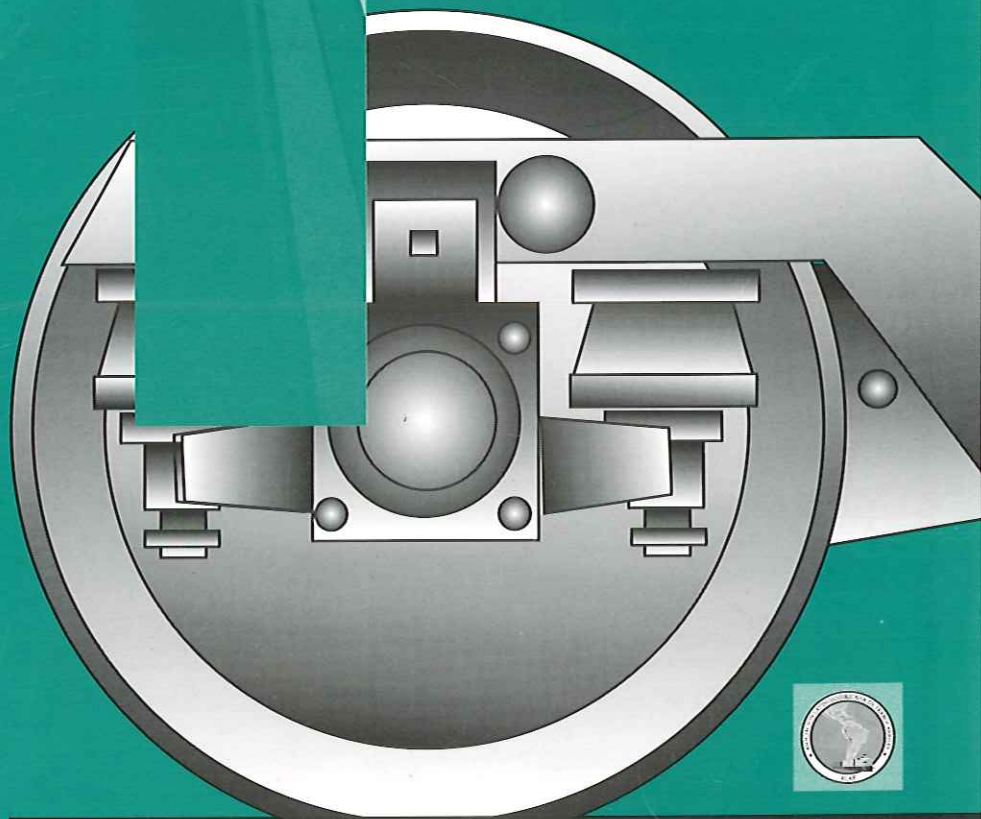


ALAF

TEMAS

DE DIVULGACION FERROVIARIA

2



ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE FERROCARRILES
ASSOCIAÇÃO LATINOAMERICANA DE ESTRADAS DE FERRO



ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS

Dirección de Relaciones Internacionales

Publicación reimpressa con el aporte de ADIF,
Administrador de Infraestructuras Ferroviarias,
noviembre de 2006

ALAF

Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles
Associação Latinoamericana de Estradas de Ferro

Av. Belgrano 863, 1er. piso,
(C1092AAI) Buenos Aires, Argentina
Tel-Fax (54-11) 4342-7271 o 4345-4006

E-Mail alaf@alaf.int.ar

Web: www.alaf.int.ar

DIVERSAS CONSIDERACIONES SOBRE LA ESTABILIDAD LATERAL DE LA VÍA

José Julián Mendoza Fernández

Relaciones teóricas de los diferentes elementos que intervienen en la circulación de un vehículo ferroviario sobre un trazado

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidad
a_q	Aceleración transversal no compensada (cuasiestática) en el plano de la vía	m/s^2 *
a_i	Aceleración transversal cuasiestática en el interior de la caja o en la caja del vehículo	m/s^2
D	Peralte	mm
D_{lim}	Peralte límite	mm
E	Exceso de peralte	mm *
e	Distancia entre ejes de rodadura de las dos ruedas de un eje en mm (aproximadamente 1.500 mm y 1.065 mm para anchos de vía estándar y métrico, respectivamente)	mm
I	Insuficiencia de peralte	mm
R	Radio de la curva	m
S	Coefficiente de flexibilidad de la suspensión, de acuerdo con la ficha 505-5 OI	-
T	Tiempo	s
V	Velocidad de la línea	km/h *
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidad máxima en curva para los trenes rápidos	km/h
$V_{m\acute{i}n}$	Velocidad de los trenes lentos en curva	km/h

Símbolo	Significado	Unidad
g	Aceleración debida a la gravedad - 9,81	m/s ²
Q_N	Carga nominal de la rueda	N
ΔQ	Variación total de la carga de la rueda	N
P	Peso por eje	
g	Medida de alabeo	
h	Altura del centro de gravedad de un vehículo	
H	Esfuerzo lateral de un eje	
Y	Esfuerzo transversal de una rueda	
b	Distancia entre ejes, pivotes o ejes de giro de los bogies	
B	Distancia entre puntos de apoyo de la suspensión de un eje	
T_m	Toneladas	
λ	Coefficiente de descarrilamiento	
μ	Coefficiente de rozamiento	

(*) Parámetros relacionados con la seguridad.

I. Ripado o deformación de la vía

El esfuerzo de ripado o deformación de la vía H se define como:

$$H = Y_1 + Y_2$$

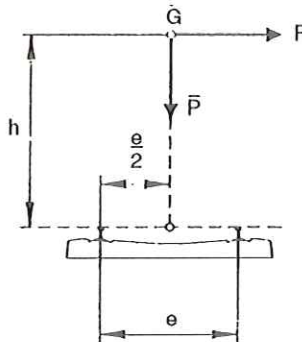
Donde:

Y_1 = Componente del esfuerzo lateral entre la rueda y el carril en la rueda del lado izquierdo.

El esfuerzo lateral es positivo cuando actúa hacia la derecha sobre la rueda.

Y_2 = Componente del esfuerzo lateral entre la rueda y el carril en la rueda del lado derecho.

El esfuerzo lateral es positivo cuando actúa hacia la izquierda sobre la rueda.



Al circular un vehículo a una velocidad constante, por una curva de radio R , sin peraltar, se produce una aceleración centrípeta de valor:

$$a_q = \frac{V^2}{R}$$

Ello da lugar a unas fuerzas centrífugas de inercia, asocia-

das a su masa de valor:

$$M \cdot a_{\eta}$$

Dichas fuerzas de inercia, asociadas a un eje del vehículo o tren, en caso de una vía sin peralte, dan lugar a un esfuerzo horizontal de ripado de valor:

$$\frac{P}{g} \cdot a_{\eta} \quad (P = \text{peso por eje})$$

Según estudios de la SNCF entre los años 30 y 70, se ha demostrado que en las vías usuales para provocar deformaciones inadmisibles por deslizamientos en el contacto traviesa-balasto, los esfuerzos de ripado deben ser del orden de:

$$H_m = 1 + \frac{P}{3} \quad (\text{fórmula de Prud'homme})$$

(P y H_m en toneladas)

O lo que es lo mismo, la resistencia lateral mínima de la vía está acotada inferiormente por dicha expresión.

Siendo:

P la carga estática por eje

H_m media con 2m de variación del esfuerzo de desplazamiento lateral de las vías después de un filtrado de baja frecuencia a 20 Hz

Dicho valor corresponde al obtenido con vehículos automotores de viajeros en vía con carril 46 kg/m, traviesas de madera a 0,65 m y balasto recién bateado de granulometría 25/70, y que se debe aplicar como valor estándar para vehículos automotores, locomotoras y vagones, en vías con traviesas de madera, recién bateadas.

En el cálculo de una vía sobre traviesas de hormigón (monobloque o bibloque) recién bateada mecánicamente, se aplicará:

$$H_m = 1,5 + \frac{P}{3}$$

La expresión inicial ha sido generalizada por posteriores ensayos en otras compañías ferroviarias, como la SNCF, DB y NS, en la forma

$$H_m = \alpha \left(1 + \frac{P}{3}\right)$$

$\alpha \cong 0,8$ a $0,9$ para traviesas de madera

$\alpha \cong 1,5$ para traviesas de hormigón bloque

Siempre referidos a vías recién bateadas, esto es con la menor resistencia lateral.

