Algunas consideraciones para elegir una Locomotora apropiada para fuertes gradientes

Por

CARLOS KRUMM

La práctica actual ha aceptado ya que las locomotoras de cremallera sólo deben usarse cuando se trata de arrastrar trenes en gradientes de 70 ‰, o más. Bajo 7% se usan locomotoras de simple adherencia.

La adherencia relativamente alta que requieren estas locomotoras puede obtenerse de dos maneras, sea incrementando el coeficiente de adherencia por medio de la arena o aumentando el peso de la máquina.

Cifras usuales para los coeficientes de adherencia son:

150 a 180 kgs. por ton. sin arena.
200 a 300 kgs. por ton. con arena.

En las nuevas locomotoras tipo 1—E—1 del ferrocarril de Halbertstadt-Blankenburg, en el Harz. se han obtenido, con areneros especiales más de 300 kg|tn. (1)

Esta cifra permite mayores esfuerzos de tracción, en consecuencia exige cilindros de mayor capacidad y un caldero relativamente más potente.

El peso adherente importa que sea lo mayor posible en relación con el peso total de la máquina y ténder. Esto lo veremos más claramente en el análisis que se hace en seguida.

---

(1) Glasers Annalen, año 1922.- N.o 1079.—

Sean:

L.—El peso de la locomotora y ténder en servicio, en tons.

Q.—El peso del tren de vagones en toneladas.

L_a.—El peso adherente de la locomotora en toneladas.

f.—El rozamiento entre la rueda y el riel, (150 á 300 kg|ton.)

w_l.—La resistencia de la locomotora y ténder en kgs. por ton.

w_q.—La resistencia del tren en kgs. por ton.

i.—La pendiente en tantos por mil.

a.—La relación: $\dfrac{L}{L_a}$.

La ecuación que relaciona el esfuerzo de tracción con las resistencias del tren y la locomotora es entonces:

$$f.\ L_a = L(i+w_l) + Q(i+w_q)$$

de donde se deduce:

$$\frac{Q}{L} = \frac{\dfrac{f}{a} - (i + w_l)}{i + w_q} \qquad (1)$$

Esta ecuación da la relación que existe entre el peso del tren y la locomotora, incluso el ténder. Es válida para el caso de que la potencia del caldero sea suficiente para arrastrar el peso de que se trata. En otro caso deberá tomarse esa potencia para calcular el esfuerzo de tracción. Siendo Z este esfuerzo de tracción se tendrá:

$$L_a = \frac{Z}{f}, \text{ o sea: } a = \frac{Lf}{Z}$$

Para que «Q» sea igual a cero, es necesario que

$$\frac{f}{a} - (i + w_l) = 0$$

de donde:

$$i = \frac{f}{a} - w_1$$

que nos da la gradiente límite en la cual la locomotora sólo es capaz de arrastrar su propio peso.

La ecuación (1) nos permite trazar una serie de curvas que nos servirán a su vez para estudiar los efectos que se obtienen variando los valores de «f» y de «a».

Estudiaremos a continuación las siguientes locomotoras:

1.—Locomotora cuyo peso es totalmente adherente.—Es una locomotora ténder sin ejes portantes. Corresponde al esquema N.° 1 de una locomotora tipo «Garratt».

2.—Locomotora «Garratt» del ferrocarril de Birmania. Esquema N.° 2.

3.—Locomotora 1-E-1 del ferrocarril de Blankenburg. Esquema N.° 3.

4.—Locomotora «Mikado» de los FF.CC. del E. Red Central Norte.—Esquema N.° 4.

