

MEMORIAS CIENTÍFICAS I LITERARIAS.

MATEMÁTICAS APLICADAS. La parabólica.—Estudio del ingeniero don José Agustín Verdugo, relativo al trazado de curvas en los ferrocarriles de futuro.—1879.

Admira ver que desde el trazado del primer ferrocarril hasta el último, con solo la exepcion del de Festiniog, lo hayan sido por el sistema invariable de rectas tanjentes o arcos de círculo de *un solo centro*, siendo jeneral este método, aun para las curvas denominadas estrechas, por ser trazadas con radios de la menor dimension. Los primeros ferrocarriles se delinearon en esa forma, i así han sido todos los otros hasta el último: aquellos tenían curvas abiertas i gradientes módicas, que no presentaban inconvenientes en la práctica; i éstos, apremiados por las dificultades de un suelo sinuoso, han llegado a la curva estrecha, que los presenta tanto mas graves, cuanto que esos suelos sinuosos son mas escarpados, habiendo que vencer en ellos fuertes gradientes, i que en no pocos casos son una verdadera dificultad. Repito que admira ver cómo esos inconvenientes i la necesidad de evitarlos, hayan pasado tan desaperecidos, que, o no se ha ocurrido, o no se ha querido estudiar el modo de hacerlo.

A tal extremo ha sido jeneral en el mundo, al ménos hasta el año 1870, i lo es en Chile hasta el presente, el sistema de delinear ferrocarriles con rectas tanjentes a curvas de un solo centro, aun en el caso de ser las mas estrechas i en fuertes pendientes, que puede decirse con razon lo que dice Spooner, que todos esos trazados se hacen *por rutina* i sin acordarse del estudio que ordena la ciencia.

Esa rutina i falta de estudio científico, criticados por Spooner, no solo es referente al trazado, sino que lo es, i mui principalmente, al aforo de los ferrocarriles, es decir, al ancho o distancia de los rieles; pero prescindiendo por ahora del estudio de este último punto, sigamos a Spooner en lo relativo al trazado del ferrocarril de Festiniog, que se presenta como exepcion i modelo.

En dicho ferrocarril de Festiniog no se estableció ninguna curva de mediana o mayor estrechez con un solo centro, sino que se

las trazó parabólicas de tres i cinco centros, aumentando el número de estos centros en proporcion a la estrechez de la curva que habia necesidad de adoptar.

Antes de entrar en materia, convendrá hacer una esplicacion de la parabólica i su trazado. Con un radio determinado, trácese un arco de círculo; por los extremos de ese arco i el centro tiréuse prolongados los radios respectivos; sobre ámbas prolongaciones de esos radios i con medidas iguales aplicadas desde el centro, fíjense nuevos centros con los que se continúa el trazado de la curva a uno i otro extremo con arcos iguales: aquel arco i sus prolongaciones, formará una parabólica de tres centros. Si se repite igual trazado de prolongacion de radios i arcos extremos, se tendrá la parabólica de cinco centros, etc. Esa curva, compuesta de un arco central de radio menor, prolongada en ámbos extremos con arcos iguales trazados con radios que van en aumento progresivo, es enteramente simétrica, i por presentar sus ramas en forma idéntica a la parábola, se la denomina *parabólica*.

Convendrá tambien hacer un sucinto exámen de la fuerza motriz de la máquina de un ferrocarril, i de las funciones de ésta sobre los rieles. La fuerza motriz de la máquina es circular continuada del eje de la máquina i las ruedas a él adheridas; ese movimiento circular continuado impele a la máquina sentada en los rieles a una marcha recta i perpendicular al eje motor, i estando esos rieles en perfecto nivel relativo i líneas rectas paralelas, la máquina debe marchar en perfecta estabilidad i sin rozamiento lateral. Para alterar esa direccion recta i estable, será preciso hacer una de dos cosas: ya la de variar la direccion de los rieles, o ya la de variar su nivelacion relativa: en el primer caso se tiene un rozamiento de las pestañas de las ruedas de la máquina en el riel esterno o del estrados de la curva que se haya dado a los rieles; i en el segundo se tendrá un resbalamiento lateral i hácia el riel mas bajo que tambien producirá un rozamiento de la pestaña de la rueda sobre ese riel: el primer rozamiento proviene de la fuerza centrífuga de la máquina que se la obliga a recorrer una curva, cuando su fuerza motriz es recta i perpendicular al eje motor; i el segundo proviene de la fuerza centrípeta hácia la parte mas baja, i que la ocasiona la pesantes de la máquina.