Nota: Dichos valores, correspondientes al paso de los vehículos, son independientes de los límites resistentes recomendables para el conjunto sujeción-traviesa, que dependen de su estado de conservación. Así, el documento UIC sobre vía métrica indica para éstos:

Los límites de los esfuerzos laterales recomendables para carriles clavados sobre traviesas de madera son los siguientes:

Sin placa de asiento:

$$H_1 = 1,8 + 0,3 \cdot Q_N$$

$$H_2 = 1,2 + 0,3 \cdot Q_N$$

Con placa de asiento:

$$H_1 = 2,9 + 0,3 \cdot Q_N$$

$$H_2 = 1,9 + 0,3 \cdot Q_N$$

Dónde H_1 y H_2 son los valores que no deben sobrepasarse y los valores recomendados, respectivamente.

,Los valores de H_2 son los recomendados, ya que conllevan intervenciones de vía más aceptables. La reducción de los valores H_2 se obtiene tanto por la mejora de las cualidades del vehículo, como por la mejora de los estándares de vía, concretamente los del alabeo.

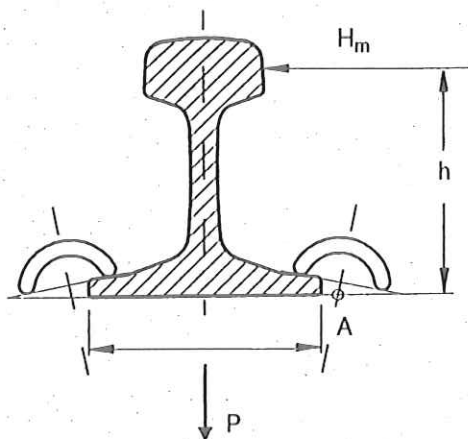
La capacidad de carga lateral del carril, cuando se utilizan sujeciones elásticas convencionales, es de 6 Tm (valor considerado en Japón como el máximo alcanzable para el empuje de las circulaciones, en líneas A1, en el plano de la vía).

Por otra parte, para los esfuerzos de torsión o vuelco del carril por arrancamiento de las sujeciones, para la vía clavada sobre traviesas de madera, fija los siguientes límites:

$$\text{Sin placas de asiento: } H = 2,09 + 0,28 Q_N$$

$$\text{Con placas de asiento: } H = 1,73 + 0,51 Q_N$$

Dicho esfuerzo corresponde a un momento arrancador (en el punto A), suponiendo la traviesa inmóvil, anclada sobre el balasto:



$$M_a \approx H_m \cdot h$$

El cual no debe ser:

$$M_a \leq \frac{P}{2} \cdot \frac{b}{2} + N \cdot R \cdot b$$

b = ancho del patín

N = número de sujeciones sobre las que actúa la rueda

R = resistencia unitaria al arranque de la sujeción

Ejemplo: Si consideramos la circulación de un vehículo de 12 toneladas por eje circulando sobre una curva de radio 180 m a 100 km/h tendremos:

$$a_g = \frac{V^2}{R} = \frac{100^2}{3,6^2 \cdot 180} = 4,3 m/s^2$$

$$\frac{P}{g} \cdot a_g = \frac{4,3}{9,81} \cdot 12 = 5,7 Tn$$

$$1 + \frac{P}{3} = 5 Tn < 5,7 Tn$$

En conclusión, si circulamos a esa velocidad, estaríamos en una situación de posible ripado.

La seguridad frente a la deformación o ripado de la vía, se obtiene comparando los esfuerzos laterales ejercidos por los distintos ejes con la resistencia lateral de la vía.

Dicha resistencia lateral de la vía H puede definirse como la fuerza lateral máxima que puede soportar sin producir deformaciones permanentes, y que, según estudios de la SNCF puede presentarse mediante la expresión

$$H = (a + P) \left[b + c \cdot \log \left(1 + \frac{T}{1000} \right) \right]$$

P = Peso del tren en toneladas

T = Toneladas acumuladas que han circulado desde la última nivelación de la vía

a, b, c = Coeficientes característicos del armamento de la vía y del método de nivelación empleado.

	a	b	c
Vía antigua sobre traviesas de madera	4	0,28	0,06
Vía nueva sobre traviesas de madera	4	0,23	0,07
Vía antigua sobre traviesas de hormigón	6	0,27	0,06
Vía nueva sobre traviesas de hormigón	6	0,23	0,07

Como se puede observar, alcanza su valor mínimo, H_m inmediatamente después de una nivelación ($T=0$), obteniéndose en ese instante:

$$H_m = a \cdot b + b \cdot P$$

Veamos que dicha condición no es determinante.

El eje del vehículo se encuentra en equilibrio en su plano paralelo al de la vía, bajo la acción de las siguientes fuerzas:

- Fuerza lateral de inercia del eje: my''
- Fuerza entre eje y caja de grasa : H_y
- Esfuerzos horizontales ejercidos sobre las ruedas: $Y_1 Y_2$

H_y : fuerza horizontal entre eje y cajas de grasa

my : fuerza lateral de inercia del eje

mg : peso del eje

N_1 y N_2 : fuerzas normales a la superficie de contacto

T_1 y T_2 : fuerzas tangenciales a la superficie de contacto

R_1 y R_2 : fuerzas resultantes

H : esfuerzo lateral de ripado de la vía

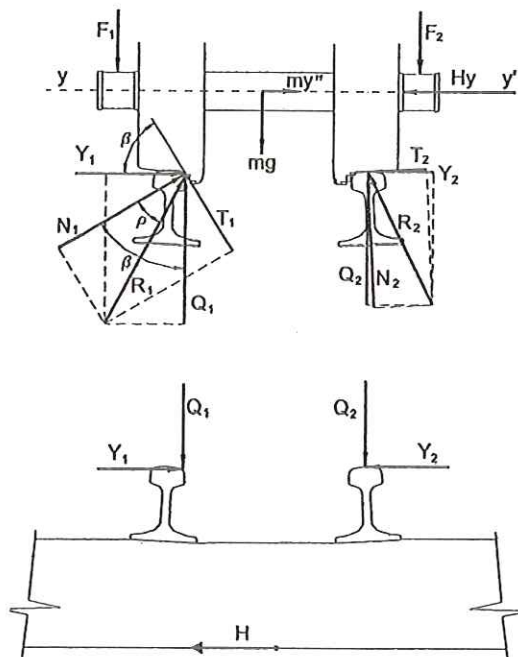
$Y_1 Y_2$ y Q_1, Q_2 : componentes laterales y verticales de las fuerzas resultantes R_1 y R_2 .

β : ángulo de pestaña.

ρ : ángulo de rozamiento $\operatorname{tg} \rho = \mu$

Que proyectando sobre el eje yy' , resulta:

$$H_y - my'' - Y_1 - Y_2 = 0$$



Esto es:

$$H = Y_1 + Y_2 = H_y - my''$$

Expresión que indica que la fuerza lateral H (la que tiende a ripar la vía) puede obtenerse por la suma de las fuerzas laterales de la rueda del eje, o por la suma de la fuerza lateral H_y en mangueta y la fuerza de inercia del eje.

Los esfuerzos laterales al plano de la vía no deben superar su resistencia mínima para el peor de los casos y situación (vía sobre traviesas de madera, recién tratada por trabajos de nivelación y alineación) dada por la fórmula de Prud'homme ya comentada anteriormente, a saber:

$$H_m = 1 + \frac{P}{3} \quad (P, H_m = \text{toneladas})$$

P = peso por eje del tren

La seguridad frente a la deformación de la vía se obtiene

comparando los esfuerzos transversales ejercidos por los ejes con la resistencia lateral de la vía

Esta resistencia:

- Sólo se incrementa en un pequeño porcentaje con el aumento del peso del carril.
- Las vías montadas con traviesas metálicas y de hormigón tienen, generalmente, una mayor resistencia que las montadas con traviesas de madera (aumento de su peso).
- La fuerza del apriete de la sujeción ejercida por un sistema elástico no tiene ninguna influencia sobre este valor. Así, si se usan sujeciones tipo K, sólo se incrementa un 6 % el valor resistente del cociente H_m/P .
- El balasto de grava natural disminuye el valor de H_m en un 15 %, cuando se compara con el límite obtenido con otro procedente de machaqueo. El refuerzo de los hombros de banqueta sólo incrementa el límite de H_m en un pequeño porcentaje.
- Entre 10 y 200 km/h no hay influencia significativa del valor de V frente al límite de H_m .
- La consolidación de la vía después del bateo, como veremos posteriormente, afecta en gran medida al límite de H_m .
- La compresión del carril tiene un impacto muy limitado sobre la resistencia de la vía a las fuerzas laterales, pero los defectos originados por fuerzas anormales tienden a amplificarse más rápidamente cuando una vía tiene que soportar esfuerzos de compresión.
- Para un bogie con distancia entre ruedas $2a$, el esfuerzo lateral máximo se incrementa si las dos fuerzas H_1 y H_2 , en ambos ejes tienen niveles diferentes:

$$H_m = \alpha \left(1 + \frac{P}{3}\right)$$

$$\alpha = -0,386 \cdot \frac{H_1}{H_2} - 0,064 \cdot 2a + 0,064 \cdot 2a \cdot \frac{H_1}{H_2} + 1,386$$

$$H_2 > H_1$$

Como criterio de seguridad para evitar el ripado de la vía y poder explotar el tramo de vía a una velocidad V km/h (circulando a $V+10$ km/h si $V_{\max} \leq 100$ km/h y $1,1$ si $V_{\max} > 100$ km/h) se fija como valor admisible:

- $H_{adm} \leq H_m$ para coches de viajeros y unidades autopropulsadas

- $H_{adm} \leq 0,85 H_m$ para vehículos de carga que permitan tolerancias de diseño más amplias y mantengan en el tiempo sus condiciones de mantenimiento

Esta afirmación es válida siempre que se verifique que la sobrecarga vertical media en 2 metros \bar{P}_{2m} no sea inferior al 80 % del peso estático del eje (P), o sea:

$$\bar{P}_{2m} > 0,8 P$$

En caso de que un vehículo presente un mal comportamiento de su marcha vertical (variación de la carga axial oscilatoria), que puede caracterizarse por una desviación estándar debida a la aceleración vertical $\geq 2,5$ m/s², o bien por una desviación estándar de la carga axial > 20 % de la carga axial estática, se debe aplicar un coeficiente reductor de 0,9, quedando entonces:

$$H_m = 0,9 \cdot \alpha \cdot \left(1 + \frac{P}{3}\right)$$

Como los esfuerzos con un tiempo de aplicación muy corto no tienen influencia en el ripado de la vía, mediante filtrado de las oscilaciones se eliminan los de frecuencia superior a 20 Hz.

Si bien los ensayos que hicieron posible dicha formulación

se realizaron en vías de ancho estándar ($e = 1500$ mm) su extrapolación a otro ancho de vía puede considerarse válida, ya que no puede introducir errores superiores a los propios de los trabajos que condujeron a la misma, máxime si tenemos en cuenta, según indica Prud'homme (*La résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant R.G.C.F.*, enero 1967), que la resistencia procede, fundamentalmente, de las reacciones tangenciales en el contacto traviesa-balasto, máximas en las zonas de apoyo de los carriles, que es donde también son máximas las tensiones normales que, multiplicadas por el coeficiente de rozamiento, dan origen a las tensiones tangenciales.

A partir de las medidas de dichos ensayos en vía, se estableció la fórmula empírica siguiente, que expresa la evolución de H_m en función del tonelaje T soportado (Alias *J. Le rail*), recogida en la prENV 13803-1:

$$H_m = P \cdot a \left(1 - b e^{-\frac{T}{T_0}}\right)$$

a : valor asintótico del cociente H_m/P para una vía totalmente consolidada

$$(0,35 < a < 0,6)$$

$a(1 - b)$: valor de una vía recientemente bateada ($\cong 0,5 a$)

T_0 : constante de tráfico ($50.000 < T_0 < 100.000 T_m$)

T : tonelaje acumulado

Además, se cumple, como media, para una vía completamente estabilizada:

$$H = 25 + 0,6 \cdot P$$

Los trabajos realizados permitieron igualmente establecer la siguiente fórmula:

$$H = a(P + b) \left(1 - c \cdot e^{-\frac{T}{T_0}}\right)$$

a = coeficiente que depende de la inercia del carril (JANIN 1978)

a \cong 0,5 para carril 45-46 Kg/ml

a \cong 0,6 para carril UIC-60

b = coeficiente dependiente del tipo de traviesa (JANIN 1978)

b = 40 para traviesas de madera

b = 60 para traviesas de hormigón

c = coeficiente que varía con el procedimiento de mantenimiento

c \cong 0,40 por bateo

c \cong 0,50 en vía nueva

Donde T_0 es una constante de tráfico, correspondiente al período de estabilización de la vía y por tanto característica de la velocidad de consolidación de la vía después de haberla bateado mecánicamente, que se puede compensar parcialmente mediante compactado de balasto y totalmente mediante estabilización dinámica.

Los movimientos transversales son muy complejos, ya que a las oscilaciones de las masas suspendidas y no suspendidas provocadas por las reacciones de los vehículos a los defectos geométricos de la vía (fundamentalmente a los de su nivelación transversal y a los de alineación), se superpone el movimiento de lazo, esto es, la inestabilidad de los bogies (oscilación provocada y limitada por el juego de la vía), que es influido a su vez por las irregularidades de la propia vía y por las características mecánicas de los vehículos que circulan, en especial en las correspondientes a los bogies (puede admitirse, en algunos casos la inestabilidad de un bogie ligero, pero es totalmente inadmisibles en los más pesados, correspondientes a los bogies motores).

Por otra parte la coincidencia de frecuencias del movimiento de lazo de la caja del vehículo y del bogie (que

crece con la velocidad), provoca por resonancia esfuerzos muy fuertes.

El conocimiento de los movimientos transversales es muy importante para poder evaluar tanto los esfuerzos transversales ejercidos sobre la vía y que afectan sobre la seguridad, como las aceleraciones transversales de caja y bogie, y que son mayores cuanto mayores sean el juego de la vía, el peso y el radio de giro del bogie.

Si bien los esfuerzos transversales son menores que los verticales, también la resistencia lateral de la vía es mucho menor que la vertical, pudiendo existir peligro de deformación de vía, razón por la que deben considerarse, al estudiar la estabilidad de vía, con mayor detalle los mismos.

Según indica Alias J., en *Le rail*:

“El análisis teórico de la influencia de las irregularidades geométricas del trazado en la estabilidad de los vehículos ha sido abordado en la tesis de Stassen, en la Universidad de Delft. Las conclusiones de la tesis son las siguientes:

- Para una misma vía, el aumento de los defectos de trazado supone la disminución de la velocidad crítica.
- Para una misma vía, el aumento de los defectos de trazado supone una disminución de la longitud de onda del movimiento de lazo y de la amortiguación de estas oscilaciones.

En ambos casos se produce un aumento de los esfuerzos sobre la vía, resultando, en general, más fácil y económico mejorar las características de los bogies que los de la vía”. Si bien el estudio teórico es muy complejo, de los ensayos realizados se ha podido establecer un modelo empírico, que acota superiormente los esfuerzos transversales que producen sobre la vía los vehículos modernos, circulando a velocidades de hasta 250 Km/h sobre las vías modernas. En dicho modelo empírico para las circulaciones en curva,

dichas fuerzas dinámicas de ripado asociadas a un eje del tren, son debidas a:

- Una parte cuasiestática producida por la aceleración sin compensar; a_q , positiva o negativa, según exista insuficiencia o exceso de peralte, y el peso por eje (su valor a veces se multiplica por 1,2 para tener en cuenta el posible desigual reparto de las cargas en los distintos ejes).
- Una parte aleatoria, que depende de las características del vehículo, de las características mecánicas de la vía, así como de las aceleraciones de tipo aleatorio que se derivan de perturbaciones diversas, tales como las irregularidades geométricas de los materiales constitutivos, o de la propia vía, movimientos ocasionados por la elasticidad de las conexiones rueda-bogie, bogie-caja, etc etc.

Las primeras tienen la expresión:

$$Y_{est} = M \cdot a_q = \frac{P}{g} \cdot \frac{g}{e} \cdot I = P \cdot \frac{I}{e} \quad (\text{para insuficiencia de peralte})$$

$$Y_{est} = M \cdot a_q = \frac{P}{g} \cdot \frac{g}{e} \cdot E = P \cdot \frac{E}{e} \quad (\text{para exceso de peralte})$$

Y de las segundas, sólo se conocen algunas fórmulas mayoradas aproximadas.

Una de las más conocidas y aplicadas (ver Prud'homme, A. *La Voie R.G.D.F.*, enero 1970 y Alias J. *Le rail*, Eyrolles, París, 1987) tanto en recta como en curva es:

$$Y_a = \frac{P \cdot V}{1000} \quad (F_a, P = \text{toneladas}; V = \text{km/h})$$

Por lo tanto, se ha de cumplir:

$$Y_{est} + Y_a < H_m$$

O lo que es lo mismo:

$$P \cdot \frac{I}{e} + P \cdot \frac{V}{1000} < 1 + \frac{P}{3}$$

(para una vía sobre traviesas de hormigón recién bateada suele emplearse $1,5 + \frac{P}{3}$)

Esto es:

$$I < I_{m\acute{a}x} = e \left(\frac{1}{P} + \frac{1}{3} - \frac{V}{1000} \right)$$

Que para el caso más desfavorable de $e=1.065$ mm, $P=14$ Tm y $V=100$ km/h nos da:

$$I < I_{m\acute{a}x} = 0,3 \cdot e = 319 \text{ mm}$$

Esto es una:

$$a_g = \frac{I}{e} g = 0,3 \cdot g = 2,94 \text{ m/s}^2$$

Nota: En ocasiones el valor de e se toma mayor al nominal, para tener en cuenta el sobreecho en las curvas de radio reducido.

