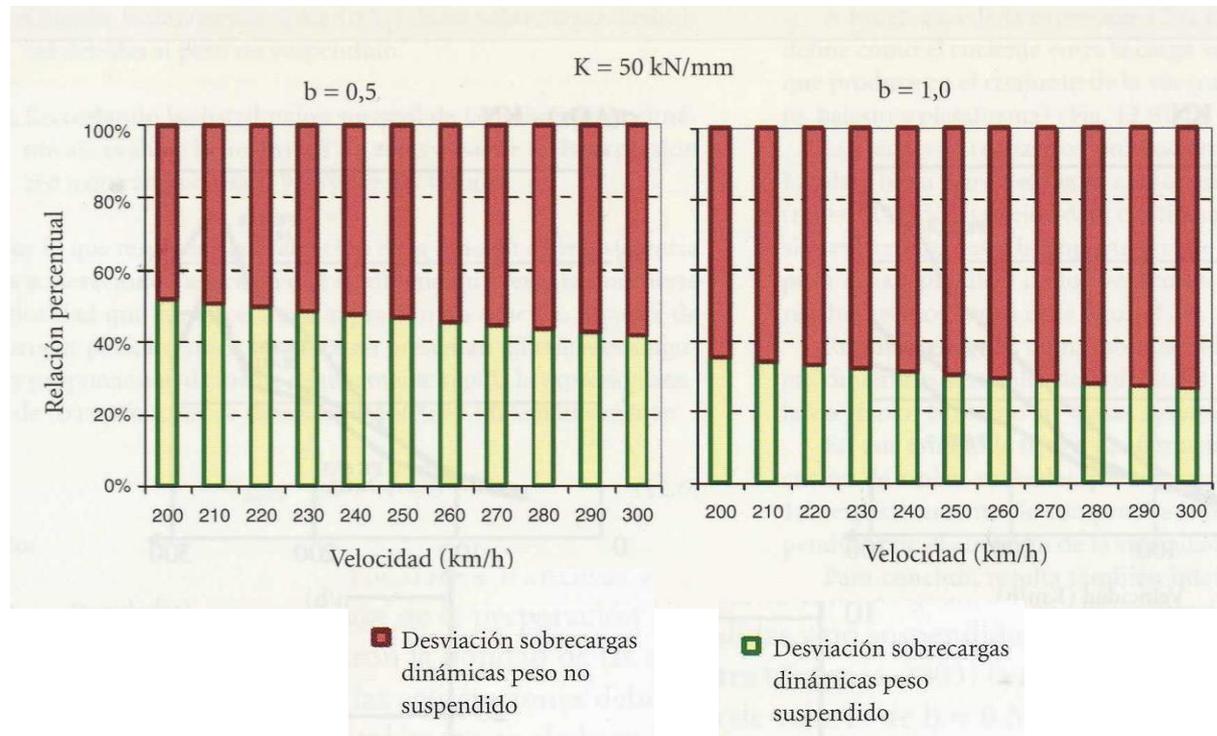


2. Evaluación de las cargas

□ Expresiones para calcular Q_d

✓ Fórmula de la SNCF (años 80-90) Criterio Prud'homme

Influencia de la calidad de vía



$$Q_d = Q_e + Q_c + a \sigma_{\Delta Q}$$

$$\sigma_{\Delta Q} = \sqrt{\sigma_{Q_{ns}}^2 + \sigma_{Q_s}^2}$$

$$\sigma_{Q_{ns}} = 0,0042 b V \sqrt{m_{ns} \rho}$$

$$\sigma_{Q_s} = 0,2 \frac{V}{200} m_s$$

Fuente: López Pita, A. 2006. Infraestructuras ferroviarias. Ediciones UPC.

Masas no suspendidas factor más importante de los daños de la vía



3. Determinación de esfuerzos

Modelización de la flexión de la vía

- Apoyos discretos
- Apoyos continuos
 - Superposición de esfuerzos

Objetivos

- ✓ Obtención de momento flector del carril
- ✓ Cargas sobre el balasto y plataforma
- ✓ Asientos de la vía



3. Determinación de esfuerzos

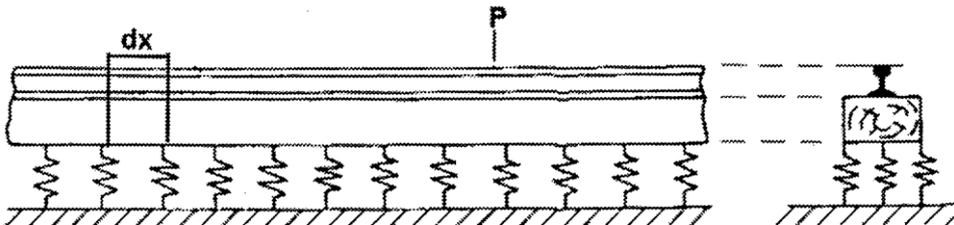
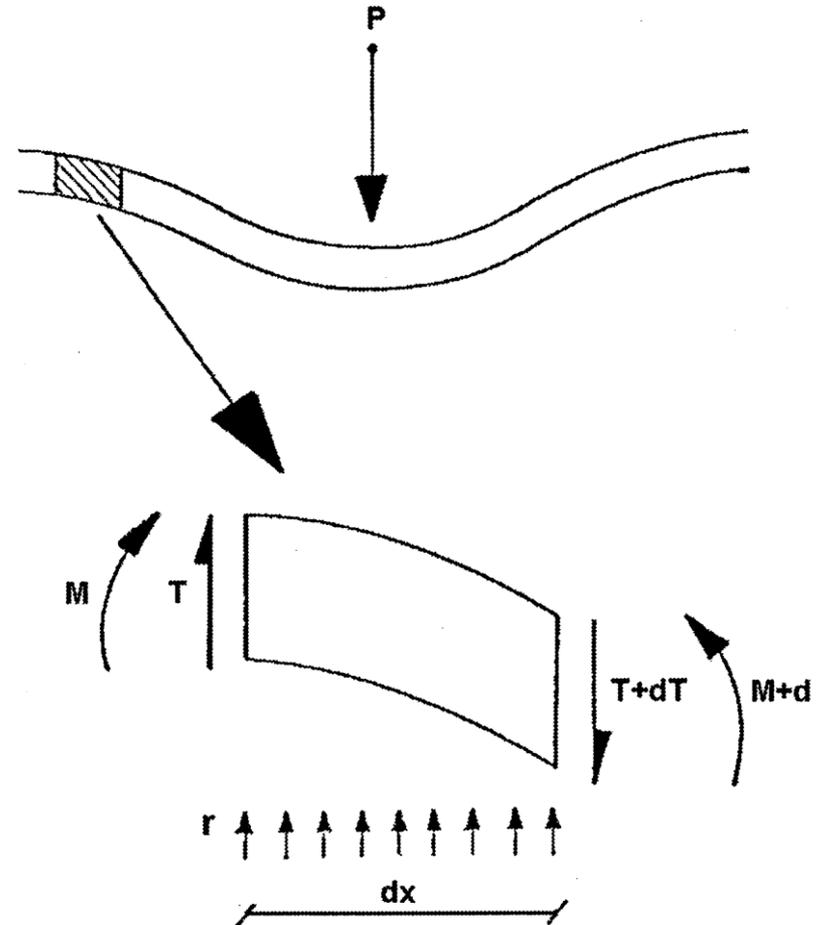
- **Método Zimmermann**