Para estas cuatro locomotoras formamos el cuadro siguiente con los datos que nos interesan:

LOCOMOTORAS		N.° 1	N.° 2	N.° 3	N.° 4
Peso adherente:	L_a	$L = L_a$	81,6 t.	75 t.	47,8 t.
Peso total:	L	100 t.	100,7 t.	100 t.	103,3 t.
Coeficiente:	$a = \frac{L}{L_a}$	1	1,24	1,33	2,17
Coeficiente:	$\frac{f}{a}$				

(1) Para considerar el efecto de las curvas basta observar que la resistencia adicional debida a las curvas puede suponerse como una gradiente suplementaria. Para el caso de curvas de 100 m. de radio, puede tomarse 5 kg|ton., y la pendiente sería

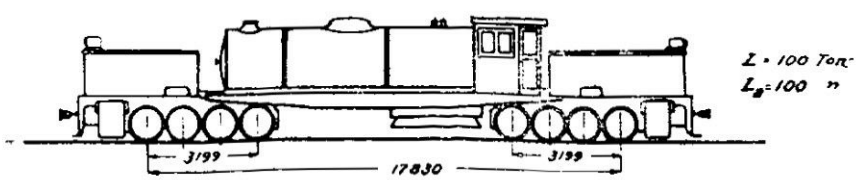
$$i' = i + 5$$

En los gráficos se ha colocado una escala que permite hacer las lecturas tomando en cuenta la resistencia adicional por curvas de 100 m. de radio.

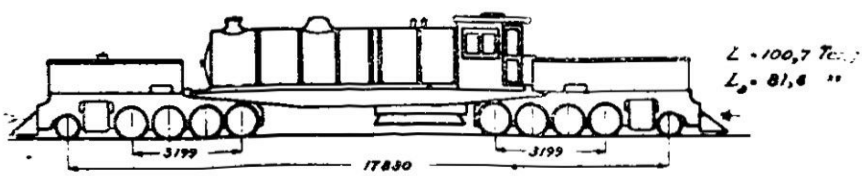
Para «f» = 300 kgs por ton.	300	242	225	138
Para «f» = 200 kgs por ton.	200	161	150	92

Las resistencias del tren se han supuesto iguales a $w_q = 3$ kgs. por tonelada, lo que corresponde más o menos a una velocidad de 20 Klmts. por hora y con equipo de 30 toneladas por carro. Las resistencias de la locomotora se han avaluado por la fórmula de Kiesel, que da para la resistencia total interior de la locomotora el valor:

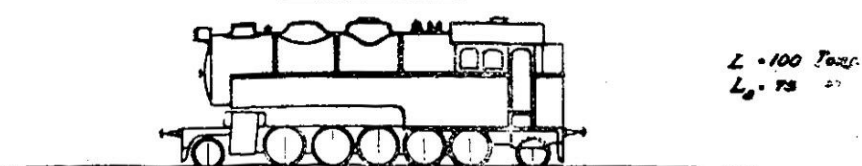
ESQUEMA Nº 1



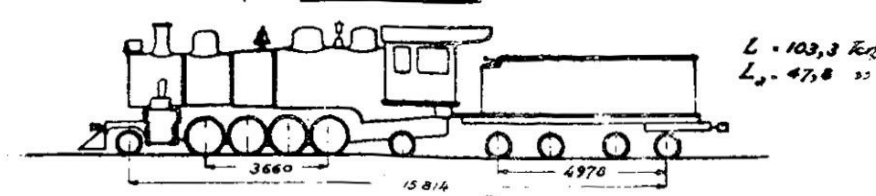
ESQUEMA Nº 2



ESQUEMA Nº 3



ESQUEMA Nº 4



$$R = (10 + 0{,}042\,(n - 1)\,V)\ L_a$$

En esta fórmula:

n.—es el número de ejes acoplados.

V.—La velocidad en Klmts por hora.

A esta resistencia interior se ha agregado la resistencia de la máquina y ténder como vehículo. (El valor de esta resistencia se ha estimado en 8 kgs. por tonelada.) Las máquinas «Garratt» se han considerado como dos locomotoras para los efectos de avaluar las resistencias interiores.

Se ha obtenido así:

Locomotora	N.° 1.—	w_1 =	20 kgs. por tonelada
»	N.° 2.—	» =	18 » » »
»	N.° 3.—	» =	20 » » »
»	N.° 4.—	» =	14 » » »

Estimamos que esta manera de calcular dá valores bastante cercanos de la realidad, pues para el caso de la locomotora N.° 3 se hicieron experiencias dinamométricas obteniéndose para velocidades próximas a 20 Klmts. por hora:—$w_1 = 22$ kgs. por tonelada.