2. Descarrilamiento

Se produce por remonte de la rueda sobre el carril.

El estudio teórico simplificado, realizado por Nadal, en el que se analiza el equilibrio de fuerzas que se produce en el contacto rueda-carril en el instante anterior al comienzo del remonte, establece que el descarrilamiento de una rueda se produce cuando el cociente entre los esfuerzos transversal Y y el vertical Q de dicha rueda, alcanza el valor:

$$\frac{Y}{Q} \geq \lambda$$

Este valor de λ depende del ángulo de conicidad de las ruedas y del coeficiente de rozamiento entre carril y pesetaña.

Si bien este modelo es una simplificación de la realidad, al no tener en cuenta diversos factores que influyen en el fenómeno físico, tales como el pseudodeslizamiento, el ángulo de ataque o el carácter no instantáneo del descarrilamiento, y por ello la importancia del tiempo de aplicación de las cargas transversales y verticales, según estudios efectuados por el ORE y recogidos en la Question D-138, se considera que al adoptar el valor de $\lambda=1,2$, en las condiciones de explotación habituales, se está del lado de la seguridad.

Por tanto, siguiendo el criterio de Nadal, debe cumplirse:

$$\frac{Y}{Q} < \lambda$$

Donde

Y = esfuerzo total de ripado

$$Q = \frac{P}{2} = Q_N$$

Ambos muy conservadores, pues algo de esfuerzo lateral absorbe el rozamiento entre rueda-carril interior; así como que la carga sobre la rueda exterior es mayor que la interior:

Así obtenemos, siguiendo el ejemplo anterior

$$\frac{Y}{Q} = \frac{5,7}{6} = 0,95 < \lambda$$

λ corresponde, según ensayos realizados por los ferrocarriles de vía estrecha japoneses, a valores entre 0,97 y

1,33 para ángulos de ataque entre 0°21' y 1°20' y entre 1,15 y 1,65 para ángulos de ataque nulos (Tanahashi, H. *Derailment coefficient and climbing probability of wheel flange*. Q.R., V. 14 N.1, 1973).

Como se puede concluir del análisis de la figura de "equilibrio del eje y de la vía" incluida en el apartado I. Ripado, en la posición de la rueda izquierda exterior en curva, se observa que cuando la resultante R_1 forma con la vertical un ángulo de ataque menor que $(\beta - \rho)$ la rueda se desplazará hacia abajo. Si R_1 forma con la vertical un ángulo ligeramente inferior a $(\beta - \rho)$ tenderá a mantenerse el contacto en la pestaña, impidiéndose que apoye sobre la superficie de rodadura.

El ángulo $(\beta - \rho)$ es pues el límite que asegura una buena marcha de la rueda sobre el carril, sin riesgo alguno de remonte de pestaña, y que tiene como valor:

$$\left(\frac{Y_1}{Q_1}\right)_{lim} = \operatorname{tg}(\beta - \rho) = \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta}$$

Y para un valor de μ (coeficiente de rozamiento) = 0,36, normalmente admitido por el ERRI, (otros valores mínimos admitidos son $\mu = 0,25$ para carril seco y $\mu = 0,12$ para carril mojado) podemos fijar el criterio de seguridad para evitar el remonte de la rueda sobre el carril siguiente:

$$\text{para } \beta = 60^\circ \rightarrow \frac{Y_1}{Q_1} \leq 0,85$$

$$\text{para } \beta = 70^\circ \rightarrow \frac{Y_1}{Q_1} \leq 1,20$$

En el documento UIC sobre vía métrica, se indica, no obstante, que el cociente máximo de descarrilamiento (λ) teóricamente admisible como lo define Nadal es aplica-

ble para ángulos de ataque mayores que $0,5^\circ$ (indicando que β es el ángulo de la cabeza del carril), usándose para ángulos de ataque menores de $0,5^\circ$, el cociente de descarrilamiento de la suma de los ejes, según Weinstock:

$$\left(\frac{Y_1}{Q_i}\right)_{lim} = \frac{\operatorname{tg} \beta (1 + \mu^2)}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta}$$

Así, se permite un mayor coeficiente λ si el eje tiene un ángulo de ataque menor de $0,5^\circ$. Unos ángulos de ataque tan bajos sólo se pueden conseguir en bogies que permitan el posicionamiento radial de sus ejes en las curvas (ejemplos de ello son los bogies autoconducidos, con conducción forzada o activa).

El valor de estos dos coeficientes de descarrilamiento se calcula como una media que puede variar cada 2 m, después de un filtrado de baja frecuencia a 20 Hz.

En realidad el esfuerzo Y ejercido por la rueda guiante (informe ORE B55/RP8) es la suma de cuatro esfuerzos:

- Y_1 , esfuerzo de inscripción, que depende del radio de la curva, de las características del vehículo y de la carga de la rueda contraria.
 - Y_2 , esfuerzo de la componente de la fuerza centrífuga no compensada en el plano de la vía.
 - Y_3 , esfuerzo resultante del par de rotación bogie/caja, únicamente para los vehículos con bogies.
 - Y_4 , esfuerzo resultante de la interacción vehículo/vía.
- Igualmente la carga Q es la suma de cinco esfuerzos:
- Carga nominal Q_N , constante para cada vehículo.
 - La diferencia ΔQ_0 inicial, debida principalmente a la histéresis de los resortes de láminas o de los amortiguadores de fricción seca.
 - La variación ΔQ_1 debida a la insuficiencia o exceso de

peralte.

- La variación ΔQ_2 debida al alabeo de la vía, considerada sobre el empuje del vehículo y que depende igualmente de la rigidez torsional de éste.
- La variación ΔQ_3 resultante de la interacción dinámica vehículo/vía.

Si consideramos bajas velocidades, los esfuerzos dinámicos Y_4 y ΔQ_3 no son significativos, por lo que en el caso de descarga de rueda guiante se deberá cumplir:

$$\frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{Q_N - \Delta Q_0 - \Delta Q_1 - \Delta Q_2} \leq 1,2 \quad (0,8 \leq \mu \leq 1,2)$$

Esta relación se ha establecido en condiciones de circulación a baja velocidad en curva de radio 150 m sin peralte (ancho estándar) con vagones de ejes (y que puede llegar a ser 1,8 para vagones con bogies).

3. Estudio comparativo entre las condiciones de seguridad al ripado frente al descarrilamiento

Suponiendo un eje con carga P circulando sobre una curva, sobre la que ejerce un esfuerzo lateral H, si denominamos Q_{int} , Y_{int} , Q_{ext} , Y_{ext} a las fuerzas verticales y transversales ejercidas por las ruedas interior y exterior en condiciones estables de circulación, tendremos:

$$\begin{aligned} Q_{int} + Q_{ext} &= P \\ Y_{int} + Y_{ext} &= Y \end{aligned}$$

Dado que con los radios habituales $R > 250$ m, los esfuerzos de inscripción son pequeños, se puede admitir que Y_{int} e Y_{ext} son del mismo sentido, por lo que el valor máximo que puede alcanzar el esfuerzo lateral H de una rueda será igual al esfuerzo total del eje, esto es:

$$H \geq Y$$

Si denominamos Q_N a la carga nominal de dicha rueda, podrá expresarse como una fracción de la carga vertical total P del eje, esto es:

$$Q_N = \alpha \cdot P \quad (\alpha \leq 1)$$

Siguiendo el criterio de Nadal, con $\lambda = 1,2$, para que se inicie el descarrilamiento se ha de cumplir:

$$\frac{Y}{\alpha \cdot P} \geq 1,2$$

Por otra parte, la condición del no ripado de la vía, sobre traviesas de madera, obliga a:

$$Y \leq H \leq 1 + \frac{P}{3}$$

Nota: tener en cuenta que $H_{adm} = 0,85 H_m$

Así, para alcanzar previamente la condición de descarrilamiento se ha de cumplir:

$$1,2 \cdot \alpha \cdot P \leq 1 + \frac{P}{3} \rightarrow \alpha \leq \frac{0,83}{P} + 0,28$$

Por otra parte, dado que en los ensayos efectuados por el ORE (Question D-138), se ha comprobado que cuando en un eje aparece un esfuerzo transversal, la rueda del lado de la dirección del esfuerzo aparece sobrecargada, incluso en un tramo recto, esto es $\alpha > 0,5$, la condición de descarrilamiento anterior a la de ripado, deberá cumplir esta nueva condición, así:

$$0,5 < \alpha \leq \frac{0,83}{P} + 0,28 \rightarrow P \leq 3,77 Tm$$

Que es una carga por eje muy inferior a las normalmente utilizadas.