- Hipótesis:

- Vía apoyada sobre longrinas (apoyo continuo)
- Apoyos elásticos



Fuente: López Pita, A. 2006. Infraestructuras ferroviarias. Ediciones UPC.



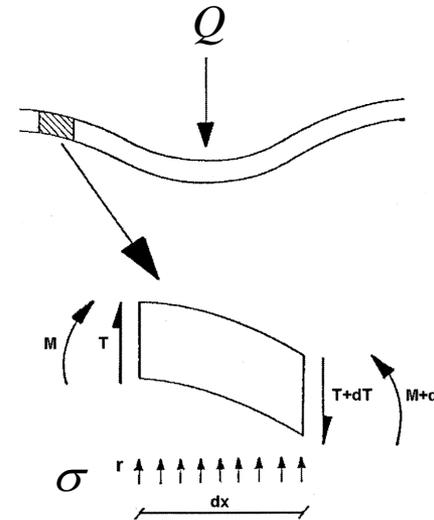
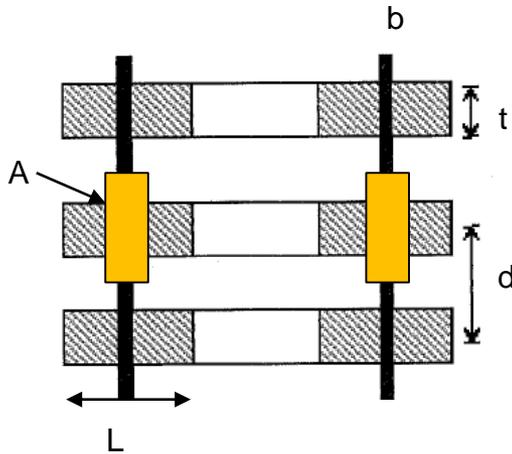


3. Determinación de esfuerzos

- Hipótesis de Winkler**

- σ = Presión sobre el balasto [ton/m²]
- C = Coeficiente de balasto [ton/m³]
- z = asiento [m]

$$\sigma = C \cdot z$$



- d: separación entre traviesas (50-60 cm)
- t: ancho de traviesa (25-30 cm)
- L: semi-longitud de traviesa bateada (40-50 cm)
- b: ancho del patín del carril
- A: área equivalente $A = t \cdot L$
- r: carga lineal uniforme
- Q: carga puntual (carga lineal por longitud de traviesa)

$$C = \frac{\sigma}{z} = \frac{Q}{Az}$$



3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (viga sobre largueros)

- Ecuación diferencial que describe el comportamiento de la viga

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + Cbz = 0$$

- Solución:

- Asiento

$$z = \frac{Q}{2bCL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right)$$

- Momento flector

$$M = \frac{QL}{4} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} - \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right)$$

- Presión en la cara inferior de la traviesa (Hip de Winkler)

$$\sigma = Cz = \frac{Q}{2bL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right)$$

- Longitud elástica

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}}$$

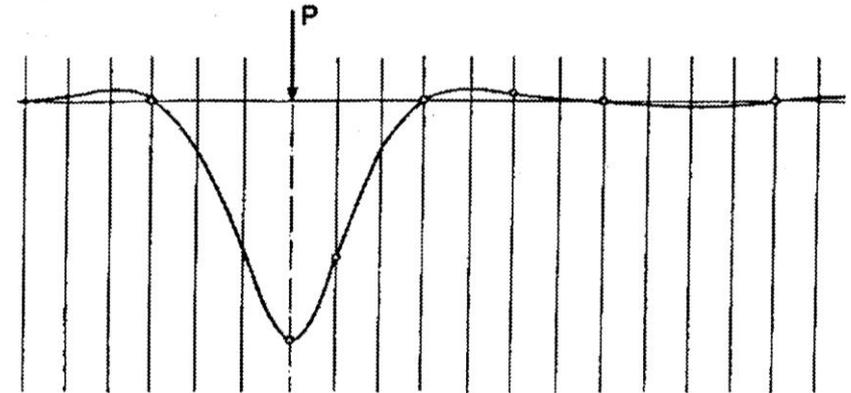
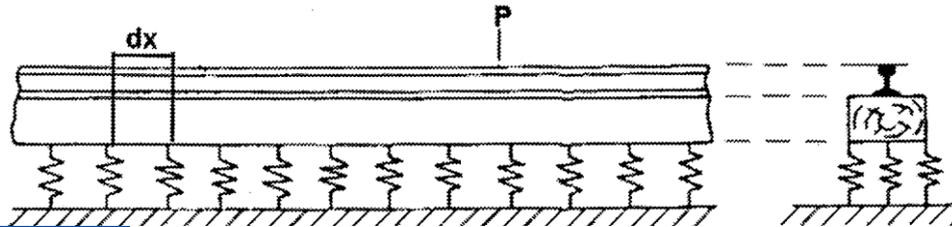


3. Determinación de esfuerzos

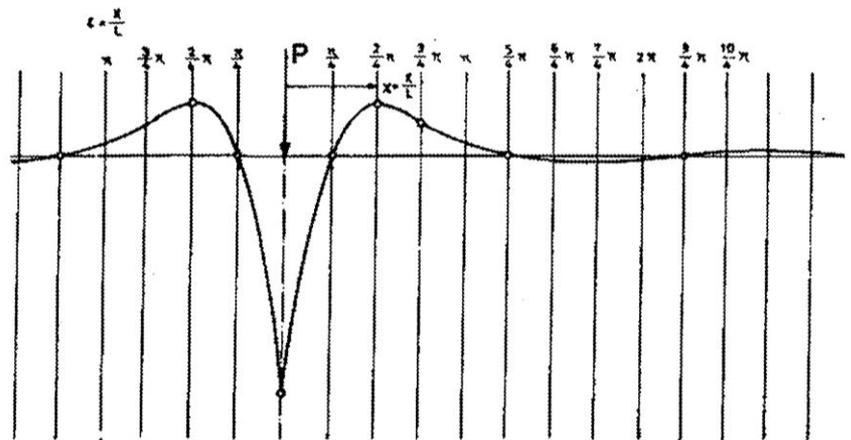
- **Método Zimmermann**

- Hipótesis:

- Vía apoyada sobre longrinas (apoyo continuo)
- Apoyos elásticos



LÍNEA DE INFLUENCIA DEL HUNDIMIENTO DEL CARRIL



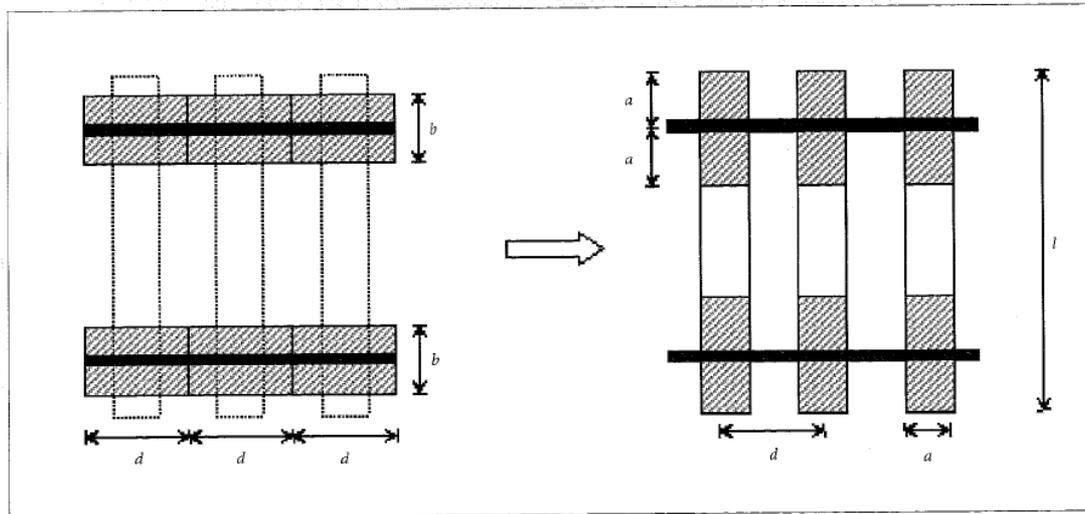
LÍNEA DE INFLUENCIA DEL MOMENTO FLECTOR DEL CARRIL



3. Determinación de esfuerzos

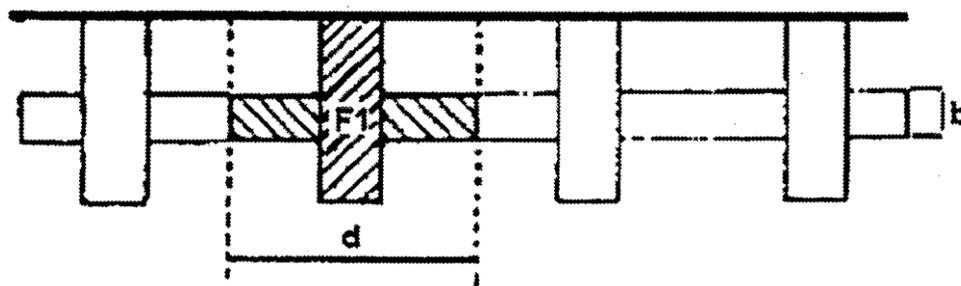
Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- Hipótesis:
 - Vía apoyada sobre traviesas



Fuente: Saller (1932) y Hanker (1935)

Fuente: López Pita, A. 2006. Infraestructuras ferroviarias. Ediciones UPC.



$$b \cdot d = A$$

- d: separación entre traviesas
- b: ancho del apoyo
- A: área equivalente

Fuente: Ferrocarriles. Apuntes de clase edición 2009-2010. José Manuel García Díaz de Villegas. Universidad de Cantabria. 2009.



3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- Ecuación diferencial que describe el comportamiento

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + Cbz = EI \frac{d^4 z}{dx^4} + C \frac{A}{d} z = 0$$

- Solución:

- Asiento

$$z = \frac{Q d}{2ACL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right)$$

- Momento flector

$$M = \frac{QL}{4} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} - \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right)$$

- Presión en la cara inferior de la traviesa (Hip de Winkler)

$$\sigma = Cz = \frac{Q d}{2AL} e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right)$$