En el gráfico N.° 1 pueden compararse las cuatro máquinas y su comportamiento en diversas gradientes con los coeficientes «f» = 200 kgs. por tonelada y «f» = 300 kgs. por tonelada.

Veamos, por ejemplo, lo que pueden arrastrar las diversas máquinas en 6%.

		Con «f» = 200	Con «f» = 300
Locomotora	N.° 1	190 tons.	350 tons.
»	N.° 2	131 »	262 »
»	N.° 3	110 »	230 »
»	N.° 4	31 »	103 »

Como comprobación de estos resultados tenemos las siguientes experiencias para las locomotoras N.° 3 y 4.

Experiencias del ferrocarril de Blankenburg. Con velocidades de unos 12 Klm. por hora se arrastraron hasta 260 toneladas en 6,2%. Este resultado parece corresponder a un coeficiente «f» un poco mayor de 300 kgs. por tonelada.

Experiencias hechas por el Ing. Sr. Rodolfo Jaramillo, Sub-Director de los FF. CC. del Estado, con una locomotora Mikado de la Red Central Norte. Se pudo arrastrar un tren de 40 toneladas en gradiente de 7% (6,5 de gradiente + 0,5 de curva), ínea explotada en la actualidad con locomotoras de cremallera. Este resultado corresponde a una cifra intermedia entre «f» = 200 y 300 kgs. por tonelada para el coeficiente de adherencia. En realidad corresponde a «f» = 240 kgs. por tonelada o sea, $\frac{1}{4,17}$ escribiendo el coeficiente en la forma más usual.

Efectivamente esta última cifra corresponde a un buen arenamiento, pero nunca igual al de la locomotora N.° 3. (ferrocarril de Blankenburg), que tiene arenamiento doble en todas las ruedas motrices, lo que explica el alto coeficiente «f», superior a 300 kgs. por tonelada.

Del examen de las curvas del gráfico N.° 1 se deducen las siguientes conclusiones:

1.° Importancia del arena miento, o sea del aumento del coeficiente «f».—En el caso concreto de las locomotoras N.° 1 y N.° 4 en gradientes de 6%, vemos que la máquina N.° 1 arrastra seis veces más que la N.° 4 para «f» = 200, pero si hacemos «f» = 300, la máquina N.° 1 arrastra sólo tres y media veces más que la N.° 4.—Se mejoran, pues, relativamente en un 71% las condiciones de la locomotora N.° 4.

2.° Importancia de que el coeficiente «a» sea igual a uno, o en otros términos, conveniencia de que las locomotoras para fuertes gradientes sean locomotoras ténders con todos sus ejes adherentes.

Puede notarse que una locomotora ténder con todos sus ejes acoplados es muy rígida y presentaría dificultades de inscripción en las curvas estrechas de las líneas de montaña. Hay, pues, conveniencia en usar locomotoras articuladas y entre ellas la que parece ofrecer mayores ventajas es la del tipo «Garratt» que, presentando dos bases rígidas separadas se inscribe bien en curvas de corto radio. Además, el caldero que va en cierto modo «colgante» entre las dos máquinas, tiene su eje muy bajo lo que permite darle mayor diámetro compatible con el galibo. Tampoco el diámetro del caldero queda restrinjido en este caso por los depósitos laterales de agua como en las locomotoras ténders corrientes. Hay también mayor amplitud para la parrilla.

La locomotora del estado de Birmania a que nos hemos referido, tiene dos ejes portantes. Se ve que sería posible suprimirlos, disminuyendo el coeficiente actual de «a» = 1,24 á «a» = 1 y aumentar el arrastre en 6% en 60 toneladas para «f» = 200 y en 91 toneladas para «f» = 300.

Examinemos ahora cómo varía el rendimiento con la gradiente en las mismas cuatro locomotoras de que nos hemos ocupado más arriba. El método que emplearemos es el llamado «de las alturas virtuales». (2)

Para que un tren pueda subir una cuesta de altura «h» metros y de largo «1» metros, la locomotora debe efectuar un trabajo mecánico «A» en tonelámetros:

$$A = (L + Q) \left(\frac{w . 1}{1000} + h \right) \qquad (2)$$

Esta ecuación es válida para cualquier velocidad, puesto que las resistencias «w» varían con la velocidad.

