Universidad de Cantabria

Ejercicios de Ferrocarriles

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos

Prof. **Luigi dell'Olio / Borja Alonso / Jose Luis Moura**

Ejercicios de Ferrocarriles

Universidad de Cantabria

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos

Grado en Ingeniería Civil - 4º Curso

Asignatura: G1989 Ferrocarriles

Prof. **Luigi dell'Olio / Borja Alonso / Jose Luis Moura**

En este documento se recogen los problemas y ejercicios mas importantes de la asignatura G1989 Ferrocarriles del 4º curso de Ingeniería Civil.

El objetivo general de la asignatura es dotar al alumno de los conceptos básicos de la ingeniería ferroviaria desde el punto de vista infraestructural (estudio de la plataforma y de la superestructura ferroviaria) y desde el punto de vista de la gestión y explotación (señalización y operaciones ferroviarias).

Luigi dell'Olio, Borja Alonso, Jose Luis Moura
Av. de los Castros s-n 39005, Santander, Cantabria
https://sumlab.unican.es/

Indice

Capitulo 1. Plataforma y Balasto

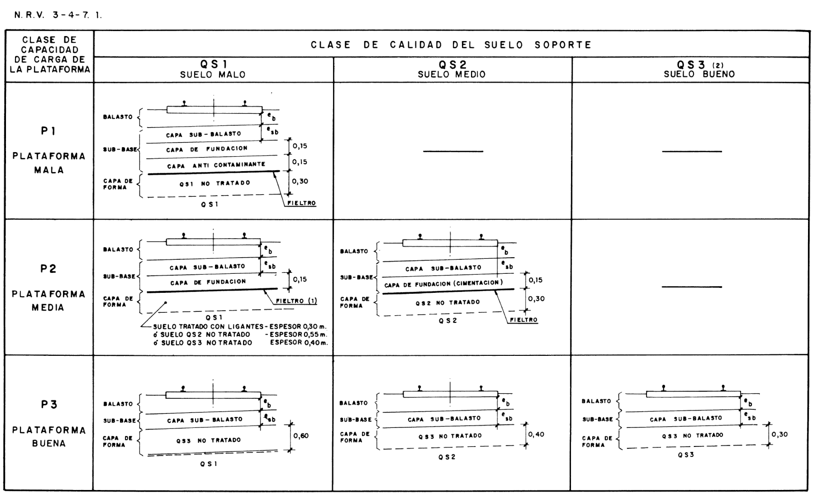
Problema 1

Se tiene un suelo con una calidad soporte QS2 y se requiere una capacidad portante P3. Se sabe además que el tráfico de viajeros en la línea es de 10.000 t, el tráfico de mercancías es de 30.000 tn y el tráfico de locomotoras es de 15.000 t. Se supone que la vía no tiene imperfecciones geométricas y de ningún tipo.

Calcular la estructura de las capas de una vía sobre balasto convencional en vía simple y en vía doble para una vía convencional.
Se pide la solución más económica posible.
Solo se disponen de los datos siguientes:

CAPACIDAD PORTANTE DE UNA PLATAFORMA

Calidad del suelo soporte	Capa de forma a constituir para obtener una plataforma con capacidad portante determinada		Capacidad portante obtenida en la plataforma
	Calidad del suelo	Espesor mínimo en m	
QS1	QS1	—	P1
	QS2	0,50	P2
	QS3	0,35	P2
	QS3	0,50	P3
QS2	QS2	—	P2
	QS3	0,35	P3
QS3	QS3	—	P3



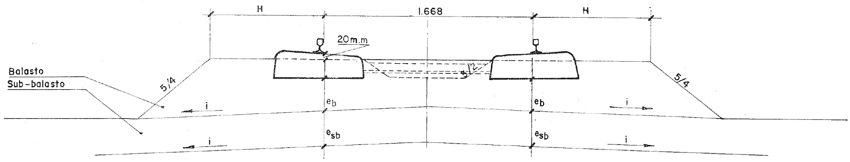
(1) - SOLAMENTE CON CAPA DE FORMA TRATADA O DE SUELO QS2.

(2) - LA CAPA SUB-BALASTO PUEDE SUPRIMIRSE CUANDO EL SUELO SOPORTE QS3, ESTA BIEN GRADUADO NATURALMENTE.

Fig. 2.1.2.b.

N.R.V. 3-4-1.O.