En conclusión, en condiciones estables de circulación, sin

irregularidades apreciables en la geometría de la vía, la condición de ripado de la vía es más restrictiva que la de descarrilamiento.

No obstante lo anterior; el problema se puede presentar en curvas de muy pequeño radio o en desvíos en los que el ángulo de ataque sea $\gg 2^\circ$, e incluso en cambios nuevos donde los perfiles nuevos de las agujas puedan presentar un coeficiente de rozamiento excesivamente elevado (sería recomendable, entonces, su engrase lateral).

4. Peralte

Se denomina peralte a la diferencia de cota, en el plano normal al eje de la vía, entre los planos de rodadura de los dos carriles (e), combinando por tanto, los efectos del trazado en planta y en alzado.

El establecimiento del peralte en las curvas tiene como fin:

- Compensar parcial o totalmente la fuerza centrífuga, haciendo que la resultante del peso del material rodante y de la aceleración centrífuga sea aproximadamente normal al camino de rodadura.
- Equilibrar la distribución de cargas entre los dos carriles, para reducir el desgaste de los carriles y de las ruedas, así como mantener el confort de los viajeros.

La ficha UIC 703-R (1989) indica (así como la prENV 13803-1)

“ Para la vía estándar sin puntos singulares:

Los fuertes peraltes en curvas de pequeño radio aumentan el riesgo de descarrilamiento de vagones de mercancías a baja velocidad. En estas condiciones las cargas verticales de rueda aplicadas al hilo exterior del carril se reducen fuertemente, en particular cuando los alabeos de vía provocan disminuciones suplementarias (ver ORE B55/ RP8).

Los peraltes superiores a 160 mm pueden provocar los desplazamientos de los cargamentos y comprometer la comodidad para los trenes de pasajeros si excepcionalmente se detienen en tal lugar. Por otra parte, con estos peraltes, la seguridad contra el vuelco de las máquinas de trabajos y de los vagones de transporte especiales con su centro de gravedad alto puede estar comprometida.

Los fuertes peraltes aumentan los valores del exceso de peralte en las curvas debido a las diferencias evidentes entre las velocidades de los trenes rápidos y de otros.

Los fuertes peraltes pueden contribuir a los desplazamientos no deseables de la vía hacia el interior de la curva, después de un bateo a baja temperatura.

Para la vía con puntos singulares:

El mantenimiento de los aparatos de vía curvados y con peraltes elevados necesita de un suplemento permanente de gastos. Por otra parte, la calidad geométrica de tales aparatos tiende a disminuir. Es por ello, que es recomendable una limitación del peralte. Ello hace remarcar que es siempre deseable limitar el peralte en las vías principales al paso por las estaciones y los pasos a nivel".

Analicemos algunas condiciones de seguridad adicionalmente a las ya estudiadas anteriormente:

4.1 Vuelco

Veamos el valor de peralte máximo absoluto, impuesto por la posibilidad de vuelco de un tren vacío, en ausencia de viento en sentido desfavorable.

Condición del vuelco $\alpha + \beta > 90^\circ$

Debe por tanto cumplirse como valor límite $\alpha + \beta = 90^\circ$

Y como

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \operatorname{tg} 90^\circ = \infty = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

Debe ser

$$\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta = 1$$

Y al ser:

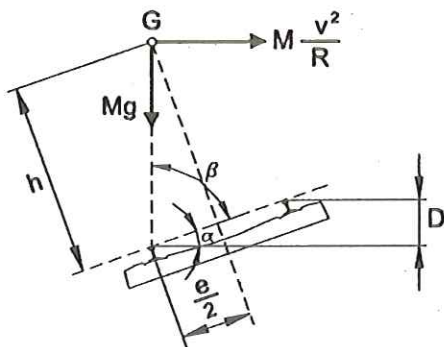
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D}{\sqrt{e^2 - D^2}}$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h}{e/2}$$

(h- altura del centro de gravedad del vehículo, respecto al plano de la vía)

Obtenemos:

$$h = \frac{e\sqrt{e^2 - D^2}}{2D}$$



4.2 Acción del viento

Por otra parte, a fin de evitar dicha posibilidad de vuelco, bien por circulación de vehículos altos, o bien en previsión de fuertes vientos, en vía de ancho estándar se limita el peralte a 180 mm, que correspondería a un peralte en vía métrica de 128 mm.

Una de las administraciones que ha estudiado este fenómeno para líneas de vía estrecha, dado su pequeño mo-

mento estabilizador y su climatología adversa, ha sido la japonesa (que considera los efectos de los vientos laterales sobre el vehículo, con velocidad máxima del viento de 30 m/s, para fijar el peralte).

Supongamos primeramente un vehículo parado en una vía recta sin peraltar:

Sea la fuerza total (fórmula usual para evaluación de origen aerodinámico)

$$F = \frac{1}{2} \zeta \cdot C \cdot A \cdot w^2$$

donde:

ζ = Densidad del aire $\cong 1,22 \text{ Kg/m}^3$

A = Sección expuesta al viento = a x b

C = Coeficiente aerodinámico

= $2 \pi / (\pi + 4) \cong 0,88$, según estudios teóricos (Milne-Thomson, *Hidrodinámica teórica*, Aguilar 1951)

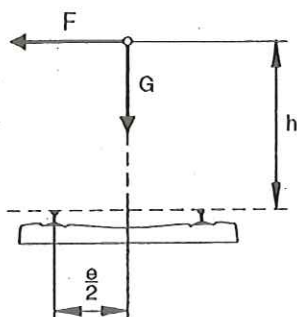
= entre 0,90 y 1,00, según Fukuchi G., *Statical consideration for railway vehicle overturn due to lateral wind*, Q.R., V.16 N.2., 1979.

w = Velocidad lateral del viento = 117 km/h, límite de la escala de Beaufort, esto es huracán importante, en tierra con aire lleno de espuma, visibilidad reducidísima y olas de 14 m en el mar (Lorente Castillo, J. Redaño Xipell, A., *Análisis conceptual de términos meteorológicos correspondientes a situaciones atmosféricas extremas*, R.O.P. enero 1989).

Tendremos, entonces:

- Momento de vuelco = h.F
 - Momento estabilizador = $\frac{e}{2} \cdot G$

Siendo G = peso total del vehículo



Ejemplo: si consideramos un vehículo, según Fukuchi, con

G = Peso total del vehículo

A = Sección del vehículo expuesta al viento =

$$= a \cdot b = 18 \cdot 2,8 \text{ m}^2$$

h = altura del centro de gravedad sobre los carriles

(Fukuchi estudia dos tipos de coches de viajeros, con h de 1,63 y 2,12 m) = 1,50 m

e = ancho de vía = 1,065 m

w = velocidad lateral del viento = 117 Km/h \cong 32,5 m/s

C = coeficiente aerodinámico = 0,90

Obtenemos:

$$F = 2,92 \text{ Tm}$$

Y por ello:

$$M_{\text{volcador}} = 4,38 \text{ m} \cdot T_n < 10,65 \text{ m} \cdot T_n =$$

$M_{\text{estabilizador}}$

Con lo que la estabilidad del vehículo quedará garantizada.

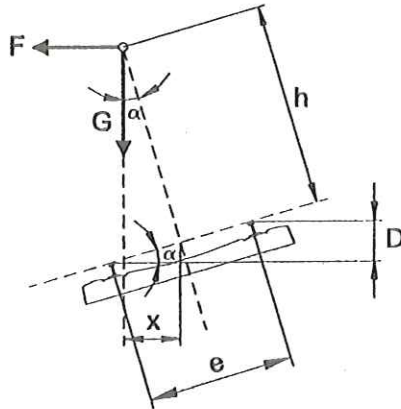
Si ahora la vía estuviese peraltada D mm, el centro de gravedad se elevaría $D/2$ mm, aproximándose al eje de vuelco en una cantidad igual a x mm.

En la figura, obtenemos:

$$\text{sen } \alpha = \frac{x}{h} = \frac{D}{e} \rightarrow x = h \frac{D}{e}$$

$$M_{\text{volcador}} = \left(h \cos \alpha + \frac{D}{2} \right) \cdot F$$

$$M_{to \text{ estabilizador}} = \left(\frac{e \cos \alpha}{2} - x \right) \cdot G$$



Igualando ambas expresiones, y sustituyendo los valores de h, e, F y G, obtenemos que para $D \geq 209,5$ mm, el tren volcaría.