- Longitud elástica

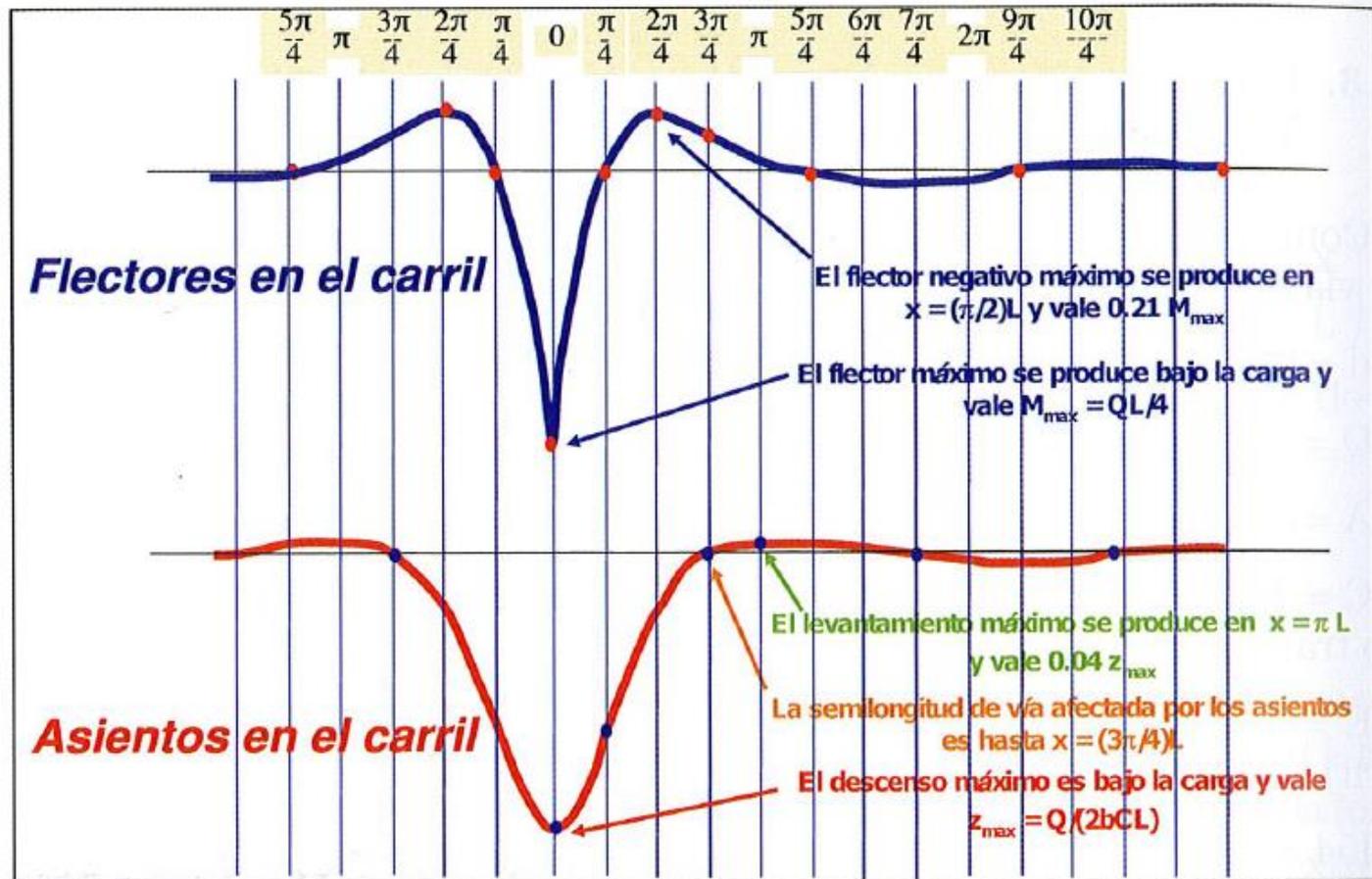
$$L = \sqrt[4]{\frac{4EId}{AC}}$$



3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

EJEMPLO – eje aislado





3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

EJEMPLO – Bogie (2 ejes con una carga por rueda de 10 t, empate=3m)

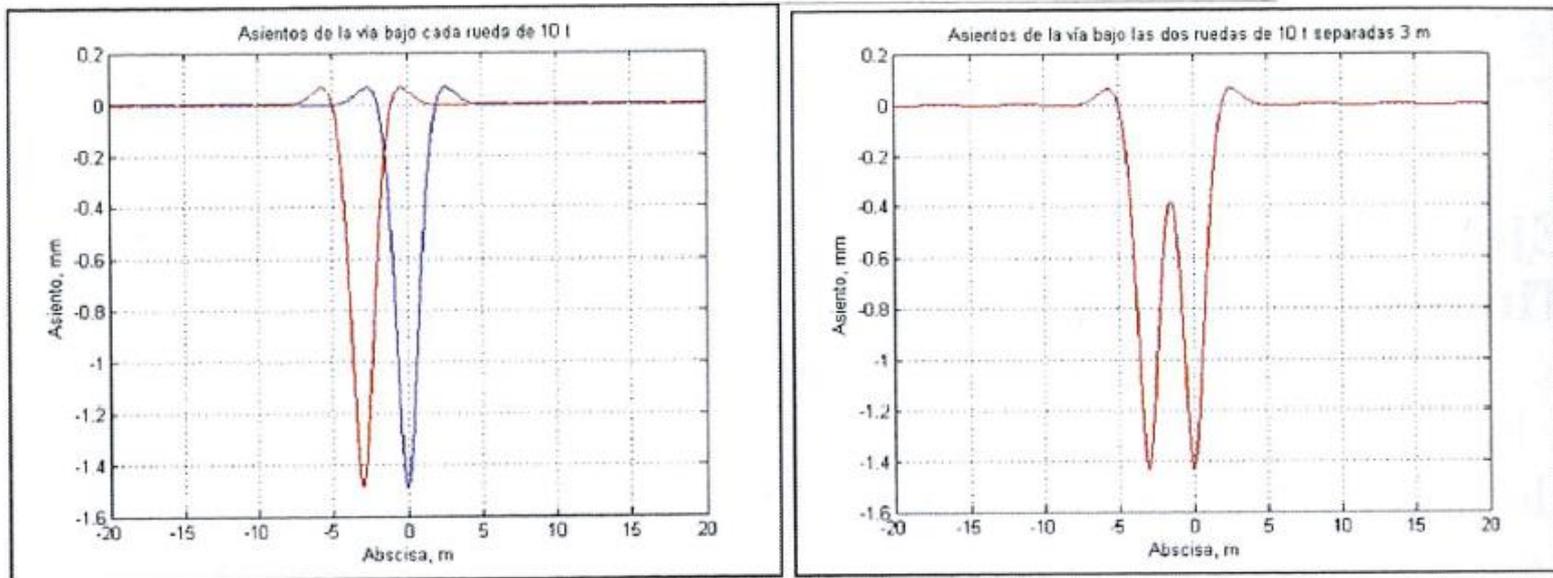


Fig. 6.2.4.1. Asientos de la vía bajo cada rueda y totales de la vía bajo las dos ruedas.



3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

EJEMPLO – Bogie (2 ejes con una carga por rueda de 10 t, empate=3m)