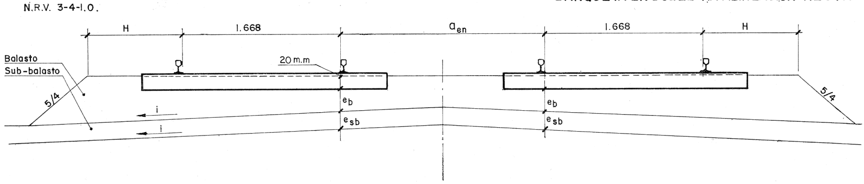
BANQUETA EN VIA UNICA, ALINEACION RECTA



Dimensiones	Grupos 1A y 1B	Grupos 1B y 1C	Grupos 1C y 2	Grupos 2 y 3A	Grupos 3A y 3B	Grupos 3B y 4
Espesores: $e_b = e_{sb}$	23 cm	23cm	20cm	18cm	15cm	13 cm
Capa de enrase	Superficie: 2 cm por debajo del punto mas bajo del patin del carril					
Hombro: H	105cm	105cm	100 cm	100 cm	95 cm	90 cm
Pendiente transversal: i	5 %	5%	5%	3%	3%	3%

N.R.V. 3-4-1.O.

BANQUETA EN DOBLE VIA. ALINEACION RECTA



Dimensiones	Grupos 1A y 1B	Grupos 1B y 1C	Grupos 1C y 2	Grupos 2 y 3A	Grupos 3A y 3B	Grupos 3B y 4
Espesor: $e_b = e_{sb}$	23cm	23cm	20cm	18cm	15cm	13cm
Capa de enrase	Superficie: 2 cm por debajo del punto mas bajo del patin del carril					
Hombro: H	105cm	105cm	100cm	100 cm	95 cm	90 cm
Ancho de entrevia: a_{en}	234cm	234cm	230cm	230 cm	220 cm	210 cm
Pendiente transversal: i	5%	5%	5%	3%	3%	3%

Grupo 1A, 85.000 t - km $\geq T_{f_2} >$ 50.000 t - km;

Grupo 1B, 50.000 t - km $\geq T_{f_2} >$ 28.000 t - km;

Grupo 1C, 28.000 t - km $\geq T_{f_2} >$ 14.000 t - km;

Grupo 2, 14.000 t - km $\geq T_{f_2} >$ 7.000 t - km;

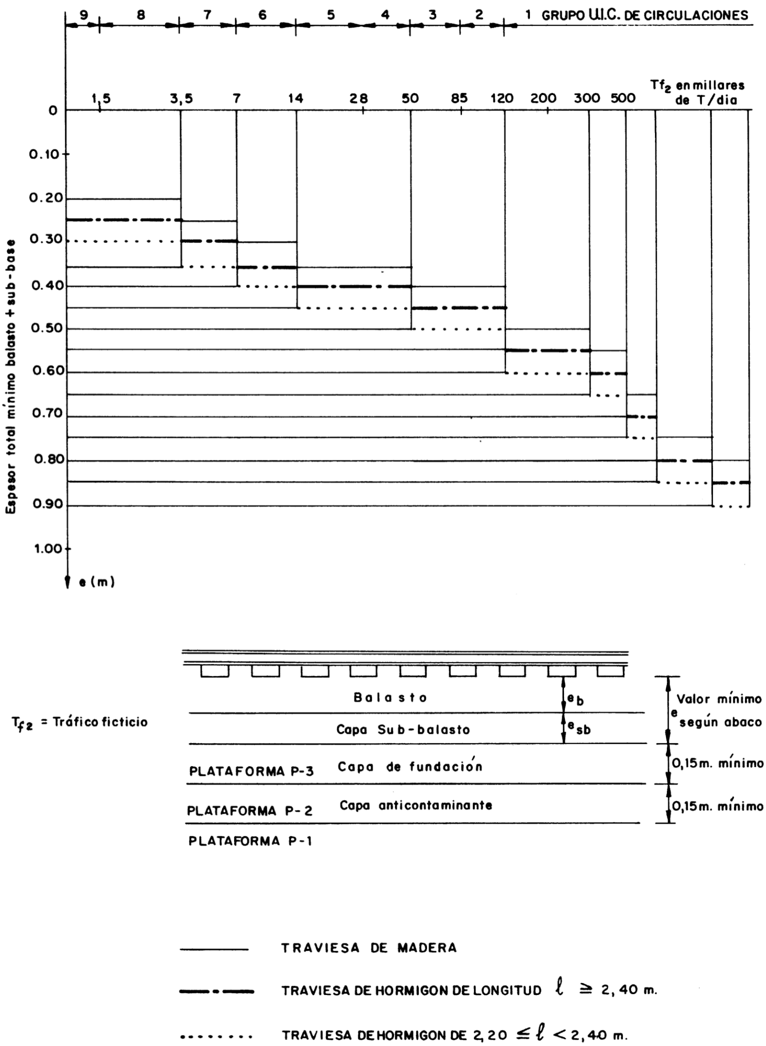
Grupo 3A, 7.000 t - km $\geq T_{f_2} >$ 3.500 t - km;

Grupo 3B, 3.500 t - km $\geq T_{f_2} >$ 1.500 t - km;

Grupo 4, 1.500 t - km $\geq T_{f_2}$

N.R.V. 2-1-0.1.