4.3 Vuelco

Veamos el valor de h mínima (altura del centro de gravedad sobre el plano de rodadura), en las mismas condiciones que el ejemplo anterior:

Momento de vuelco:

$$h \cdot F = h \cdot M \cdot a_g = M \cdot h \cdot 4,3$$

Momento estabilizador:

$$\frac{e}{2} \cdot P = \frac{e}{2} \cdot M \cdot g = \frac{1,065}{2} \cdot 9,81 \cdot M = 5,22 \cdot M$$

Igualando ambos, ha de ser $h < 1,21$ m

El vuelco sólo es posible cuando se circula a una velocidad excesiva (aumento muy considerable de la fuerza centrífuga), si bien en los vehículos modernos, con centro de gravedad bajo y pequeños juegos y carreras de las suspensiones, es condición más limitativa la de descarrilamiento por remonte de la pestaña.

4.4 Maquinaria de vía

Su funcionamiento no implica ninguna condición suplementaria a la de un tren en servicio; así la experiencia japonesa avala en la práctica su trabajo a plena satisfacción con ángulos de hasta 8°, lo que supone en ancho métrico un peralte de 139 mm.

4.5 Peraltes de equilibrio y de desgaste equilibrado

• Se denomina peralte de equilibrio a aquel que proporciona a la vía una inclinación tal que posibilita que la componente en el plano de la vía de la acción gravitatoria compense exactamente la aceleración centrífuga de una circulación a velocidad V_{op} al paso por una curva circular de radio R, que tiene por valor:

$$D_e = \frac{e}{g} \cdot \frac{V_{op}^2}{R}$$

Como se puede observar, corresponde a una velocidad de marcha bien definida, pero dado que en la explotación comercial existen circulaciones a distintas velocidades, se producen aceleraciones hacia el interior o el exterior de la curva, según que su velocidad sea menor o mayor a la de equilibrio, así como un desgaste diferencial de los carriles.

Dicha aceleración no compensada tiene como valor:

$$a_q = \frac{e}{g} (D_e - D)$$

Ejerciendo la pestaña esfuerzos sobre el carril

- Exterior: si $a_q > 0$, esto es $V_j > V_{op}$
- Interior: si $a_q < 0$, esto es $V_i < V_{op}$

Así las acciones laterales sobre el carril interior;
para todos los trenes con

$V_i < V_{op}$ y cargas por eje P_i , serán:

$$Y_{int} = \frac{1}{e} \sum P_i \left(D - \frac{e \cdot V_i^2}{g \cdot R} \right) = \frac{D}{e} \sum P_i - \frac{\sum P_i \cdot V_i^2}{g \cdot R}$$

Y en el carril exterior, para todos los trenes con
 $V_j > V_{op}$ y cargas por eje P_j :

$$Y_{ext} = \frac{1}{e} \sum P_j \left(\frac{e V_j^2}{g R} - D \right) = \frac{\sum P_j \cdot V_j^2}{g R} - \frac{D}{e} \sum P_j$$

Por ello, el desgaste de carril puede suponerse como primera aproximación proporcional a los anteriores valores de Y_{int} y Y_{ext} .

• Para hallar el peralte óptimo para un desgaste equilibrado entre los dos hilos de carril, debemos conseguir que la fuerza transversal asociada a a_q se reparta equitativamente al cabo de N circulaciones entre ambos carriles, esto es:

$$\sum P_i \cdot D_{opde} = \sum P_i \cdot D_{ei}$$

Donde: P_i = Peso del eje i

D_{ei} = Peralte de equilibrio asociado a la velocidad

$$i = \frac{e}{g} \cdot \frac{V_i^2}{R}$$

D_{opde} = Peralte óptimo de desgaste equilibrado.

Por lo tanto:

$$D_{opde} = \frac{\sum P_i \cdot D_{ei}}{\sum P_i} = \frac{e}{g \cdot R} \cdot \frac{\sum P_i \cdot V_i^2}{\sum P_i}$$

4.6 Peralte práctico

Independientemente de los conceptos de peralte límite (el aplicable a $R \leq R_{\min}$) y de peralte teórico o de equilibrio (el correspondiente a $a_q = 0$) la vía se instala y mantiene con el de peralte normal o de construcción, esto es el de compromiso para circulación de trenes rápidos y lentos sobre curvas circulares con $R \geq R_{\min}$ y $D_{\text{pract}} \leq D_{\text{lim}}$. Existen diversas teorías (usualmente entre 1/9 y 1/12 de e), a saber

- 2/3 del peralte teórico:

$$D_{\text{pract}} = \frac{2}{3} D_{\text{teor.}} = 8,38 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{V_{\text{máx}}^2}{R} \cong 5,6 \frac{V_{\text{máx}}^2}{R}$$

- El obtenido para una $V = 0,8 V_{\text{máx}}$

$$D_{\text{pract}} = 8,38 \cdot \frac{(0,8 V_{\text{máx}})^2}{R} = 5,4 \frac{V_{\text{máx}}^2}{R}$$

- El obtenido para $V = \sqrt{\frac{V_{\text{máx}}^2 + V_{\text{mín}}^2}{2}}$ (Italia)

$$D_{\text{pract}} \cong 5,9 \cdot \frac{V_{\text{máx}}^2 + V_{\text{mín}}^2}{R}$$

- El obtenido para $V = \sqrt{\frac{\sum V_m \cdot N_m}{\sum N_m}}$

donde

V_m = velocidad de marcha de cada categoría de trenes en la sección considerada

N_m = número de trenes de cada categoría

- El obtenido ponderando $V_{\text{máx}}$ y $V_{\text{mín}}$

$$\left(\frac{V_{\text{máx}}^2}{R} - \frac{g}{e} D_{\text{pract}} \right) (1 + S) < a_l$$

$$\frac{g}{e} \cdot D_{pract} - \frac{V_{min}^2}{R} < a_q (-) = \frac{g}{e} \cdot E$$

En base a este sistema de inecuaciones, se acotan los valores de D_{pract} y R (si hacemos $l/R=C$, se convierte en un sistema lineal).

Ejemplo: Una primera aproximación para $D_{lim} = 80$ mm $E_{lim} = 55$ mm $l_{lim} = 65$ mm, sería:

$$D = 8,38 \frac{V_{máx}^2}{R} - 65$$

$$80 = 8,38 \frac{V_{máx}^2}{R} - 65 \rightarrow 65 = 3,76 \frac{V_{máx}^2}{R} \rightarrow D_1 = 4,62 \frac{V_{máx}^2}{R}$$

$$D = 8,38 \frac{V_{min}^2}{R} + 55 \rightarrow 55 = 18,44 \frac{V_{min}^2}{R} \rightarrow D_2 = 26,82 \frac{V_{min}^2}{R}$$

$$D_{pract} = \frac{D_1 + D_2}{2} = 2,31 \frac{V_{máx}^2}{R} + 13,41 \frac{V_{min}^2}{R}$$

• El obtenido manteniendo la proporción $D/l = K$ (constante)

$$D = 8,38 \frac{V_{máx}^2}{R} - l \rightarrow D_{pract} = 8,38 \cdot \frac{K}{K+1} \cdot \frac{V_{máx}^2}{R}$$

Ejemplo: Si tomamos $D_{lim} = 80$ mm y $l_{lim} = 65$ mm $\rightarrow K = 1,23$

$$D_{pract} = 4,62 \frac{V_{máx}^2}{R}$$

5. Insuficiencia de peralte

Un peralte escaso hace que los viajeros se sientan incómodos, ya que las fuerzas de inercia tienden a lanzarle la-

teralmente, si la insuficiencia de peralte es importante.

Dicho valor viene dado por la expresión:

$$I = \frac{e}{g} \cdot \frac{V^2}{3,6^2 \cdot R} - D$$

I, D, e en mm

V en Km/h

R en m

g = 9,81 m/s²

Según se indica en la prENV I3803-I, esta insuficiencia de peralte modifica los esfuerzos verticales y transversales sobre el carril exterior y los transversales sobre el tramo de vía cargado.

La magnitud de estos esfuerzos depende, entre otros factores, de:

- Tipo de estructura de la vía (vía soldada o con juntas).
- Condiciones del mantenimiento de la vía y del estado de los elementos que la conforman.
- Geometría de la vía y su calidad.
- Tipo de sistema de rodadura y suspensión del vehículo.
- Carga por eje y masas no suspendidas del vehículo.
- Condiciones de mantenimiento del vehículo.

Dichas fuerzas transversales ejercidas por los ejes no deben superar la resistencia de la vía a la deformación transversal. Esta resistencia no es sólo función de la estructura de la vía, en especial del tipo de material del balasto, sino también de su grado de compactación, por lo que después de un bateo hay que tener en cuenta que se debe respetar el valor mínimo de la resistencia al ripado de la vía (ORE C I38/RP 9 y DT I50).

