

EL PERALTE DEL CARRIL EXTERIOR EN LAS CURVAS DE LOS CAMINOS DE HIERRO

POR C. JAVIER CORDEIRO

Ingeniero Jefe de la vía en la Real Companhia de los caminos de hierro portugueses (1).

Cuando un tren recorre una curva en un camino de hierro, hay, en cada instante, equilibrio entre las fuerzas que le mantienen en la vía, de las cuales las principales son:

- la fuerza centrífuga,
- la fuerza centripeta,
- la componente normal de la fuerza motriz,
- el peso del tren,
- el rozamiento de las ruedas sobre el carril.

Las dos primeras fuerzas obran en sentido inverso, en el plano osculador, y su valor común es:

$$\frac{v^2 P}{g R}$$

en donde P representa el peso del tren, v su velocidad en metros por segundo, R el radio de curvatura, y g la aceleración de la gravedad.

La fuerza motriz se considera que obra en el mismo plano y está aplicada a los vehículos por medio de las barras de enganche. Actúa, pues, según cuerdas cuya longitud es la misma de los vehículos. Designando por b la longitud media de estas cuerdas, y por F la fuerza motriz, la componente normal de ésta estará dada por la expresión:

$$\frac{b F}{2 R}$$

Cuanto al rozamiento, se ejerce en planos tangentes a las llantas de las ruedas. Sin embargo, despreciaremos, por ser pequeño, el ángulo correspondiente a la conicidad de las llantas, y admitiremos que el rozamiento obra en un plano tangente a los carriles.

Sea α la inclinación de este plano sobre el osculador de la curva, que suponemos horizontal, y proyectemos todas las fuerzas sobre el mismo plano.

La fuerza centrífuga y centripeta dan componentes de la forma

$$\frac{v^2 P}{g R} \cos \alpha.$$

El peso del tren y la componente normal de la fuerza motriz, dan, respectivamente:

$$P \sin \alpha \quad \text{y} \quad \frac{b F}{2 R} \cos \alpha.$$

Estas fuerzas tienen el mismo signo que la fuerza centripeta; de suerte que, siendo la componente de ésta

$$-\frac{v^2 P}{g R} \cos \alpha, \quad (1)$$

la fuerza transmitida por el tren será

$$\frac{v^2 P}{g R} \cos \alpha - P \sin \alpha - \frac{b F}{2 R} \cos \alpha. \quad (2)$$

El rozamiento proviene de las componentes del peso P , y de la fuerza centrífuga, normales al plano de la vía. Su valor es, pues,

$$f \left(P \cos \alpha + \frac{v^2 P}{g R} \sin \alpha \right), \quad (3)$$

siendo f el coeficiente de rozamiento.

Para establecer la ecuación de equilibrio, observaremos que, a consecuencia de la curvatura de la vía, el movimiento del tren, en un intervalo de tiempo infinitamente pequeño, puede descomponerse en dos: el movimiento tangencial producido por la fuerza motriz (supuesta, por el momento, tangencial), y el movimiento normal, en el sentido del centro de la curva, debido a la fuerza centripeta. Esta se transmite por los carriles al tren, en virtud

de la forma cónica de la superficie de la llanta, y por medio del rozamiento.

Se puede decir, pues, que los carriles arrastran los vehículos transversalmente a la vía; y desde luego nos está permitido asimilar el problema al del movimiento de dos cuerpos sometidos a las fuerzas (1) y (2), de sentidos contrarios, pero enlazadas por el rozamiento.

Apliquemos a este sistema dos fuerzas iguales que valgan

$$+\frac{v^2 P}{g R} \cos \alpha.$$

La posición relativa de los cuerpos no variará; es decir, el equilibrio subsistirá; y como las fuerzas aplicadas a los carriles se anulan, siquese que las fuerzas en equilibrio son: la fuerza aplicada al tren

$$\frac{v^2 P}{g R} \cos \alpha - P \sin \alpha - \frac{b F}{2 R} \cos \alpha,$$

y el rozamiento (3).