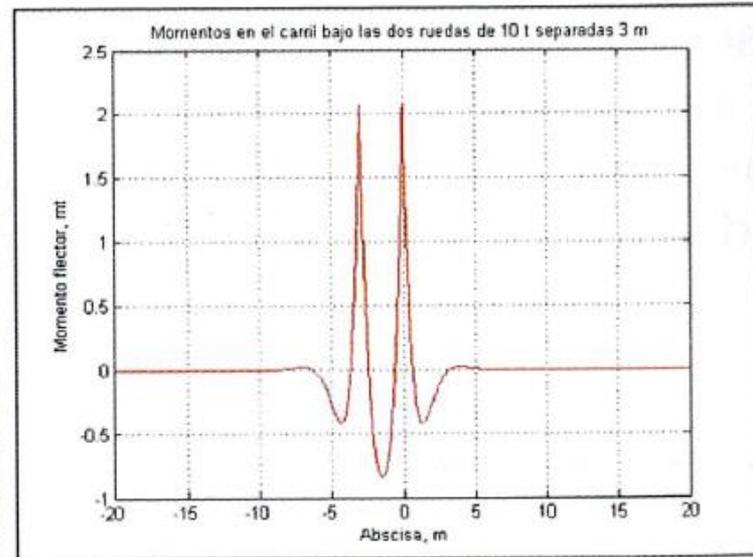
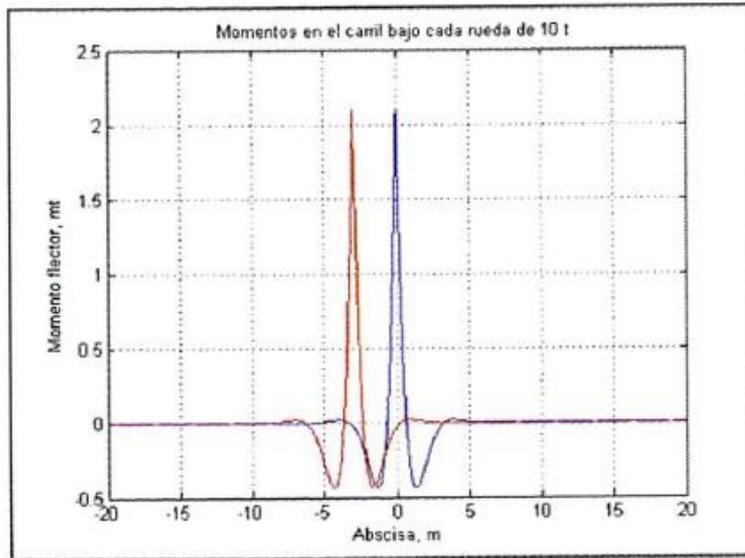


Fig. 6.2.4.2. Momentos flectores en carril bajo cada rueda y totales bajo las dos ruedas.



3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- **Consecuencias prácticas**

- ✓ Aumento del área equivalente de las traviesas
- ✓ Aumentar el coeficiente de balasto
- ✓ Aumentar el momento de inercia del carril

- **Ventaja:**

Facilidad para incluir las acciones sobre la vía con independencia de cuáles sean las cargas y su posición relativa, sin más que aplicar el principio de superposición.

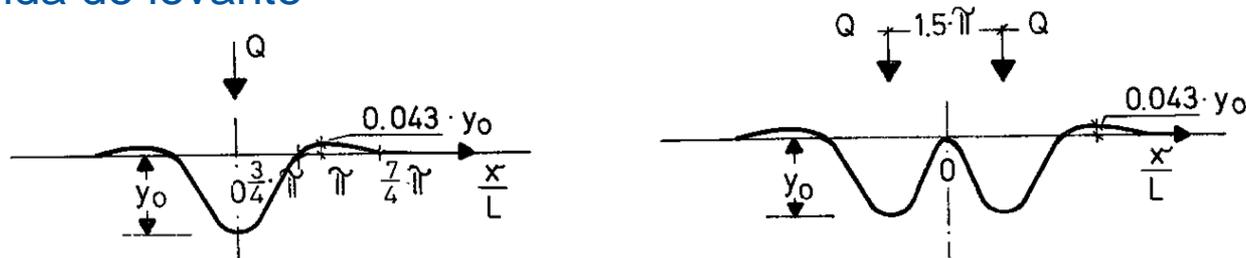


3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- Limitaciones

- Onda de levante



Fuente: López Pita, A. 2006. Infraestructuras ferroviarias. Ediciones UPC.

- Heterogeneidad vertical resistente de la vía en sentido longitudinal
 - Danza de las traviesas
 - Variación longitudinal de la rigidez de la vía

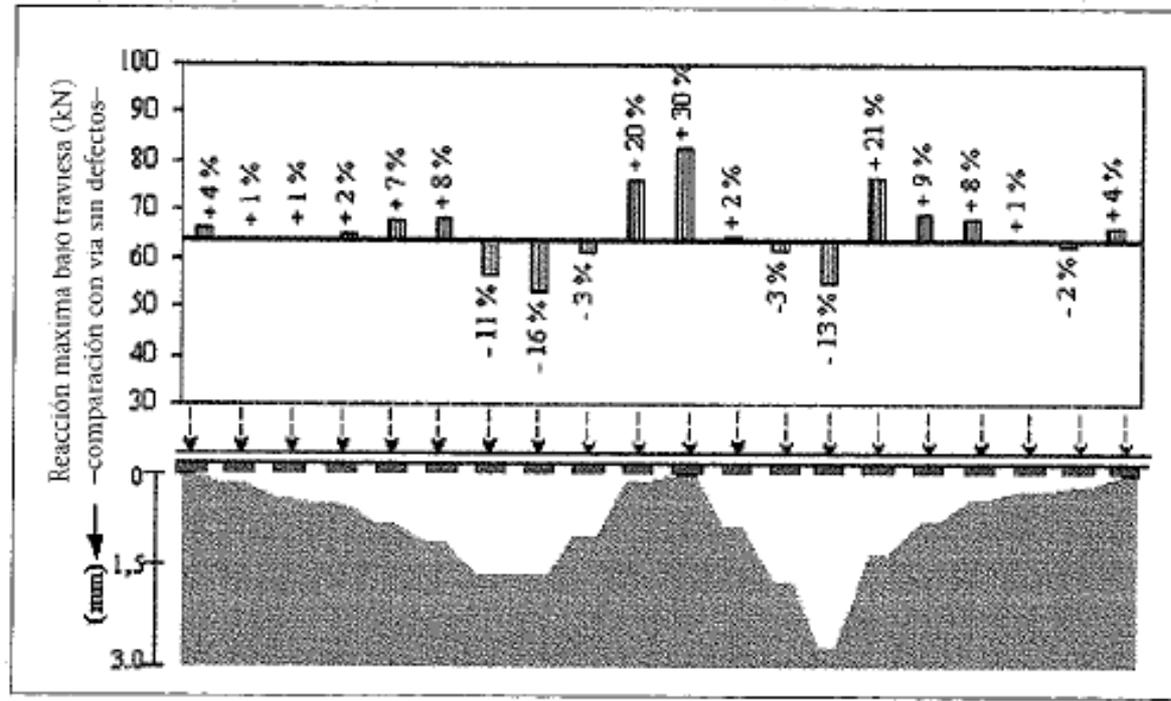


3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- Limitaciones

- Heterogeneidad vertical resistente de la vía en sentido longitudinal
- Danza de las traviesas



Fuente: López Pita, A. 2006. Infraestructuras ferroviarias. Ediciones UPC.