Igualmente convendrá tener presente, que cuando una máquina i su tren recorren una curva de ferrocarril, las ruedas que marchan sobre el riel del estrados, a mas de su movimiento circular llevan otro de resbalamiento sobre ese riel, resbalamiento que está

medido por la mayor longitud del riel del estrados sobre el riel del intrados de esa curva, cuya diferencia en una circunferencia está medida por la fórmula $2\pi a$, siendo π la razón de la circunferencia al diámetro, i a el aforo o distancia en que se han colocado los rieles.

Sentadas las precedentes esplicaciones, muy supérfluas para profesores, pero muy necesarias para los que no tienen la profesión de ingenieros, es llegado el momento de entrar en materia para el estudio de las curvas de un ferrocarril.

Queda entendido que todo ferrocarril, en sus rectas, debe tener sus rieles en perfecto nivel relativo; i que en las curvas el riel del estrados debe colocarse mas alto que el riel del intrados, siendo necesario este desnivel para compensar la fuerza centrífuga con la centrípeta: esta diferencia del nivel relativo en los rieles de una curva debe ser tanto mayor, cuanto mas corto sea el radio del arco de círculo que forma esa curva, es decir, cuanto mas estrecha sea esa curva.

En la práctica, esa transición del perfecto nivel relativo de los rieles de la recta tanjente al desnivel de los rieles de la curva, no puede hacerse sino gradual en una longitud determinada del riel del estrado, quedando esa parte de la curva sin tener los rieles el desnivel relativo necesario para la perfecta estabilidad de la máquina i su tren, de cuya causa se orijinan los inconvenientes que a continuación se enumeran.

1.º Un choque de la pestaña de las ruedas con el riel del estrados en el punto de contacto de la tanjente i curva, siguiéndose un fuerte rozamiento de la pestaña en el riel, que no cesa hasta haber llegado el rodado al local en que el riel del estrados está en la altura necesaria sobre el riel del intrados.

2.º A causa de ese choque i rozamiento consecutivo, se dañan ruedas i rieles, se disloca la posición de éstos, se tiene oscilación en los rodados, i de ello nace la necesidad de moderar la marcha para evitar desrielamientos.

3.º Ese choque i rozamiento consecutivo, son tanto mas fuertes, i de mayor trascendencia, cuanto mas corto es el radio de la curva, i es tanto menor i ménos fuerte cuanto mayor es ese radio.

Es necesario establecer algunos antecedentes relativos a la práctica, que consisten en fijar los radios máximo i mínimo del ferrocarril que se haya de trazar, cuyos radios deben siempre ser proporcionados al aforo, es decir, mayores en el aforo ancho i medianos o menores en los aforos angostos o estrechos. Cualquiera

que sea ese aforo, siempre se tendrá que en las curvas de gran radio, el choque en el punto del tanjentismo i rozamiento consecutivo son insensibles: acortando sucesivamente ese radio se llega a un límite en que desapareciendo esa insensibilidad, principian a hacerse ostensibles: la práctica ha fijado ya ese radio que podemos denominar máximo, i con el cual i los mayores que él, puede trazarse una línea férrea sin necesidad de tomar en su locacion otras precauciones que las muy conocidas: pero si se continúa acortando el radio, se pasará a las curvas medias en todos sus grados, i se llegará a la que debe aceptarse como límite de la mas estrecha, i a cuyo radio podemos denominar mínimo. Para esas curvas de radios medios en todos sus grados hasta el mínimo, es indispensable, en un buen trazado, adoptar la parabólica de tres, cinco o mas centros, que tan perfecto resultado produjo en la línea de Festiniog. Un corto raciocinio basta para la demostracion de esta necesidad.

Se ha dicho i sentado como verdad, que para pasar de la recta tanjente cuyos rieles deben estar en perfecto nivel relativo, a la curva, cuyos rieles deben estar en un desnivel tambien relativo i proporcionado al cierre o estrechez de ella, no puede hacerse sino es alzando gradualmente el riel del estrados de la curva; i desde que esa transicion del nivel relativo haya de hacerse precisa i necesariamente de un modo gradual i progresivo, lo natural i lógico seria hacer el cierre de la curva adoptando el mismo sistema gradual i progresivo. Así se tendrá un desnivel en alza gradual sucesiva del riel del estrados al entrar en la curva, que se aplicará sin ningun inconveniente a un cierre o estrechez tambien gradual i sucesivo de esa curva, quedando en todas sus localidades compensada la fuerza centrifuga del rodado al hacer su marcha circular, con la centrípeta que proviene del desnivel de los rieles: lo que se dice relativo a la entrada de la curva debe quedar entendido que tambien se refiere a la salida de ella, por ser la curva i su locacion enteramente simétrica.