Tendremos, pues, la ecuación

$$\frac{2 v^2 P}{g R} \cos \alpha - P \sin \alpha - \frac{b F}{2 R} \cos \alpha = f \left(P \cos \alpha + \frac{v^2 P}{g R} \sin \alpha \right),$$

de la cual deducimos

$$g \alpha = \frac{\frac{2 v^2}{g R} - f - \frac{b F}{2 R P}}{1 + f \frac{v^2}{g R}}$$

Designemos por h el peralte y por l la anchura de la vía. Tendremos:

$$h = l \sin \alpha.$$

Podemos sustituir el seno por la tangente, sin error sensible; lo cual nos dará:

$$h = l \frac{\frac{2 v^2}{g R} - f - \frac{b F}{2 R P}}{1 + f \frac{v^2}{g R}} \quad (4)$$

Esta fórmula se puede simplificar despreciando los términos $\frac{b F}{2 R P}$ y $f \frac{v^2}{g R}$, que son de segundo orden.

En efecto; la fuerza motriz, igual a la resistencia del tren, puede darse en kilogramo por tonelada, por una fórmula empírica de la forma

$$F = \varphi \frac{P}{1.000},$$

siendo φ un función de la velocidad; y el término $\frac{b F}{2 R P}$ se convertirá en

$$\frac{\varphi}{1.000} \times \frac{b}{2 R}$$

Las cantidades φ y b representan, en general, unidades; este término es, pues, de segundo orden.

Cuanto al término $f \frac{v^2}{g R}$ vemos por la fórmula (4) que $\frac{v^2}{g R}$ difiere muy poco de $\frac{1}{2} f$, puesto que

$$\frac{h}{l} = \sin \alpha$$

es una cantidad muy pequeña. Tendremos, pues, aproximadamente

$$f \frac{v^2}{g R} = \frac{1}{2} f^2;$$

es decir, que este producto es también de segundo orden.

Reducimos, pues, la fórmula (4) a

$$h = \frac{2 l v^2}{g R} - l f \quad (5)$$

(1) Memoria presentada en el Congreso internacional de Caminos de hierro.

Se puede referir la velocidad á kilómetros por hora, haciendo

$$v = \frac{V}{3,6}$$

Si introducimos también en (5) el valor de g

$$g = 9,80$$

tendremos

$$h = 0,01575 \frac{l V^2}{R} - l f. \quad (6)$$

En el caso de que estuvieran dados R y h , se hallará la mayor velocidad admisible por la fórmula

$$V = \sqrt{\frac{h + l f}{0,01575 l} R} \quad (7)$$

Cuando el peralte es nulo, es decir, si los carriles están al mismo nivel, la fórmula (7) se reduce á

$$V = \sqrt{\frac{R f}{0,01575}} \quad (8)$$

Apliquemos las precedentes fórmulas á algunos casos interesantes que se encuentran en la práctica. En la línea de Lisboa á Cintra, hay una curva de 320 m de radio en rampa de 0,018, por la cual pasan á toda velocidad los trenes que vienen de Cintra. Después de numerosas tentativas, se reconoció que era preciso dar á la vía un peralte de 0,20.

Hagamos en la fórmula (7)

$$R = 320, l = 1,752, h = 0,20.$$

Hallaremos

$$\text{para } f = \frac{1}{7}, V = 72.$$

$$\text{para } f = \frac{1}{11}, V = 64.$$

Estas velocidades son las que llevan los trenes.

En el empalme de Cáceres hay numerosos casos idénticos.

En el Congreso de caminos de hierro de San Petersburgo, el Sr. Sabouret dijo que entre Brive y Tolosa se explota una línea con curvas de 300 m y velocidades de 70 km por hora, y que si no se hubiera adoptado el peralte de 0,20, hubiera sido preciso disminuir la velocidad.