U.I.C. GRUPOS DE CLASIFICACION



Solución:

Lo primero es empezar por la calidad de la plataforma que deseada.

Se quiere una calidad del suelo soporte QS2 y una capacidad portante P3. Según esto y usando la tabla tenemos un espesor mínimo de capa de forma de 0,35 m.

Según el catalogo de secciones estructurales el espesor de la capa de forma es de 0,40 m. la solución más económica nos obliga a elegir 0,35 en vez de 0,40 m.
Una vez obtenido el espesor de la capa de forma se obtiene las dimensiones de las capas de balasto y subbalasto. Para ello hace falta el tráfico de Tn ficticias diarias.

Según la fórmula:

$$T_f = (T_v + T_m \cdot K_m + T_t \cdot K_t) \cdot S$$

según los datos proporcionados en el enunciado, el coeficiente de calidad de la vía es de 1 al no tener esta imperfecciones.

Las soluciones más económicas elegimos los menores coeficientes de mayoración.

T_f= (10.000+30.000·1,15+15.000·1,40) ·1,00= 65.500

según esto la categoría de trafico es 1 A.

Entrando en la tabla de tráfico ficticio diario nos sale una categoría 1 A.

Una vez obtenida esa categoría se entra en el esquema de vía simple con ese grupo y se obtienen los valores de los espesores de cada capa e, el valor del hombro H la capa de enrase y la pendiente transversal.

Por lo tanto la solución será:

Si la vía es simple, entrando en el esquema de dimensionamiento para balasto y subbalasto:

Espesor de la capa de forma: 0,35 m
Espesor de balasto y subbalasto: 0,23 m

Hombro: 105 cm
Capa de enrase: 2 cm por debajo del punto más bajo del patín del carril
Pendiente transversal i: 5%

Si la vía es doble, entrando en el esquema pero ahora para vía doble:

Espesor de la capa de forma: 0,35 m
Espesor de balasto y subbalasto: 0,23 m
Hombro: 105 cm
Capa de enrase: 2 cm por debajo del punto más bajo del patín del carril
Pendiente transversal i: 5%

Capítulo 2. Geometría de la vía

Problema 1

Las máximas aceleraciones centrifugas sin compensar admitidas para circular con velocidad máxima de 160 Km/h son las que se detallan a continuación en la tabla:

TIPO DE TREN	α_{sc}
Serie 130	1,2 m/s^2
Serie 599	1,0 m/s^2
Serie 440	0,65 m/s^2

Calcule para cada tipo de tren el radio mínimo por el cual se podrá circular a 160 Km/h y la insuficiencia de peralte en cada caso.

Datos:
g = 9,8 m/s^2
a = 1,7 m
z_p = 160 mm

Solución:

La aceleración centrifuga sin compensar se calcula aplicando:

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

Partir la la formulación anterior podemos calcular el radio mínimo.

A. Para un Serie 130:

$$1{,}2 = \frac{\left(\frac{160}{3{,}6}\right)^2}{R} - \frac{9{,}8 \cdot 0{,}16}{1{,}7} \rightarrow R = 930{,}70m$$

B. Para un Serie 599:

$$1{,}0 = \frac{\left(\frac{160}{3{,}6}\right)^2}{R} - \frac{9{,}8 \cdot 0{,}16}{1{,}7} \rightarrow R = 1.027{,}54m$$

C. Para un Serie 440:

$$0{,}65 = \frac{\left(\frac{160}{3{,}6}\right)^2}{R} - \frac{9{,}8 \cdot 0{,}16}{1{,}7} \rightarrow R = 1.256{,}27m$$

Para calcular la insuficiencia de peralte se aplica la siguiente formulación:

$$I = z_{p,max} - z_p = z_{t,max} - 160$$

$$z_{p,max} = \frac{a \cdot V_{max}^2}{g \cdot R}$$

A. Para un Serie 130:

$$z_{p,max} = \frac{a \cdot V_{max}^2}{g \cdot R} = \frac{1{,}7 \cdot \left(\frac{160}{3{,}6}\right)^2}{9{,}8 \cdot 930{,}70} = 0{,}368m = 368mm \rightarrow I = 368 - 160 = 208mm$$

B. Para un Serie 599:

$$z_{p,max} = \frac{a \cdot V_{max}^2}{g \cdot R} = \frac{1{,}7 \cdot \left(\frac{160}{3{,}6}\right)^2}{9{,}8 \cdot 1.027{,}54} = 0{,}333m = 333mm \rightarrow I = 333 - 160 = 173mm$$

C. Para un Serie 440:

$$z_{p,max} = \frac{a \cdot V_{max}^2}{g \cdot R} = \frac{1{,}7 \cdot \left(\frac{160}{3{,}6}\right)^2}{9{,}8 \cdot 1.256{,}27} = 0{,}272m = 272mm \rightarrow I = 272 - 160 = 112mm$$

Problema 2

En un trayecto de 4 Km de longitud entre dos estaciones A y B, existen dos curvas cuyas características son las siguientes:

Curva	Radio	Peralte	Desarrollo
Curva I	850 m	10 cm	900 m
Curva II	1200 m	5 cm	800 m

El resto del trayecto es recto.
La aceleración centrifuga sin compensar admitida es 0,65 m/s^2, la distancia entre ejes de carriles es 1,74m, y la velocidad de recorrido es de 120 Km/h.