Si se aumenta el valor de I recomendado, deberá por tanto considerarse la sección del carril, el tipo de traviesas y la separación entre ellas, las sujeciones, la banqueta de balasto y la capacidad portante de la infraestructura, considerando que implicará una disminución de la vida útil de los elementos constitutivos de la vía además de unos costes adicionales para la vigilancia y el mantenimiento de la calidad de la vía.

Analicemos su cálculo desde el punto de vista de seguridad.

5.1 Vuelco

Desde el punto de vista de seguridad por ripado de la vía, las insuficiencias de peralte utilizadas habitualmente por las diversas compañías explotadoras, así como las indicadas en la prENV 13803-1 no son críticas para la resistencia de la vía, excepto cuando son importantes los esfuerzos debidos a las oscilaciones transversales de los vehículos excitados por las irregularidades del trazado, por las características de estabilidad propias del vehículo.

Se debe, no obstante, tener en cuenta que dichos esfuerzos transversales pueden ser aumentados fuertemente por la acción de las ruedas guiantes sobre el hilo exterior; a fin de no provocar un desgaste considerable del carril, al menos en las curvas de pequeño radio donde los grandes ángulos de ataque de las pestañas favorecen dicha abrasión.

El esfuerzo lateral cuasiestático H_s , en el plano de la vía, resultante por la circulación de un eje con carga $P = 2 Q_N$ tiene como valor:

$$H_s = 2Q_N \frac{I}{e}$$

5.2 Descarrilamiento

Desde el punto de vista de seguridad por descarrilamiento

to, las insuficiencias de peralte son críticas, para líneas con tráfico mixto para $V > 120$ km/h en mercancías si $l = 160$ mm y los vagones de mercancías no son de características mecánicas especiales cuyas prestaciones sean similares a las de los vehículos de viajeros.

Analicémoslo:

La sobrecarga ΔQ del carril de una curva, tiene como valor:

$$\Delta Q = 2 Q_N \cdot h \cdot \frac{l(1+S)}{e^2}$$

Nota: para calcular el valor de ΔQ , la DB ha venido utilizando la expresión:

$$\Delta Q = \frac{V^2}{127 \cdot R \cdot e} (2h + D) \frac{2h \cdot D}{e} Q_N (1 + S)$$

Dicha sobrecarga puede llegar a superar un 30 % el valor de la carga media de una rueda, para un $l = 160$ mm en ancho estándar; lo que conlleva un aumento de la agresividad de las ruedas guantes sobre la abrasión del carril (en caso de $S = 0,4$), por lo que no debería ser rebasado dicho límite.

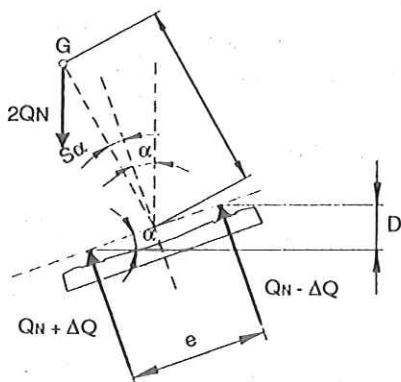
5.3 Aceleración transversal al viajero

Se ha de tener en cuenta que la aceleración transversal cuasiestática en la caja del vehículo a_i , que es una medida de la aceleración que experimentan los viajeros dentro del vehículo (y define la comodidad de marcha) es mayor (excepto con vehículos de caja inclinable) que la aceleración no compensada en el plano de la vía a_q .

Nota: Dicha incomodidad aumentaría si el sentido de la aceleración fuese hacia arriba.

Analicemos el valor de a_i , relacionado directamente con el tipo de material utilizado, ya que la reacción de la suspensión incrementa, en mayor o menor grado, la aceleración que se aplica sobre las masas no suspendidas del bogie,

aumentando las aceleraciones sobre la caja, o sea sobre el viajero a través de lo que podríamos denominar efecto flexibilidad.



$$a_i = a_q (1 + S) = a_q (1 + S_p)(1 + S_s)$$

S = coeficiente de flexibilidad de las suspensiones (efecto de balanceo)

S_p = coeficiente de flexibilidad de la suspensión primaria

S_s = coeficiente de flexibilidad de la suspensión secundaria

$$S = \frac{\alpha}{\text{ángulo real del peralte}}$$

α = inclinación del suelo del vehículo, en relación al plano de rodadura, medido con el vehículo parado sobre un tramo de vía, con un peralte determinado.

Según indica la ficha UIC 703-R (1989):

- El valor de a_i máximo que se considera aceptable debe encontrarse entre 1,0 y 1,5 m/s^2 (los valores $\geq 1,3 m/s^2$ sólo son aceptables para una vía con muy buena calidad de mantenimiento). En

ningún “instante” se debe alcanzar el valor de 2,5 m/s^2 .

El viajero aceptará aceleraciones transversales de hasta 1,5 m/s^2 , si los efectos aleatorios no le han “castigado” demasiado su organismo (fundamentalmente problemas de equilibrio), esto es, si la vía es de muy buena calidad, pero, al contrario, si la vía no tiene la geometría adecuada el viajero no tolerará aceleraciones cuasiestáticas mayores de 1 m/s^2 , siempre que la velocidad de variación de dicha aceleración transversal esté asimismo limitada.

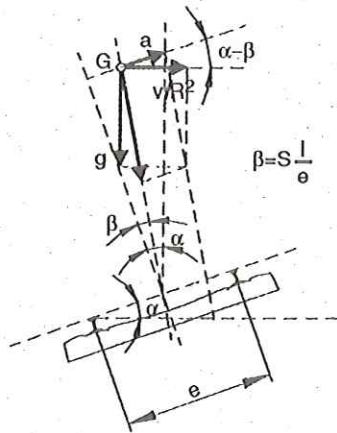
El valor de a , pues, se determina en función de que el viajero no sufra sensaciones incómodas. En una campaña de medidas del grado de comodidad percibido por el viajero realizada por la SNCF para diversas aceleraciones transversales, llegó a las siguientes conclusiones:

COMODIDAD	a		$\frac{da}{dt}$
	Sentado	De pie	
Muy buena	1,00	0,85	0,30
Buena	1,20	1,00	0,45
Aceptable	1,40	1,20	0,70
Aceptable excepcionalmente	1,50	1,40	0,85

- El valor de l debe estar acorde con la flexibilidad de la suspensión del vehículo utilizado. La gran parte de los vehículos modernos a plena carga tienen un S del orden de 0,40, que con dispositivos especiales puede descender a 0,25 e incluso a 0,20.
- El número de cambios de curvatura del trazado, y la longitud de los elementos que definen la

geometría tienen una influencia adicional sobre el valor de a_i que se considera como aceptable, al aparecer variaciones del mismo al paso por las curvas de transición, además de sobreaceleraciones puntuales en los puntos de cambio del tipo de alineación.

5.4. Cálculo desde el punto de vista de calidad de marcha



Desde el punto de vista de calidad de marcha (confort):

$$\beta = S \frac{I}{e}$$

Dado que el valor de a_i para un vehículo con coeficiente de flexibilidad S es:

$$a_i = \frac{g}{e} \cdot I \cdot (1 + S)$$

6. Exceso de peralte

Dado que sólo los trenes lentos, especialmente los mer-

carrías, circulan con exceso de peralte sobre las curvas de mayor radio, este parámetro afecta fundamentalmente a la fatiga de la vía, y en especial al incremento de carga de rueda sobre el carril bajo de las curvas e incremento de tensión en el mismo; especialmente el borde activo de la pestaña, con el consiguiente deterioro por aplastamiento anormal del carril con aparición de rebabas en su cabeza (los trenes más lentos suelen ser los más pesados), además de poder dificultar su arranque en caso de que la circulación haya tenido que realizar una parada.

Dicho valor viene dado por la expresión:

$$E = D - \frac{e}{g} \cdot \frac{V^2}{3,6^2 \cdot R}$$

E, D, e en mm

V en km/h

R en m

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

6.1 Descarrilamiento y vuelco

Desde el punto de vista de seguridad, el exceso de peralte en las circulaciones de baja velocidad produce la descarga de las ruedas del carril exterior (el más alto), aumentando los riesgos de vuelco y descarrilamiento.