Podemos escribir:

$$A = Q.h_v$$

Si llamamos á «h_v» altura virtual y si ponemos,

$$A = T.Q.h$$

tenemos que,

$$T = \frac{h_v}{h}$$

Siendo «T» la relación entre la altura virtual y la altura real podemos llamar a

(2).— Petersen: Die Zweckmässigst Neigung der Eisenbahnen.— Kreidel.— 1921.—

«T» altura virtual específica. Esta altura virtual específica es en realidad el trabajo «A» cuando «Q» = 1 y «h» = 1. Calculemos este trabajo.

Haciendo en (2), «Q» = 1 y «h» = 1 y teniendo presente que para «h» = 1, «l» = $\frac{1000}{i}$, se obtiene:

$$A = T = (L + 1)\left(\frac{w}{i} + 1\right) \qquad (3)$$

Si hacemos «Q» = 1 en la ecuación (1) obtenemos para «L»

$$L = \frac{i + w_q}{\frac{f}{a} - (i + w_l)} \qquad (4)$$

valor que sustituído en (3) da:

$$T = \frac{\frac{f}{a} - (w_l - w_q)}{\frac{f}{a} - (i + w_l)}\left(1 + \frac{w}{i}\right) \qquad (5)$$

En la ecuación:

$$L.\ w_l + Q.w_q = (L + Q).\ w$$

haciendo «Q» = 1 y reemplazando el valor de «L» de la ecuación (1) en la cual se ha hecho también «Q» = 1, despejando «w» se obtiene:

$$w = \frac{\frac{f}{a} w_q + i (w_e - w_q)}{\frac{f}{a} - (w_e - w_q)} \qquad (6)$$

Esta ecuación (6) permite calcular la resistencia total del tren y la locomotora en las diversas gradientes. Derivando una vez la ecuación (5) con respecto a «i» y haciendo $\frac{dT}{di} = 0$, encontraremos el valor de «i» para el cual «T» es mínimo.

Se encuentra fácilmente:

$$i = -w + \sqrt{w^2 + w \left(\frac{f}{a} - w_1 \right)} \qquad (7)$$

Para calcular este valor de «i» se procede por tanteos introduciendo en (7) un valor aproximado de «w» y obteniendo un primer valor aproximado de «i». Este valor se introduce en (6) obteniéndose un valor mejorado de «w» que sirve para encontrar un valor más exacto de «i» en la ecuación (7). Bastan dos o tres cálculos de esta especie para obtener un valor definitivo suficientemente exacto de la gradiente «i».

En el gráfico N.° 2 se han trazado las curvas correspondientes a las mismas locomotoras que analizamos en el gráfico N.° 1. También aquí se han considerado en cada caso los dos coeficientes, «f» = 200 y «f» = 300 kgs. por tonelada.

En el gráfico N.° 2 vemos que la curva con menores ordenadas es la que corresponde a la locomotora N.° 1, con todas sus ruedas adherentes y con arenamiento extraordinario, («f» = 300 k|t).

Esta locomotora trabaja económicamente entre límites muy amplios; entre 10 y 70 por mil. En 10 por mil el trabajo en tonelámetros es de 1,48 y en 70 por mil es también de 1,48, o sea prácticamente igual. En cambio si consideramos la locomotora N.° 4 entre los mismos límites de gradiente y las mismas condiciones de arenamiento, vemos que el trabajo aumenta en 71%. La locomotora N.° 1 tiene un buen rendimiento entre 10 y 70 por mil, en cambio la N.° 4 sólo tiene un rendimiento aceptable entre 10 y 30 por mil. Si consideramos ahora la locomotora N.° 4 con arenamiento corriente («f=200 k.t.) vemos que tiene su mejor rendimiento entre límites más estrechos aún, o sea, entre 10 y 20 por mil con un valor mínimo de «T» alrededor de 16 por mil.