Calcular:

1. La velocidad máxima de circulación por las curvas.
2. El tiempo de recorrido T_r del trayecto para un tren que viaje a la velocidad de recorrido anteriormente indicada.

Si aumenta el peralte en la Curva I a 15 cm y en la Curva II a 10 cm.

3. ¿Cual seria el tiempo de recorrido para un tren que circule a una velocidad de recorrido de 160 Km/h?

Solución:

1. A partir de:

$$\alpha_{sc} = \frac{V^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a} \rightarrow V = \sqrt{R \cdot \left(\alpha_{sc} + g \cdot \frac{z_p}{a}\right)}$$

Para la Curva I:

$$V = \sqrt{850 \cdot \left(0{,}65 + 9{,}8 \cdot \frac{0{,}1}{1{,}74}\right)} = 32{,}11 m/s = 115{,}6 Km/h$$

Para la Curva II:

$$V = \sqrt{1.200 \cdot \left(0{,}65 + 9{,}8 \cdot \frac{0{,}05}{1{,}74}\right)} = 33{,}43 m/s = 120{,}36 Km/h$$

2. El tiempo de recorrido T_r se calcula sumando los tiempos de recorrido de cada tramo T_{ri}:

$T_r = T_{r1} + T_{r2} + T_{r3}$

$$T_r = \frac{900}{32{,}11} + \frac{2.300}{33{,}33} + \frac{800}{33{,}33} = 121 s$$

3. Se vuelve a aplicar la formulación anterior.

Para la Curva I:

$$V = \sqrt{850 \cdot \left(0,65 + 9,8 \cdot \frac{0,15}{1,74}\right)} = 35,64 m/s = 128,32 Km/h$$

Para la Curva II:

$$V = \sqrt{1.200 \cdot \left(0,65 + 9,8 \cdot \frac{0,1}{1,74}\right)} = 38,15 m/s = 137,36 Km/h$$

El tiempo de recorrido T_r se calcula nuevamente sumando los tiempos de recorrido de cada tramo T_{ri}:

$T_r = T_{r1} + T_{r2} + T_{r3}$

$$T_r = \frac{900}{35,64} + \frac{2.300}{44,44} + \frac{800}{38,15} = 97,97 s$$

Problema 3

En un tramo de vía de ancho ibérico (G=1668mm y a=1740mm), existe una alineación recta unida a una curva circular de 500m de radio. La aceleración centrifuga sin compensar a la que está sometido un tren que circula a 72 Km/h por la curva circular es de 1,6 cm/s^2.

Calcule:

1. La velocidad máxima de circulación V por la curva circular, sabiendo que la aceleración centrifuga sin compensar que se admite es de 0,466 m/s^2.
2. El exceso de peralte medio en mm existente en la citada curva para un tren que circula a una velocidad de 0,4 V.

Solución:

1. Considerando que:

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

Se deduce que:

$$z_p = \frac{a}{g} \cdot \left(\frac{V^2}{R} - \alpha_{sc} \right) = \frac{1{,}74}{9{,}8} \cdot \left(\frac{20^2}{500} - 0{,}016 \right) = 0{,}1392m = 139{,}2mm$$

La velocidad máxima se calculará usando la siguiente formula:

$$V = \sqrt{R \cdot \left(\alpha_{sc} + g \cdot \frac{z_p}{a} \right)} = \sqrt{500 \cdot \left(0{,}466 + 9{,}8 \cdot \frac{0{,}139}{1{,}74} \right)} = 25m/s = 90Km/h$$

2. La velocidad a la que circulará es:

V' = 0,4 * V = 0,4 * 90 = 36 Km/h = 10 m/s

Si la aceleración centrifuga fuera nula:

$$z_{p,max} = \frac{a \cdot V_{max}^2}{g \cdot R} = \frac{1{,}74}{9{,}8} \cdot \left(\frac{10^2}{500} \right) = 35{,}5mm$$

El exceso de peralte será:

$$E = z_p - z_{p,max} = 139{,}2 - 35{,}5 = 103{,}7mm$$

Problema 4

En un trayecto de 6.527 m de longitud en una linea de ancho ibérico (G=1668mm y a=1740mm) existe una curva de 450 m de radio, con un peralte de 110 mm y un desarrollo de 980 m. La velocidad de circulación es de 160 Km/h y la aceleración centrifuga sin compensar máxima admitida es de 1,2 m/s^2.