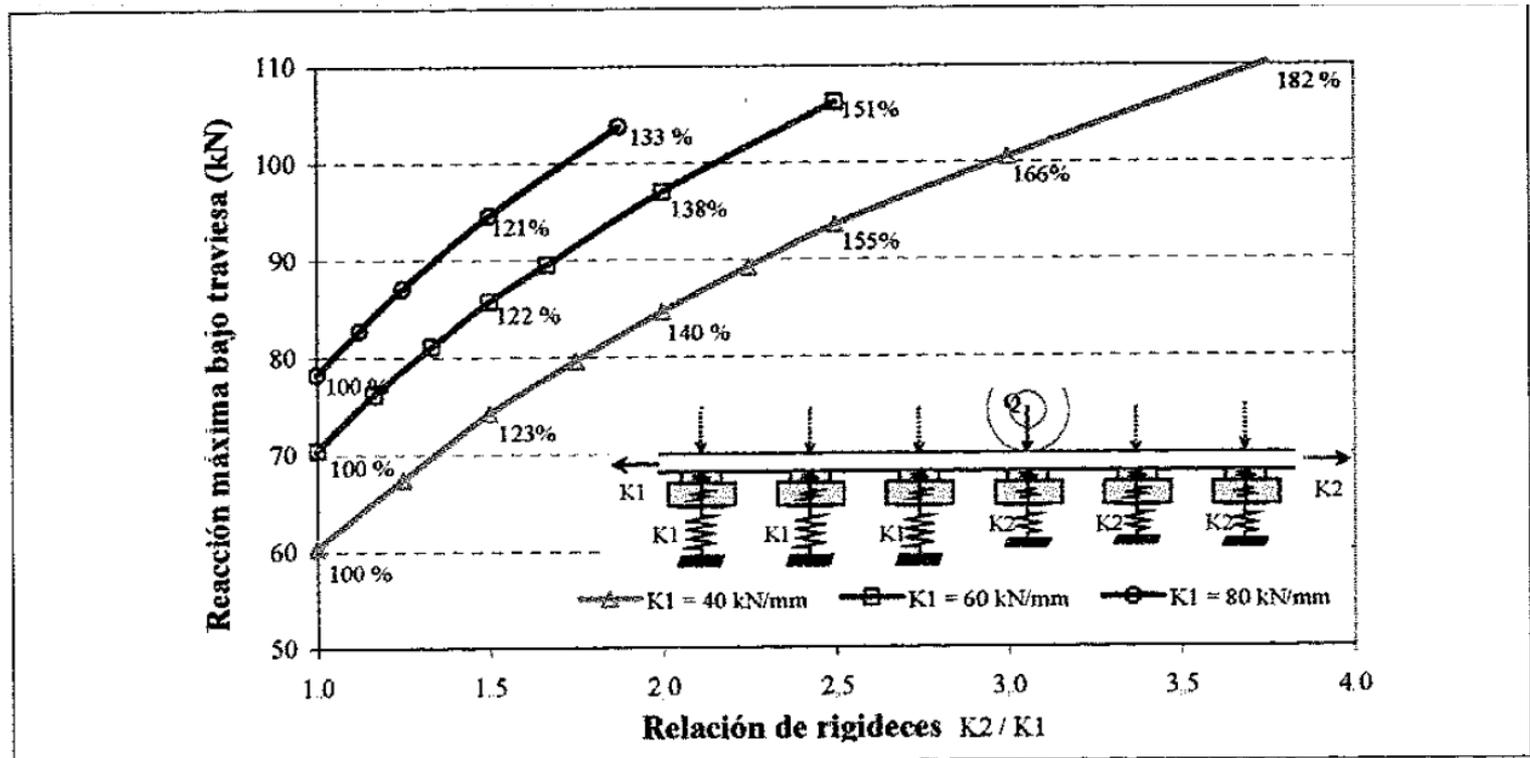


3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- Limitaciones

- Heterogeneidad vertical resistente de la vía en sentido longitudinal
- Variación longitudinal de la rigidez de la vía