La aplicacion de esa curva de cierre gradual i progresivo a la entrada, i de abertura tambien gradual i progresiva a la salida que hemos denominado *parabólica*, al trazado de las líneas férreas, por el hecho de evitar choques, rozamientos fuertes i oscilaciones, produce la ventaja de poder ir mas adelante de lo acostumbrado en el acortamiento del radio mínimo, i el poder recorrer la línea con mayor velocidad en la marcha.

Supérfluo parecerá decir que el estudio para la fijacion de los radios máximo i mínimo para la fijacion de los arcos extremos de

la parabólica i el número de centros que ésta haya de tener, es fácil i mui fácil, sabiéndose que deben tomarse en consideracion: 1.º el aforo del ferrocarril en proyecto: 2.º la altura que haya necesidad de vencer: 3.º la mayor o menor capacidad de los carros que hayan de adotarse, i de consiguiente la distancia de las ruedas de esos carros: i 4.º la velocidad con que hayan de marchar los trenes.

Para poner mas en claro la aplicacion de la parabólica, supon-gamos adoptados los radios máximo i mínimo de un ferrocarril en proyecto. En la práctica pueden ocurrir dos casos: 1.º tener que trazar una curva cuyo radio esté comprendido entre el máximo i el mediano: en este caso se aplicará la parabólica de tres centros; es decir, la que tiene en cada extremo un pequeño arco del radio máximo: 2.º tener que trazar una curva, cuyo radio esté comprendido entre el mediano i el mínimo: en este caso se adoptará la parabólica de cinco centros, es decir, la que tiene en cada extremo un pequeño arco del radio máximo, i a continuación de cada uno de éstos, pequeños arcos de radio intermedio al máximo i al de la curva central. La curva de siete centros solo deberá aceptarse en aquellos casos escepcionales de haber necesidad de establecer una curva con radio mas corto que el prefijado como mínimo.

Es verdad que habrá una mayor dificultad científica, i necesidad de un nuevo estudio i aprendizaje para algunos injenieros; pero obligacion de ellos es hacer ese estudio para resolver en el terreno las dificultades de un buen trazado de la línea férrea que le esté encomendada, i por ese medio evitar los males enumerados, que no solo son gasto i estropeo de rieles i ruedas, sino que tambien lo son de peligro i retardo en la marcha de los trenes.

Hasta aquí la teoría de la curva en cuestion, adoptada únicamente en el ferrocarril de Festiniog a Portmadoc: veamos en seguida de un modo práctico los buenos resultados que ella produjo en ese camino, haciendo una relacion suscita de su establecimiento, i los esperimentos que anotaré en seguida, cuyos esperimentos hablarán mas alto que cualquiera argumento que se pretenda hacer en pro o en contra.

Ferrocarril de Festiniog.—Aforo, un pié once i media pulgadas (1' 11½"): largo, trece i cuarta millas, venciendo una altura de setecientos piés (700' en 13¼ millas): gradientes, 1 en 186, 1 en 92, 1 en 74, i 1 en 68,69: radios, desde 8 a 3 cadenas (una cadena 66'), i radio mínimo 1¼ cadenas con longitudes hasta de 200', es decir, 99º de arco: desnivel en los rieles hasta tres pulgadas.

Este ferrocarril, por lo mui accidentado del terreno, es una sucesion de curvas de todos los radios indicados.

Carros de carga para carbon miden: largo, 8.'10": ancho, 4.'5": profundo, 2.'11": pesan, 13 quintales: cargan neto, 2 toneladas: ángulo de estabilidad, 42°30': *carros de pasajeros*, de primera 8 asientos, de segunda i tercera 12 asientos.

En los dias 11, 12, 16, 17 i 18 de febrero de 1870, i con el fin de experimentar las máquinas recién inventadas por el ingeniero Fairlie, concurren a Portmadoc cuarenta i seis personajes, formando un consejo presidido por el Duque de Sutherland, todos ellos de suficiente importancia por sus conocimientos i práctica de ferrocarriles, los unos por ser presidentes o directores de alguna asociacion de ferrocarril, i la mayor parte por ser profesores de notabilidad o ingenieros jefes de alguna línea férrea. Esos personajes representaban líneas férreas de Inglaterra, Francia, Rusia, Alemania, Suecia, Noruega, India, etc. Puede decirse en realidad que fué un congreso de profesores.