1. ¿Que reducción de velocidad hay que poner en la curva?

2. ¿Que tardará un tren en recorrer todo el trayecto?

Si se aumenta el peralte hasta 160 mm,

3. ¿Cual será la nueva reducción de velocidad en la curva?
4. ¿Y el nuevo tiempo de recorrido del trayecto?

Solución:

1. Para hallar la reducción de velocidad en la curva aplicaremos la siguiente formula:

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

$$1{,}2 = \frac{V^2}{450} - \frac{9{,}8 \cdot 0{,}110}{1{,}74}$$

V = 28,61 m/s = 103,01 Km/h

Habrá que reducir la velocidad a 100 Km/h.

2. El tiempo será la suma del tiempo que tarda en recorrer el tramo recto a 160 Km/h mas el tiempo que tarda en recorrer la curva a 100 Km/h:

$T_r = T_{r1} + T_{r2}$

$$T_r = 3{,}6 \cdot \frac{(6.527 - 980)}{160} + 3{,}6 \cdot \frac{980}{100} = 160{,}09s$$

3. Aumentando el peralte a 160 mm se calcula igual que en el caso 1.

$$1{,}2 = \frac{V^2}{450} - \frac{9{,}8 \cdot 0{,}160}{1{,}74}$$

V = 30,75 m/s = 110,70 Km/h

4. Igual que en el apartado 2:

$T_r = T_{r1} + T_{r2}$

$$T_r = 3{,}6 \cdot \frac{(6.527 - 980)}{160} + 3{,}6 \cdot \frac{980}{110} = 156{,}88s$$

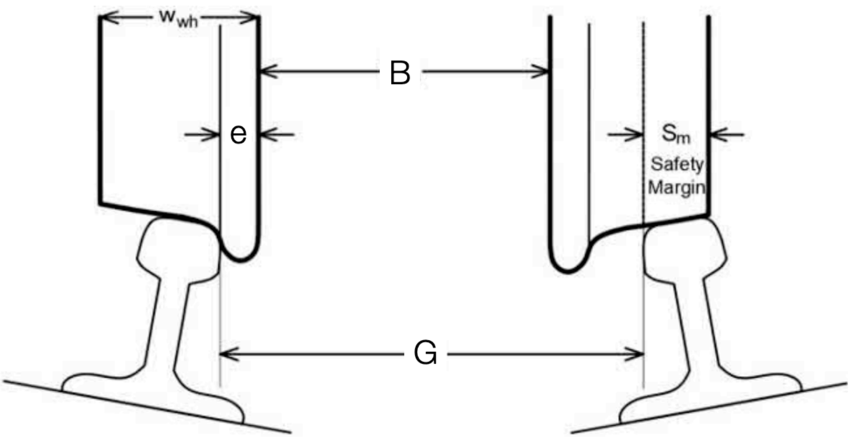
Capítulo 3. Mecánica de la vía

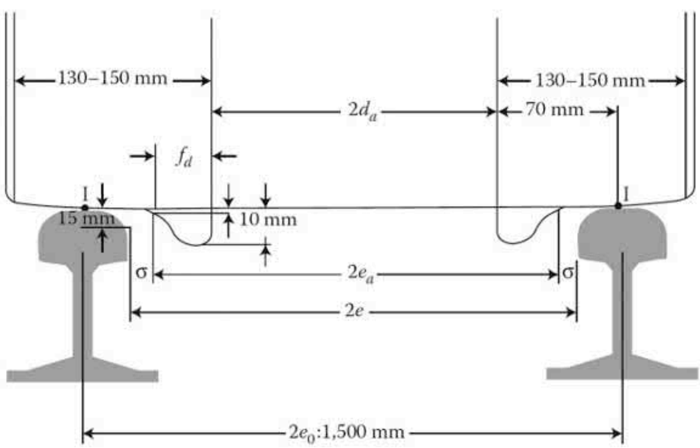
Problema 1

Un eje ferroviario se desplaza con velocidad constante V por un segmento recto de una vía. Se supone que las ruedas son de forma cónica con inclinaciones curvas de radio constante R, mientras que las cabezas de los carriles son esféricas (R').