Entre las dos curvas, que corresponden a la locomotora N.° 1 con arenamiento extraordinario y a la locomotora N.° 4 con arenamiento mediano, se encuentran comprendidas las curvas correspondientes a las otras dos locomotoras y a los dos casos restantes de las locomotoras N.° 1 y 4.

En suma, desde el punto de vista del trabajo mecánico hay también conveniencia en que todas las ruedas sean adherentes y que se disponga de una arenamiento especial.

Resumiendo podemos expresar como conclusión de este estudio:

Las locomotoras para fuertes gradientes no deben construirse con ténder como vehículo separado sino que el agua y el combustible deben contribuir a aumentar el peso adherente, evitándose además el arrastre de la tara del ténder.

Si es posible, todas las ruedas deben ser adherentes y deberá disponerse siempre de areneros especiales para sacar el mayor provecho posible del peso adherente de la máquina.

CUADROS QUE SIRVEN DE BASE PARA EL DIBUJO DE LOS GRAFICOS

LOCOMOTORA N.° 1

$w_t = 20$ kgs. $w_q = 3$ kgs.

$\frac{f}{a} = 200$ $\frac{f}{a} = 300$

i	$\frac{Q}{L}$	w	T	$\frac{Q}{L}$	w	T
0,5%	21,9	3,7	1,83	34,4	3,5	1,82
1	13,1	4,2	1,52	20,8	3,8	1,48
2	7,0	5,1	1,44	11,3	4,4	1,35
3	4,5	6,1	1,46	7,6	5,0	1,31
4	3,3	7,0	1,54	5,6	5,6	1,34
5	2,5	7,9	1,64	4,3	6,2	1,38
6	1,9	8,8	1,74	3,5	6,8	1,42
7	1,5	9,8	1,89	2,9	7,4	1,48

T mín. para i = 27 T mín. para i = 33

LOCOMOTORA N.° 2

$w_t = 18$ kgs. $w_q = 3$ kgs.

$\frac{f}{a} = 161$ $\frac{f}{a} = 242$

i	$\frac{Q}{L}$	w	T	$\frac{Q}{L}$	w	T
0,5%	17,3	3,8	1,87	27,4	3,5	1,76
1	10,2	4,3	1,57	16,5	3,8	1,47
2	5,3	5,4	1,50	8,9	4,5	1,36
3	3,4	6,4	1,56	5,9	5,2	1,37
4	2,4	7,4	1,68	4,3	5,8	1,42
5	1,8	8,4	1,84	3,3	6,5	1,47
6	1,3	9,5	2,05	2,6	7,2	1,54
7	1,0	10,5	2,30	2,1	7,8	1,63

T mín. para i = 23,5 T mín. para i = 29,1

LOCOMOTORA N.° 3

$w_l = 20$ kgs. $w_q = 3$ kgs.

$\frac{f}{a} = 150$ $\frac{f}{a} = 225$

i	$\frac{Q}{L}$	w	T	$\frac{Q}{L}$	w	T
0,5%	15,6	4,0	1,91	25,0	3,7	1,80
1	9,2	4,7	1,63	15,0	4,0	1,50
2	4,8	5,9	1,57	8,0	4,9	1,39
3	3.3	7,2	1,65	5,3	5,7	1,42
4	2,1	8,5	1,79	3,8	6,5	1,46
5	1,5	9,8	1,99	2,9	7.3	1,53
6	1,1	11,0	2,24	2,3	8,1	1,62
7	0,8	12,3	2,59	1,9	9,0	1,72

T mín. para i = 23 T mín. para i = 28,6.

LOCOMOTORA N.° 4.

$w_l = 14$ kgs. $w_q = 3$ kgs.