Largo sería describir el detalle de las actas que se levantaron en esos dias, todas ellas relativas a los variados experimentos de las máquinas Fairlie, i con presiones de 130 hasta 180 libras. Entre esas actas, la relativa al 17 de febrero hace mas relacion a la bondad del ferrocarril i el buen efecto de su trazado por la adopcion de la parabólica. En ese dia la máquina *Little-Wonder* de 19½ toneladas peso, partió de Portmadoc con un tren de 140 carros planos vacíos, i 7 cargados de carbon, total 147 carros, ocupando un trayecto de 1,323 piés, i representando un peso de 100 toneladas 16 quintales i 2 libras. Subió de Portmadoc a Dinas con velocidad media de 12½ millas por hora, i máxima de 16½ millas por hora: bajó de Dinas a Portmadoc, parte con velocidad de 30 millas por hora, i parte mayor de 25 millas por hora. En todas velocidades la máquina i tren marcharon con perfecta estabilidad en los rieles.

Ese consejo de profesores ingenieros arribó a varias conclusiones científicas, i comisionó al ingeniero M. C. E. Spooner para que las reprodujese, como lo hizo en su obra titulada *Narrow-Gauge Railways*, publicada en Lóndres el año 1871.

Entre esas conclusiones, figuran en primera línea: 1.º la perfeccion del invento del ingeniero Fairlie, cuyas máquinas reunian las condiciones de pequeñez, fuerza, economía de 25 0/10 en el combustible, i la facultad de poder recorrer vías de doble vuelta: 2.º la perfeccion del trazado del ferrocarril de Festiniog, que mediante

sus curvas parabólicas, pudo ser recorrido con todas velocidades en perfecta estabilidad de todo el tren: i 3.º que mediante las dos precedentes perfecciones, en el futuro no debía aceptarse mayor aforo que el mui necesario para tener carros de capacidad suficiente a trasportar los mayores bultos del comercio a que fuese destinado el ferrocarril en proyecto, condenando por falta de economía aun el aforo de 4 piés ocho i media pulgadas, denominado angosto, i adoptado por la mayoría de las naciones.

Consecuentes con esta última conclusion recomiendan los aforos de 2.'6" i 2.'9", reputándolos como los mas económicos i suficientes para cualquier tráfico, por poder tener carros de dos pares de ruedas con ángulo de estabilidad de 42º30', i las siguientes capacidades para carga de carbon.

Aforo de 2.'6" largo 11.'3": ancho 5.'7": profundo 3.'9": altura sobre los rieles 2'1": peso de cada carro 1½ toneladas; i peso neto de la carga 6 toneladas.

Aforo de 2'9": largo 12.'4" ancho 6'2": profundo 4'1" altura sobre los rieles 2'4": peso de cada carro 2 toneladas; i peso neto de la carga 6 toneladas.

Estos aforos, denominados estrechos, tienen la ventaja de poder seguir las sinuosidades de un terreno accidentado con facilidades i economías mui superiores sobre los aforos anchos. Baste saber que los radios de 207 piés para el primero, i 250 piés para el segundo, corresponden a curvas equivalentes al radio de 1,000 piés para el aforo de 5½ piés.

Comparando el aforo de 2'9" con el de 5'6" halla Spooner las siguientes ventajas económicas: 1.º de un 35 a 37 0/0 en el establecimiento i equipo de la línea: 2.º de un 8 a 10 0/0 en la conservacion del equipo i línea: 3.º de un 15 a 17 0/0 en el costo de los fletes. Tambien anota un 15 a 17 0/0 ventaja de suavidad en la mejor reparticion de la gradiente.

Pero el tratado de los aforos es largo, merece el estudio concienzudo que le dedicó Spooner en la obra citada, i tratándose de las curvas en especial, no se debe ir mas allá de la parte en que puedan tener relacion, que por cierto es poca cosa, i que consiste en la siguiente vulgar apreciacion: el mal trazado de las líneas férreas ha hecho i hace temibles las oscilaciones de los rodados a la entrada i salida de las curvas estrechas, i para evitar los siniestros que pueden ocasionar esas oscilaciones, no han sabido hacerlo de otro modo que aumentando el ángulo de estabilidad por el ensanche de la base de los rodados, es decir, aumentando el aforo.