Según el Sr. Buschère (*Les Chemins de fer anglais*), en el Estado belga se ha adoptado la fórmula antigua

$$h = \frac{lv^2}{gR};$$

pero para curvas de 300 m de radio, ha sido preciso emplear un peralte de 0,15, no comprendido en la fórmula, cuando la velocidad llegaba á 70 km por hora.

Haciendo en la fórmula (7)

$$R = 300, l = 1,532, h = 0,15, f = \frac{1}{7}$$

resulta

$$V = 68,$$

muy próximo á 70.

En El Main Weser Bahn se han hecho numerosos experimentos para determinar prácticamente el valor exacto del peralte. Se iba levantando sucesivamente el carril exterior de las curvas, en tanto que el borde interior de este carril, pintado con tiza, denotaba que había rozamiento de la pestaña de las ruedas, en los trenes más rápidos; de este modo se llegó á fijar el peralte de 0,15 para las curvas de 300 m de radio. (*Goschler, Traité pratique*, 3.^a edición.)

En las líneas inglesas hay gran diversidad en las reglas que se siguen para la determinación del peralte. Algunas, como la Great Western, la North British, la de Lancashire y la de Yorkshire, no tienen fórmula, dejando á los asentadores que determinen el peralte que más conviene en cada caso particular. Y

hasta algunos Ingenieros han llegado á poner en duda la utilidad del peralte.

La línea inglesa en donde es menor el peralte es la del North Eastern, á pesar de las grandes velocidades de 90 á 100 km por hora de los expresos de Londres á Edimburgo. Se han adoptado los valores siguientes:

Radios	Peralte en mm.
300.....	70
400.....	67
500.....	63,5
600.....	57
700.....	51
800.....	44
1.000.....	36,5
1.200.....	33
1.500.....	28,6
1.800.....	24
2.000.....	20,6
2.500.....	13,5

Hagamos notar que en esta línea, los radios inferiores á 800 m no existen más que en las bifurcaciones, donde la velocidad es siempre menor que en el resto de la vía. Busquemos por medio de la fórmula (7) la velocidad máxima para el radio de 800 m y el peralte de 0,044; obtendremos

$$\text{para } f = \frac{1}{7}, V = 93$$

El peralte de 0,044 es, pues, suficiente para la curva de 800 m.

Evidentemente la velocidad de 90 á 100 km por hora es también admisible, con mayor razón, cuando, por el mismo radio de 800, el peralte es superior á 0,044; lo cual explica por qué las demás líneas están bien con sus peraltes exagerados.

En el mismo caso están los peraltes del cuadro del North Eastern que hemos transcrito. En efecto, para las curvas de 2.000 y 2.500 m de radio los peraltes de 20,6 y 13,5 mm son perfectamente inútiles.

En el Glasgow and South Western, se suprime el peralte á partir del radio 1.600; y lo mismo se hace en el Central suizo, Estado bávaro, Hannover y otros. Nuestra fórmula (8), aplicable al caso de $h = 0$, justifica plenamente esta práctica, puesto que para $R = 1.600$, da

$$\text{para } f = \frac{1}{7}, V = 120;$$

$$\text{para } f = \frac{1}{11}, V = 96;$$

que son las velocidades de las líneas inglesas.

Si en la misma fórmula (8) hacemos $R = 300$, tendremos:

$$\text{para } f = \frac{1}{7}, V = 52$$

$$f = \frac{1}{11}, V = 42$$

Qué es el caso de las bifurcaciones donde se suprime el peralte para el cambio de vía.

Se comprende, pues, que en una línea donde se modera la velocidad al pasar por las curvas de radio pequeño, el peralte pueda ser considerado como inútil.