Esta descarga de rueda ΔQ es directamente proporcional a la carga por eje Q_N y al exceso de peralte E, e inversamente proporcional al cuadrado de ancho de vía

Si denominamos S al coeficiente de flexibilidad de la suspensión tendremos:

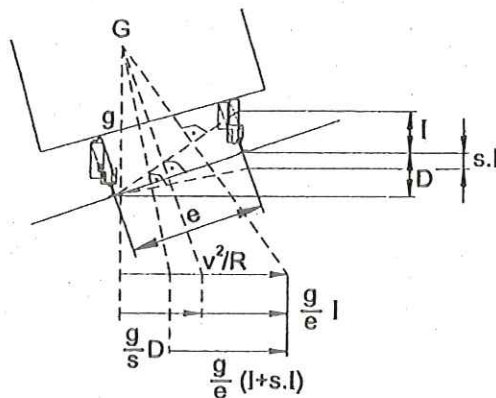
$$\Delta Q = \frac{2Q_N \cdot h \cdot E (1 + S)}{e^2}$$

$2Q_N$ es la carga de la caja (masa suspendida), que puede

estar entre el 85 % y el 90 % de la carga total, estando, por tanto, del lado de la seguridad.

Y como para bajas velocidades $E \cong D$, será

$$\Delta Q = \frac{2Q_N \cdot h \cdot E(1+S)}{e^2}$$



7. Aproximación a los esfuerzos transversales sobre la vía

a) Efecto de la velocidad y de las deficiencias de la vía:

$$H_1 = \frac{0,35 \cdot P \cdot V}{1000} + \frac{75 \cdot P(2 \cdot NT + A - 1)}{1000} \quad (\text{SNCF 1972})$$

NT = desviación media sobre 300 m de los defectos de nivelación transversal, en mm

A = desviación media sobre 300 m de los defectos de alineación en mm

$$H_1 \cong \frac{P \cdot V}{1000}$$

P = peso por eje en Tn

V = velocidad en km/h

b) Efecto de la fuerza centrífuga

$$H_2 = \frac{P \cdot V^2}{3,6^2 \cdot g \cdot R} = \frac{P \cdot V^2}{127 \cdot R}$$

R = radio en m

c) Efecto del peralte

$$H_3 = \frac{P \cdot D}{e}$$

D = peralte en mm

E = distancia entre ejes de carriles, en mm

Esfuerzo crítico de ripado

$$H_{rr} = \alpha \left(1 + \frac{P}{3}\right) \rightarrow \text{analizado anteriormente}$$

$$H = H_1 + H_2 - H_3 \leq H_{rr}$$

8. Análisis de desgaste controlado

Al igual que hemos visto en el apartado referente al peralte los conceptos de peralte de equilibrio y de desgaste equilibrado, una vez estudiados I y E realicemos otras consideraciones:

Según hemos visto al final del apartado I, los esfuerzos cuasiestáticos (si se desprecian los esfuerzos debidos al rozamiento rueda-carril y los de inscripción) tienen como valor:

Para $l \geq 0$:

$$Y_{ext} = P \cdot \frac{l}{e}$$

$$Y_{int} = 0$$

Para $l < 0$:

$$Y_{ext} = 0$$

$$Y_{int} = P \cdot \frac{E}{e}$$

Igualmente, para $l \geq 0$, los esfuerzos verticales cuasiestáticos (sin considerar S) vienen definidos por:

$$Q_{ext} = Q_N + \Delta Q = Q_N \left(1 + 2 \cdot \frac{l}{e} \cdot \frac{h}{e}\right)$$

$$Q_{int} = Q_N - \Delta Q = Q_N \left(1 - 2 \cdot \frac{l}{e} \cdot \frac{h}{e}\right)$$

Ahora bien, si circulan i ejes con l_i y j ejes con E_j , las acciones resultantes en cada carril serán:

$$\Sigma Y_{ext} = 2 \Sigma Q_{Ni} \cdot \frac{l_i}{e}$$

$$\Sigma Y_{int} = 2 \Sigma Q_{Nj} \cdot \frac{E_j}{e}$$

$$\Sigma Q_{ext} = \Sigma Q_{Ni} + \Sigma Q_{Nj} + 2 \Sigma Q_{Ni} \cdot \frac{l_i}{e} \cdot \frac{h_i}{e} - 2 \Sigma Q_{Nj} \cdot \frac{E_j}{e} \cdot \frac{h_j}{e}$$

$$\Sigma Q_{int} = \Sigma Q_{Ni} + \Sigma Q_{Nj} - 2 \Sigma Q_{Ni} \cdot \frac{l_i}{e} \cdot \frac{h_i}{e} + 2 \Sigma Q_{Nj} \cdot \frac{E_j}{e} \cdot \frac{h_j}{e}$$

Esto es, en un estado cuasiestático, los efectos de l y E son idénticos en cada carril, para masas Q_N iguales.

Dado que en las curvas de radio reducido, tanto los trenes lentos como rápidos circulan con l , en ellas los límites que se imponen son los de esta insuficiencia de peralte; parece lógico pensar que en otras curvas estos límites sean análogos a los del exceso de peralte, a igual número de circulaciones lentas y rápidas.

Así, en el caso de que en estas curvas circulen vehículos, tanto con E como con l , dado que el desgaste de un carril es, en principio, proporcional a la sollicitación cuasiestática correspondiente, puede limitarse la diferencia de desgaste entre los dos carriles, tanto vertical como lateral.

Si consideramos admisible un porcentaje del $100.\alpha\%$, ($\alpha < 1$) superior de desgaste lateral del carril interior respecto al exterior, se debe verificar:

$$\Sigma Y_{int} = (1 + \alpha)\Sigma Y_{ext}$$

O lo que es lo mismo:

$$(1 + \alpha)\Sigma Q_{Ni} \cdot \frac{I_i}{e} = \Sigma Q_{Nj} \cdot \frac{E_j}{e}$$

$$E_{media} \cdot \Sigma Q_{Nj} = \Sigma Q_{Nj} \cdot E_j = (1 + \alpha)I_{media} \Sigma Q_{Ni} = (1 + \alpha)\Sigma Q_{Ni} \cdot I_i$$

En base a lo cual, podemos dar una aproximación de los E con los que pueden circular los trenes lentos, o conocido el tipo de tráfico de la línea, calcular α :

$$\alpha = \frac{\Sigma Q_{Nj} \cdot E_j}{\Sigma Q_{Ni} \cdot I_i} - 1$$

9. Velocidad crítica

Serge Montagne, en su artículo sobre "los parámetros de trazado en vía estrecha" (Revue Generale des Chemins de Fer", La Voie Africaine, Supplement au n° 718-1988) indica:

"se puede sin embargo dar aquí una breve nota en aquéllo que concierne a las condiciones de estabilidad de los bogies o de los vehículos de dos ejes. Se conoce, no obstante, que el comportamiento de un bogie no es estable más que cuando su velocidad es inferior a una cierta velocidad, denominado velocidad crítica, y que depende fuertemente:

- de la conicidad equivalente del contacto rueda/carril
- del empate del bogie
- de las masas y rigideces de los elementos del bogie
- de la distancia entre los puntos de contacto

Con el fin de examinar la incidencia de este último factor, sin ninguna pretensión de aproximar los valores reales que no pueden calcularse más que por modelos no lineales, se puede utilizar una de las fórmulas simplificadas establecidas para los modelos lineales, y que da una velocidad crítica V , mediante la fórmula aproximada:

$$V_r^2 = \frac{2 \cdot C_1 (2a^2 + e^2)(a^2 + e^2)}{M_0 \cdot \gamma^1 \cdot (e/r_0) (I_{0c} / M_0) + a^2 + e^2}$$

En la cual

a : semiempate del bogie

M_0 I_0 : masa y momento de inercia del bogie

C_1 : rigidez global del rappel transversal de un eje en la vía

e : semiancho

γ^1 : conicidad equivalente

r_0 = radio de la rueda

Si, a partir de esta fórmula, se expresa la relación de las velocidades críticas de bogies idénticos mecánicamente en vía métrica y estándar (teniendo en cuenta el debilitamiento del radio de giro $\sqrt{I_{nc} / M_n}$ en vía métrica), se constata que esta expresión:

- Es una función creciente del empate
- Es inferior a 1 para los empates superiores a 0,5 m, lo que quiere decir que prácticamente hay una mejora de las condiciones de estabilización en vía métrica

Pero, debido a que los empates de los bogies corrientes varían de 1,6 m a 3,0 m, la expresión V_{cm} / V_{ce} sólo varía de 1,170 a 1,188, lo que quiere decir que dicha mejora no representa más que un aumento relativamente escaso de la velocidad crítica”.

ALAF

Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles

Associação Latinoamericana de Estradas de Ferro

Edición y producción gráfica: analog@ar.inter.net.

Impreso en el mes de noviembre de 2006.

TEMAS

DE DIVULGACION FERROVIARIA

ALAF

**ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE FERROCARRILES
ASSOCIAÇÃO LATINOAMERICANA DE ESTRADAS DE FERRO**