$\frac{f}{a} = 92$ $\frac{f}{a} = 138$

i	$\frac{Q}{L}$	w	T	$\frac{Q}{L}$	w	T
0,5%	9,1	4,1	2,0	14,9	3,8	1,87
1	5.3	4,8	1,78	8,8	4,1	1,56
2	2,5	6,1	1,83	4.5	5,0	1,52
3	1,5	7,5	2,11	2,8	5,8	1,60
4	0.9	8,8	2,60	1,9	6,7	1,77
5	0,5	10,2	3,50	1,4	7,6	1,98
6	0,3	11,5	5,36	1,0	8,5	2,26
7	0,1	12,9	11,92	0,7	9,3	2,66

T mín. para i = 16 T mín. para i = 20

GRAFICO N° 1

$\frac{Q}{L}$ EN FUNCION DE LA GRADIENTE

———————— f 200 kg/ton

– – – – – – f = 300 "

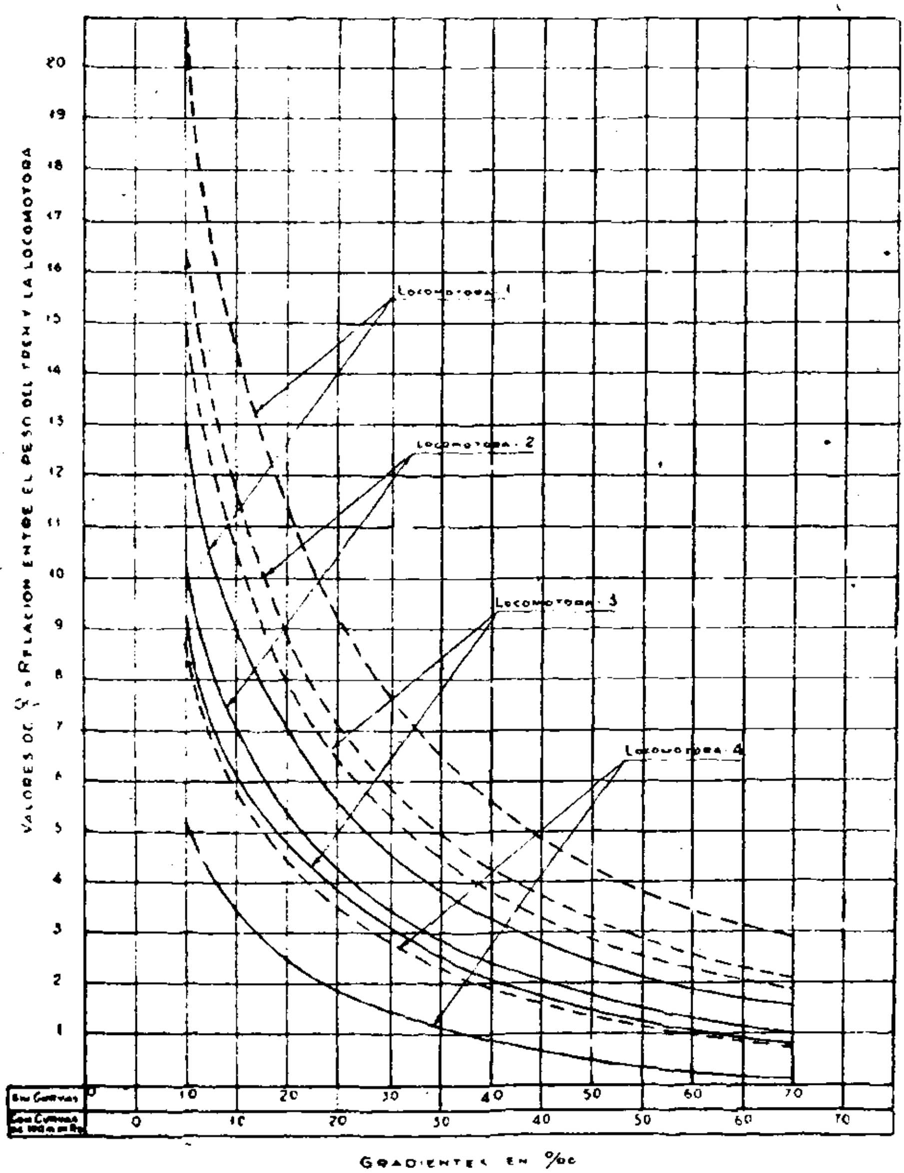


GRÁFICO N° 2

VARIACION DEL TRABAJO MECANICO CON LA GRADIENTE