Se dan los siguientes datos:
G = 1.435 mm
e = 30 mm
B = 1.360 mm
Radio del circulo de rodadura de la rueda en la posición central de equilibrio r_o = 0,45 m

Ángulo entre el plano tangente y la horizontal de la rueda en posición central $\gamma_o = 0{,}025$
Radio de curvatura de la superficie de rodadura de la cabeza de carril $R' = 0{,}30$ m
Radio de curvatura de la banda de rodadura de la rueda $R = 0{,}36$ m
Q_o: Carga estática de la rueda = 7,03 t





2e:	Track gauge	=1,432–1,470 (mm) +0
$2e_a$:	Outer flange edge-to-edge distance (flange gauge)	=1,426 (mm) −16 +3
$2d_a$:	Back-to-back wheel distance (inside gauge)	=1,360 (mm) −3
$2e_o$:	Theoretical distance between the running surfaces of the right and the left wheel when centred	≈1,500 (mm)
f_d:	Flange thickness	= 33–25 (mm) (wear limit = 25 mm)
σ:	Flange way clearance	$= (2e - 2e_a)/2$ (mm)
2σ:	Total flange way clearance	$= 2e - 2e_a$ (mm)

Se le pide que calcule:

a) La conicidad equivalente γe de las ruedas.
b) El juego J (en mm) en el caso de un juego de ruedas centrado en la vía.
c) La fuerza gravitatoria S_p en caso de contacto entre la pestaña de la rueda y el carril (en t).
d) La fuerza gravitatoria Sp cuando:
    - Las ruedas tienen un perfil cónico (sección transversal triangular).
    - Las ruedas son cilíndricas (sección transversal ortogonal).

Solución:

a.
b. J = G - (B + 2e) = 1 ,435 - (1, 360 + 0,060) = 15 mm ⇒ J/2 = 7,5 mm
c. $S_p = 2Q_o \cdot \frac{1}{(R - R')} \cdot y = = 2 \cdot 7{,}03 \cdot \frac{1}{(360 - 300)} \cdot 7{,}5 = 1{,}757t$
d. Para calcular la fuerza gravitatoria S_p:

d1. En el caso de ruedas cónicas, la fuerza gravitatoria total es nula:

$R = \infty \Rightarrow \gamma_e = \gamma_o \Rightarrow \gamma_1 = -\gamma_2$
$S_p = S_{p1} + S_{p2} = Q_o (\gamma_1 + \gamma_2) = 0$

Siendo:

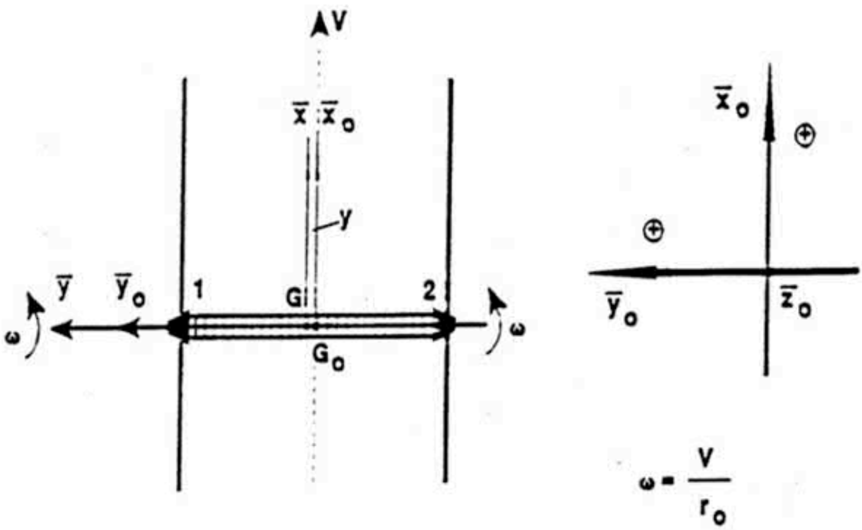
$$S_{p1} = Q_1 \cdot \tan \gamma_1 = Q_1 \cdot \gamma_1$$
$$S_{p2} = Q_2 \cdot \tan \gamma_2 = Q_2 \cdot \gamma_2$$

d2. Lo mismo se aplica en caso de ruedas cilíndricas:

$R = \infty$, $\gamma_o = 0 \Rightarrow -\gamma_e = 0 \Rightarrow \gamma_1 = \gamma_2 = 0$
$S_{p1} = S_{p2} = 0 \Rightarrow S_p = 0$

Problema 2

En la figura, se da un posicionamiento aleatorio del citado juego de ruedas en la vía recta.



Se pide evaluar/proporcionar:

Los valores/expresiones analíticas de todas las fuerzas laterales aplicadas que actúan para este caso concreto.

Se dan los siguientes datos:
Desplazamiento lateral del eje de ruedas: y = 8 mm = 0,008 m
Coeficiente longitudinal de Kalker: C_{11} = 16,85 × 10^6 N = 1685 t

se desprecia la influencia del giro (ángulo de ataque $\alpha' = 0$, $\alpha = 0$, X'=0, $c_{23} = 0$, $c_{33} = 0$).