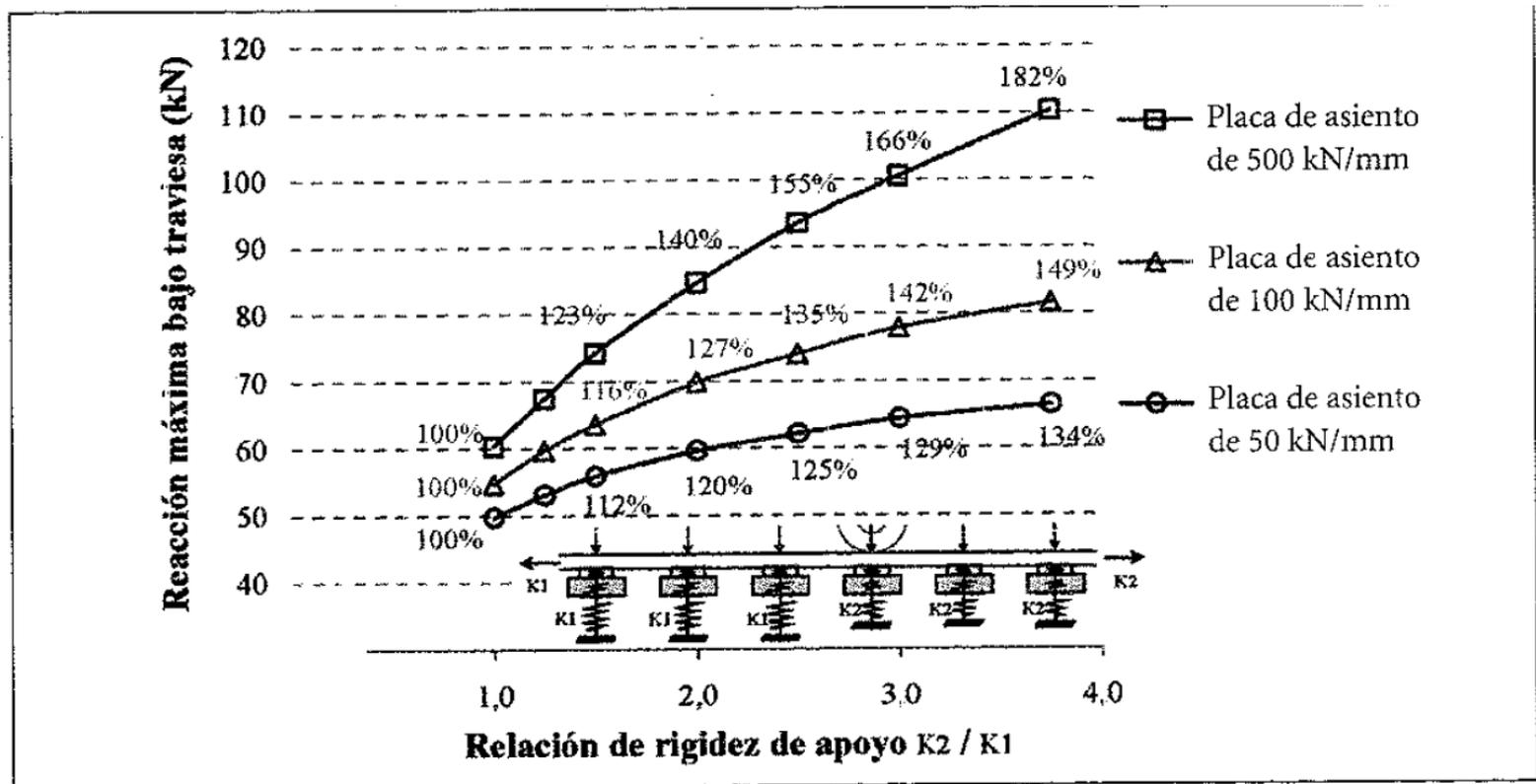


3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- Limitaciones

- Heterogeneidad vertical resistente de la vía en sentido longitudinal
- Variación longitudinal de la rigidez de la vía





3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann (Adaptación de Timoshenko)

- **Limitaciones**

- Heterogeneidad vertical resistente de la vía en sentido longitudinal
 - Variación longitudinal de la rigidez de la vía

Con placas de asiento más rígidas:

- Menor descenso del carril
- Menor trabajo desarrollado por el emparrillado de la vía

Sin embargo:

- Mayores presiones sobre el balasto
- Mayor deterioro del balasto
- Mayor deterioro de la geometría de la vía



3. Determinación de esfuerzos

Recomendaciones valor óptimo rigidez vertical de vía

Infraestructuras con **excesivo** valor de rigidez vertical

- Elevadas tensiones en el contacto rueda-carril
- Mayores cargas dinámicas en traviesas y balasto

Se intensifica el deterioro de la vía

Infraestructuras con **reducida** rigidez vertical:

- Mayor asiento de la capas granulares
- Mayor tensión de flexión en el carril
- Aumento de la fatiga de materiales – Sistema de sujeción entre carril y traviesa

Se intensifica el deterioro de la vía



3. Determinación de esfuerzos

Recomendaciones valor óptimo rigidez vertical de vía

Equilibrio

López Pita (1984): 50-60 KN/mm V=200 km/h

70-90 KN/mm V=300 km/h

Teixeira (2003): 70-80 KN/mm

Paris – Lyon
Madrid – Sevilla



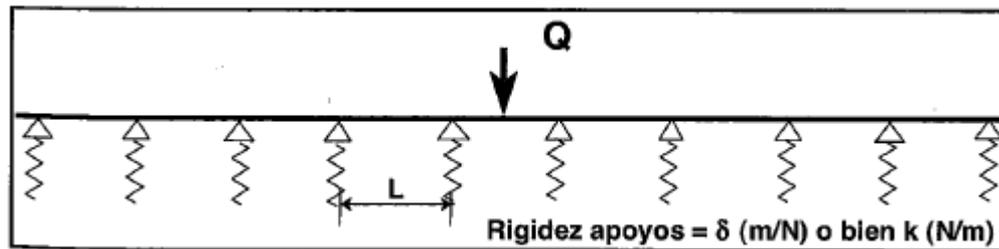
3. Determinación de esfuerzos

Método Zimmermann

- Carril como viga continua sobre apoyos elásticos continuos

Método de Unold-Dischinger-Lorente de Nó

- Carril como viga continua sobre apoyos elásticos discretos



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

“Viga continua sobre apoyos elásticos” *Geotecnia y cimientos*, Prof. Jiménez Salas, Tomo III, 1ª parte, capítulo 1.1.7. (1980)



4. Dimensionamiento

- **Dimensionamiento del carril**
- **Dimensionamiento de la traviesa**
- **Dimensionamiento de las capas de asiento y la plataforma**



4. 1. Dimensionamiento del carril

- **Tensiones normales**

$$\sigma_{tot} = \sigma_d + \sigma_T + \sigma_{res} + \sigma_c + \sigma_f$$

- σ_d = Tensión debida a las cargas dinámicas
- σ_T = Tensión de origen térmico ($E \alpha \Delta T$)
- σ_{res} = Tensión residual de los procesos de laminación
- σ_c = Tensión de colocación en curva
- σ_f = Tensión debida a la fatiga

- **Comprobación**

- Tensiones admisibles

$$\sigma_{tot} \leq \sigma_{adm} = 0,9\sigma_E$$

- σ_E = Límite elástico del acero (380-500 Mpa)



4. 1. Dimensionamiento del carril

- **Comprobación**
- Tensiones tangenciales
 - Criterio de Von Mises:

$$\tau_{adm} \leq \frac{0,9\sigma_E}{\sqrt{3}}$$

- σ_E = Límite elástico del acero (380-500 Mpa)



4. 2. Dimensionamiento de la traviesa

- **Acción máxima** (Zimmermann-Timoshenko):