Finalmente, en el Congreso de San Petersburgo, el Sr. Le Chatelier, al hablar de los experimentos hechos en Noisy-le-Sec acerca de las resistencias de las curvas, dijo que durante cierto tiempo, hubo una circulación bastante activa en una vía (en curva de 100 m) en la cual el carril exterior estaba más bajo que el interior, y no ocurrió ningún accidente.

La fórmula (7) demuestra, en efecto, que para $R = 100$ y $f = \frac{1}{7}$, con una diferencia de nivel entre los dos carriles, de

0,05, es decir, para $h = -0,05$, la velocidad puede llegar a 26 km. Con $h = -0,10$ todavía se podrá pasar con una velocidad de 22 km por hora.

Así, pues, nuestra fórmula responde bien a todos los casos de la práctica.

REVISTA EXTRANJERA

Ataguías con tela impermeable.

Del *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils de France*, extractamos la siguiente noticia sobre las ataguías con tela impermeable, de M. N. Mélik.

Las ataguías de arcilla entre dos filas de pilotes y tablestacas son muy costosas, tanto por su construcción cuanto por el trabajo de mantenerlas impermeables y por el de demolición.

Sin condenar por completo este sistema de construcción de las ataguías, el autor ha tratado de atenuar considerablemente estos inconvenientes vulgarizando el empleo de las telas impermeables.

En agua tranquila, el sistema consiste en aplicar por la parte exterior de un recinto único de pilotes y tablestacas, una tela impermeable. Para asegurar la impermeabilidad, la tela se repliega un poco sobre el fondo, y sobre este repliegue se pone una pequeña sobrecarga de arena, tierra ó arcilla.

En agua corriente pueden producirse perturbaciones considerables que produzcan el arrastre de la sobrecarga y comprometan la impermeabilidad de la ataguía. Para evitar esto se construye alrededor del primer recinto un segundo recinto de pilotes y tablestacas, y de este modo la tela está bañada por agua tranquila, y no hay peligro de que la sobrecarga del fondo sea arrastrada.

Antes de emplear las telas, hay que tenerlas en remojo cuatro ó cinco días, para que experimenten toda la contracción de que son susceptibles, que viene á ser de 5 por 100 en todos sentidos.

Luz artificial con los mismos caracteres que la luz del día.

En el *Journal of the Society of Arts* se ha publicado una memoria presentada á la Asociación británica por los Sres. Arthur Dufton y Walter M. Gardner, de la cual damos el siguiente extracto:

Es sabido que muchos colores cambian cuando se ven con luz artificial. Así, un color que de día es verde, parece pardo rojizo á la luz del gas, el violeta aparece como púrpura, el gris heliotropo, etc. Con la luz eléctrica de arco, los cambios de color son análogos, pero menos marcados.

Creemos interesante explicar brevemente cómo se operan estos cambios. El color de un objeto depende, en primer lugar, de la naturaleza de la luz incidente. Con luz roja monocromática el rojo aparece como de día; pero el amarillo parece rojo, el gris casi negro, mientras que el azul y el violeta parecen rojos.

La luz del gas tiene un espectro continuo que va del rojo al violeta; pero comparada con la luz del día resulta de color anaranjado, debido á que en ella predominan los rayos rojos, anaranjados y amarillos. No resulta de esto, sin embargo, que todos los colores deban aparecer más rojos á la luz del gas. Se sabe que la mayor parte de los colores cambian relativamente poco en estas condiciones.

Este efecto es debido á la propiedad que posee la vista de modificarse según las circunstancias. Si el rojo aumenta en la luz, los ojos se hacen menos sensibles al rojo; si en la luz no hay rayos verdes, los ojos se hacen más sensibles para el verde. Las personas que trabajan continuamente con luz de gas, dejan muy pronto de observar su color anaranjado. Resulta de esto que el color gris, producido por la mezcla de blanco y negro, aparece siempre gris cualquiera que sea el alumbrado, y que los colores simples, como el rojo, el anaranjado y algunos verdes correspondientes á una parte limitada del espectro, experimentan poca variación.