Solución:

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

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

X_1 = + 4,49 t (Fuerza de rozamiento longitudinal - rueda 1) X_2 = -4. 49 t (Fuerza de rozamiento longitudinal - rueda 2)

$T_1 = T_2 = -c_{22} \cdot \left(\frac{y'}{V} \right)$ (Fuerzas de rozamiento lateral - ambas ruedas)

$$S_p = S_{p1} + S_{p2} = 2Q_o \cdot \frac{\gamma_e \cdot y}{R \cdot \gamma_o} = 2 \cdot 7{,}03 \cdot \frac{0{,}15 \cdot 0{,}008}{0{,}36 \cdot 0{,}025} = 1{,}87t$$

(Fuerza gravitatoria)

Problema 3

Un tren entra en el ramal divergente de un desvío, concretamente, en la parte curva del desvío (zona de agujas) con una velocidad de circulación de V = 140 km/h. La vía está equipada con traviesas de hormigón y totalmente estabilizada.
Se dan los siguientes datos:

Ancho de vía normal: a = 1.500 mm.
Desvío recto.
Radio de curvatura del desvío: R = 500 m.
Carga por eje: Q = 17 t.
Reparto uniforme de la carga por eje entre las ruedas: $Q_1 = Q_2 = Q/2$ = 8,5 t
Aceleración de la gravedad: g = 10 m/seg^2.
Distancia del centro de gravedad del vehículo a la superficie de rodadura de los carriles: h_{KB} = 1.600 mm.
Velocidad del viento lateral: V_w = 0.

Se le pide:

1. Calcular (en km/h) la velocidad máxima de circulación permitida a lo largo del segmento curvo del desvío teniendo en cuenta que el

Reglamento de Vías vigente impone una aceleración residual centrífuga máxima permitida de $\alpha_{sc,max}$= 0,7 m/seg^2.

2. Realizar, para una velocidad de 140 km/h, las comprobaciones de descarrilamiento oportunas.
3. Calcular, para una velocidad de 140 km/h, la fuerza centrífuga que se impone al vehículo.

Solución

1. Sustituyendo los valores dados en la ecuación usando las unidades de medidas apropiadas:

$$\alpha_{sc,max} = \frac{V_{max}^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a} \rightarrow 0{,}7 = \frac{V_{max}^2}{500} - \frac{10 \cdot 0}{1{,}500} \rightarrow$$

$$V_{max} = \sqrt{500 \cdot 0{,}7} = 18{,}71 m/s \rightarrow 67{,}34 Km/h$$

Comprobaciones de descarrilamiento

2. Descarrilamiento por vuelco del vehículo

a) Cálculos analíticos

A partir de la ecuación:

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

Siendo:
R = 500 m,
g = 10 m/seg^2,
a = 1,5 m,
h_{KB} = 1.600 mm,

$$V_{der,ov} > \sqrt{\frac{R \cdot g \cdot a}{2 \cdot h_{KB}}} = \sqrt{\frac{500 \cdot 10 \cdot 1.500}{2 \cdot 1.600}} = 48{,}41 m/s$$

$$= 48{,}41 \cdot 3{,}6 = 174{,}28 Km/h$$

Siendo $V_{der,ov} = 174{,}28 Km/h > 140 Km/h$, no se debería producir descarrilamiento por vuelco.

b) Cálculo utilizando la ecuación empírica

A partir de la ecuación:

$$V_{der,ov} > \sqrt{R \cdot \frac{g}{3}}$$

Siendo:
R = 500 m
g = 10 m/seg^2

$$V_{der,ov} > \sqrt{R \cdot \frac{g}{3}} = \sqrt{500 \cdot \frac{10}{3}} = 40{,}83 m/s$$

$$= 40{,}83 \cdot 3{,}6 = 146{,}97 Km/h$$

Por tanto, no se debería producir descarrilamiento por vuelco ya que V = 140 km/h < $V_{der.ov}$ = 146,97 km/h.

El hecho de que la distancia del centro de gravedad de este vehículo concreto respecto a la superficie de rodadura sea significativamente inferior a 2,25 m (caso más favorable para evitar el vuelco del vehículo) también nos permite concluir que no se producirá descarrilamiento por vuelco.

Descarrilamiento por desplazamiento de la vía

A partir de la ecuación:

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

para:
V = 140 km/h

R = 500 m,

se deduce que:

$$I = \frac{V^2}{(0{,}29)^2 \cdot R} = \frac{140^2}{(0{,}29)^2 \cdot 500} = 466{,}11mm$$

Por lo tanto, siendo:
I = 466,11 mm,
Q = 17 t y
V = 140 km/h

en la ecuación : $H = a_i \cdot \left(\frac{Q \cdot I}{a}\right) + \left(\frac{Q \cdot V}{1.000}\right)$

$$H = 1 \cdot \left(\frac{17 \cdot 466{,}11}{1.500}\right) + \left(\frac{17 \cdot 140}{1.000}\right) = 7{,}66t$$

se deduce que: H=7,66t

Aplicando la ecuación:

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

$$H_R = 0{,}6 \cdot 17 + 3{,}6 = 13{,}8t$$

Se cumple que: $H < H_R$

Por lo tanto, no se debería producir descarrilamiento por desplazamiento lateral de la vía.