$$R_d = \frac{Q_d d}{2L_v}$$

- **Reacción del balasto**

- Vía después del bateo
- Vía consolidada
- Vía en mal estado

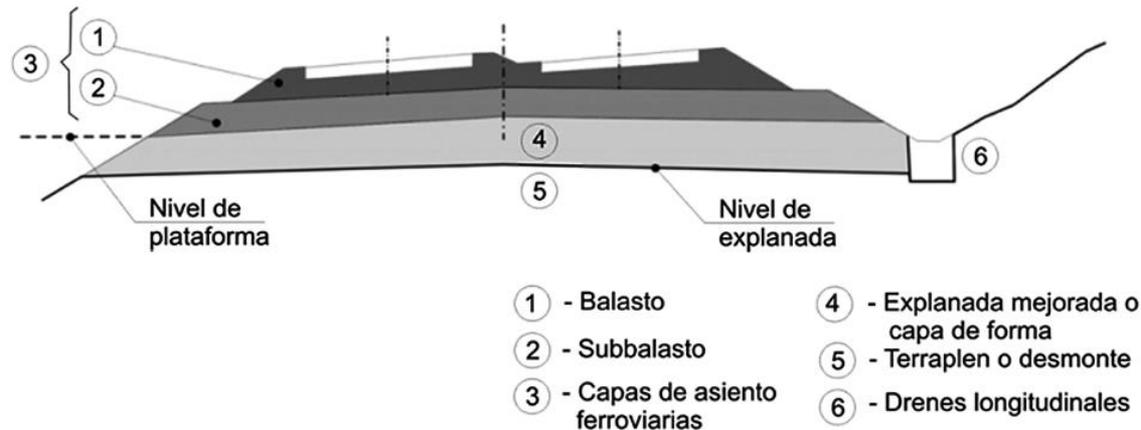
- **Comprobación**

- Tensiones menores de las admisibles en todas las secciones



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

- Plataforma
 - Clasificación de suelos
 - Materiales constitutivos
- Capas de asiento
 - Balasto
 - Subbalasto



Fuente: Instrucción para el Proyecto y Construcción de Obras Ferroviarias IF-3. Vía sobre Balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal.

Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio. Ministerio de Fomento.



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Plataforma

- **Clasificación del suelo según su calidad**

- QS0: Suelos de difícil mejora (orgánicos, solubles, arcillas expansivas, etc...).
- QS1: Suelos malos (del 40% al 15% de finos, rocas muy evolutivas, margas, etc...).
- QS2: Suelos medianos (menos del 15% de finos y rocas de dureza media).
- QS3: Suelos buenos (<7% de finos y roca dura).

- **Materiales constitutivos**

P1 - Plataforma de mala capacidad portante. $CBR \leq 5$.

P2 - Plataforma de capacidad portante media. $5 < CBR \leq 20$.

P3 - Plataforma de capacidad portante buena. $CBR > 20$.



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Capas de asiento

- **Definición de balasto**

Material granular sobre el que se asientan las traviesas

- **Definición de subbalasto**

Material de tamaño grava arenosa que sirve de transición entre el balasto y la plataforma

- **Funciones**

- Transmitir y repartir carga
- Empotrar la traviesa
- Proporcionar elasticidad
- Afinar rasante y peraltar
- Drenar
- Protección ante heladas
- Disminución del ruido



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Capas de asiento

Espesor de la capa de balasto

Depende de:

- ✓ Tráfico
 - ✓ Carga por eje
 - ✓ Velocidad
- } CATEGORÍA DE LÍNEA
- ✓ Calidad conseguida al formar la plataforma

El espesor mínimo de la capa de balasto bajo traviesa e_b , en función de la velocidad máxima de circulación en la línea ferroviaria, será el siguiente:

V (km/h)	e_b (cm)
$V < 120$	25
$V \geq 120$	30

Fuente: Instrucción para el Proyecto y Construcción de Obras Ferroviarias IF-3. Vía sobre Balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal.

Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio. Ministerio de Fomento.



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Consideraciones generales sobre los espesores de las capas de asiento

1. Líneas con $V > 200$ km/h, el espesor total (balasto + subbalasto) no debe ser inferior a 0,6 metros (excepcionalmente 0,5 m)
2. El valor mínimo del espesor de la capa de subbalasto debe ser la mitad del espesor total calculado
3. Por razones constructivas, el espesor de la capa de subbalasto no debe ser inferior a 15 cm
4. En vías con $V_{max} > 160$ km/h la capa de subbalasto no debe ser menor de 25 cm
5. En general, se recomienda que exista un espesor mínimo de balasto de 30 cm bajo la traviesa en líneas con velocidad superior a 120 km/h, y debe estar comprendido entre 25 y 30 cm en líneas de menor velocidad



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Comprobación de las capas de asiento y la plataforma

- Metodología
 - Determinación de la tensión admisible de la plataforma
 - Determinación de la tensión existente sobre la plataforma
 - Comprobar

$$\sigma_{adm_p} \geq \sigma_p$$



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Determinación de la tensión admisible sobre la plataforma

- Formulación de Heukelom y Klomp

$$\sigma_{adm_p} = \frac{0,006 E_d}{1 + 0,7 \text{Log} N}$$

- N: ciclos de carga que debe soportar (min $2 \cdot 10^6$ ciclos)
- E_d : módulo de elasticidad dinámico (Kg/cm^2) (≈ 100 CBR)

P1 - Plataforma de mala capacidad portante. $\text{CBR} \leq 5$.

P2 - Plataforma de capacidad portante media. $5 < \text{CBR} \leq 20$.

P3 - Plataforma de capacidad portante buena. $\text{CBR} > 20$.



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Comprobación de las capas de asiento y la plataforma

- Metodología
 - Determinación de la tensión admisible de la plataforma
 - **Determinación de la tensión existente sobre la plataforma**
 - Comprobar

$$\sigma_{adm_p} \geq \sigma_p$$



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Determinación de la tensión existente sobre la plataforma

Parámetros más influyentes:

- Clase geotécnica de la plataforma
- Espesor de las capas de asiento
- Longitud de las traviesas



4. 3. Dimensionamiento de las capas de asiento y plataforma

Comprobación de las capas de asiento y la plataforma

- Metodología
 - Determinación de la tensión admisible de la plataforma
 - Determinación de la tensión existente sobre la plataforma
 - **Comprobar**

$$\sigma_{adm_p} \geq \sigma_p$$



5. Conclusiones

- La mayor carga dinámica la producen las masas no suspendidas:

$$\sigma_{ns} = 0,0042 b V \sqrt{m_{ns} \rho}$$

- Para reducir las
 - Disminuir la rigidez (o el coeficiente de balasto) de la vía
 - Disminuir las masas no suspendidas
 - Conservación de la vía
- De las ecuaciones de Zimmermann-Timoshenko se deduce:
 - Mejor coeficiente de balasto menores asientos
 - Mejor coeficiente de balasto mayores tensiones transmitidas
 - Traviesas más próximas, menores asientos

$$\sigma = \frac{Q_d d}{2AL_v}$$

$$z = \frac{Q_d d}{2ACL_v}$$

$$L_v = \sqrt[4]{\frac{4EId}{AC}}$$



5. Conclusiones

- **Método Zimmermann Timoshenko:**
 - Tiene limitaciones (onda de levante, heterogeneidad vertical)
 - Utilizado como orden de magnitud
- **Estudio más preciso: MEF**