Sin embargo, en general, el color de un objeto es debido á una mezcla de luz que proviene de diversos lugares del espectro. Todos los colores violetas son transparentes, no sólo para la luz violeta, sino también para las luces roja y azul; los colores azules transmiten, no solamente las luces azul, violeta y verde, sino también las rojas. Por consiguiente, siempre que el azul ó el violeta entran en la composición de un color terciario, resulta que el color tiene rayas brillantes en diferentes partes del espectro. Una mezcla de rojo, azul y amarillo, de la que resulta un color gris neutro, da rayas brillantes en el rojo y el verde, colores complementarios, produciendo una cierta proporción de luz blanca. Según la posición exacta y la intensidad de estas rayas, el gris aparecerá rojizo, ó verdoso, ó no cambiará á la luz del gas.

En general, los colores parecen más rojos con la luz artificial. Este efecto, es debido, no solamente á la naturaleza más rojiza de la luz artificial comparada con la del día, sino también, y principalmente, á la transparencia particular de las materias colorantes para la luz roja.

En colores rojos y amarillos, poseemos muchas materias colorantes perfectas, desde el punto de vista teórico. Esta perfección, consiste en una gran absorción para los rayos violeta y azul, y una perfecta transparencia para los rayos verde, amarillo, anaranjado y rojo. Un color azul perfecto, debe ser transparente para el violeta, el azul y el verde, y opaco para el resto del espectro. Un azul de esta clase sólo puede obtenerse con las sales de cobre; las demás materias colorantes azules dejan pasar más ó menos luz roja. Los verdes dejan igualmente pasar luz roja. Esta transparencia particular de los colores para la luz roja, es de una importancia capital en el arte del tinte. Todos los tintoreros saben cuán persistente es la tendencia al desarrollo del rojo en los colores compuestos.

La necesidad de una luz artificial que permita ver los colores como de día, hace mucho tiempo que se deja sentir. Para esto se emplea, generalmente, el arco eléctrico, pero el resultado no es enteramente satisfactorio.

La naturaleza particular de la luz del día, es debida esencialmente á la modificación que la atmósfera produce en los rayos solares. La luz que viene del Norte, y que es la que se emplea generalmente para pintar, carece de rayos rojos, anaranjados y amarillos, y es, por consiguiente, azul si el cielo está despejado.

Partiendo del principio de que la luz del arco eléctrico es la que más se parece á la luz del día, los autores han tratado de imitar ésta, obteniendo por absorción directa el efecto de dispersión de la atmósfera. La luz de una lámpara de arco tiene dos partes muy diferentes: primera, la luz producida por los carbones candentes, y segunda, la luz del arco, caracterizada por su riqueza de rayos violados. En las lámparas cerradas, la longitud del arco aumenta, y aumentan por lo tanto los rayos violados. Aunque estas lámparas puedan tener una proporción mayor ó menor de rayos de esa clase, tienen, sin embargo, todas el carácter común de contener más rayos rojos, anaranjados y amarillos, en proporción de los verdes y azules, que la luz del día, por consecuencia de la permeabilidad particular de los colores para la luz roja; es de capital importancia que la proporción de luz de este calor se regule con mucho cuidado. Las variaciones pequeñas en el violado, tienen menos importancia porque la vista es menos sensible para los rayos de este color, y también porque en la mezcla de los colores no hay la misma tendencia á la producción de rayas violadas, como ocurre con el rojo, puesto que los colores amarillos, generalmente, son absorbidos completamente por el violado.

La absorción necesaria de los rayos menos refrangibles, puede efectuarse por medio de sales y azules de cobre. La solución de sulfato de cobre, tiene una facultad considerable de absorción en la extremidad roja del espectro, facultad que va disminuyendo hacia el verde.

En la práctica, se modificará la luz de las lámparas de arco, haciéndola pasar á través de globos de color azul claro obtenido con sales de cobre.