Utilizando otro enfoque, a partir de la Ecuación:

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

R = 500 m
Q = 17 t

se deriva que:

$$\left(11{,}8 \cdot \frac{17}{500}\right) \cdot V_{der,dis}^2 + 1{,}5 \cdot 17 \cdot V_{der,dis} - 17 \cdot 900 - 5400 = 0$$

$$\rightarrow (0{,}4012) \cdot V_{der,dis}^2 + 25{,}5 \cdot V_{der,dis} - 20.700 = 0$$

$$V_{der,dis1} = 197{,}57849$$

$V_{der,dis2} = -261{,}13781$ se descarta por ser negativa

Siendo:

V = 140 km/h < $V_{der,dis}$ = 197,58 km/h

Por lo tanto, no se debería producir descarrilamiento por desplazamiento lateral de la vía.

Descarrilamiento por remonte de la pestaña

a) Criterios empíricos/experimentales

A partir de la Ecuación

$$V_{der,wcl} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{4}}$$

R = 500 m
g = 10 m/seg^2

se deduce que:

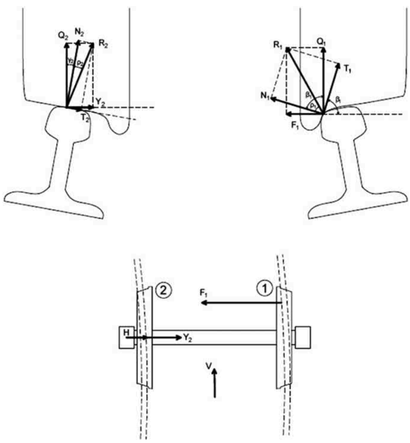
$$V_{der,wcl} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{4}} = \sqrt{\frac{500 \cdot 10}{4}} = 35{,}36 m/s$$

$$35{,}36 m/s \rightarrow 127{,}28 Km/h$$

V = 140 km/h > $V_{der.wcl}$= 127,27 km/h

Por tanto, se podrá producir descarrilamiento por remonte de la pestaña.

b) Criterio Empirico



a partir de la Ecuación: $F_1 = H + Y_2$

Siendo:
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).

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

Siendo:
Q_2: Carga vertical estática de la rueda 2.
γ_2: Ángulo entre la superficie de rodadura de la rueda 2 y el plano horizontal (ángulo de contacto rueda-carril).
ρ_2: Ángulo de rozamiento rueda-carril de la rueda 2.

Considerando que:
Q_2 = Q/2 = 8,5 t
R = 500 m

$$\tan(\gamma_2 + \rho_2) = \frac{135}{(150 + R)}$$

H = 7,66 t

se deduce que:

F_1 = 9,43 t

$$\frac{F_1}{Q_1} = \frac{9{,}43}{8{,}5} = 1{,}11 > 0{,}8$$

Por lo tanto, se podrá producir un descarrilamiento debido al remonte de la pestaña.

3. Cálculo de la fuerza centrífuga

Considerando la ecuación:

$$F_{c,sc} = \frac{Q}{g} \cdot \left[\frac{V_{max}^2}{R} - \frac{g \cdot z_p}{a}\right] = \frac{Q}{g} \cdot \alpha_{sc,max}$$

Siendo:
R = 500 m
g = 10 m/seg^2
Q = 17 t
z_p = 0

Debemos volver a calcular $\alpha_{sc,max}$ para V =140 Km/h.

$$F_{c,sc} = \frac{17}{10} \cdot \left[\frac{(140/3{,}6)^2}{500} - 0\right] = 5{,}14t$$

$F_{c,sc}$ = 5,14 t > Q/4 = 4,25 t.

Basándose en lo anterior, se puede calcular que la velocidad a la que descarrilaría el tren se obtiene usando:

$$V_{der,wcl} = \sqrt{R \cdot g \cdot \left(\frac{z_p}{a} + \frac{1}{4}\right)} = 3{,}6 \cdot \sqrt{500 \cdot 10 \cdot \left(\frac{1}{4}\right)} = 127{,}27 Km/h$$

Si se considera que la vía está totalmente desestabilizada, puede aplicarse el límite de Prud'homme:

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

En ese caso:

$$H = 7{,}66t > H_r = (0{,}85) \cdot \left(1 + \frac{Q}{3}\right) = 5{,}66t$$

Por tanto, el descarrilamiento debido al desplazamiento de la vía se produce antes del descarrilamiento por remonte de la pestaña siendo la fuerza lateral superior a la resistencia lateral de la vía.

Bibliografia

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.