



Determinación de la carga máxima de una locomotora

Apellidos, nombre	Villalba Sanchis, Ignacio (igvilsan@cam.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de ideas clave

La carga máxima admisible que puede remolcar una locomotora ferroviaria viene influida por diversos factores de la propia locomotora y de la línea por la que va a circular. Por ello, en el presente artículo se analiza el concepto de carga máxima, carga máxima arrancable y carga máxima remolcable y se muestra, mediante un sencillo ejemplo, su proceso de cálculo.

2 Introducción

En las últimas décadas el transporte de mercancías por ferrocarril está cobrando una mayor relevancia debido a que la Unión Europea está tratando de impulsar su uso mediante la inversión en distintos corredores transcontinentales.

Así pues, un aspecto muy importante a tener en consideración cuando se quieren transportar mercancías por ferrocarril lo constituye la denominada carga máxima. En efecto, previo al inicio de la marcha, es necesario conocer cuál es la masa máxima que puede arrastrar, pues de ella dependerá el número de vagones y la masa total que puede movilizar. Este aspecto cobra especialmente relevancia en el caso de las composiciones formadas por una locomotora, pues una vez conocida la carga máxima que se puede transportar se puede deducir el número máximo de coches o vagones totales que pueden acoplarse.

Otra situación donde es importante conocer la carga máxima se da cuando sobre una determinada línea se quieren incorporar nuevas locomotoras, o bien cuando se modifique alguna de las características técnicas de las existentes.

Con ello, la carga máxima viene influenciada por cuatro factores determinantes, que son:

- El material rodante ha de ser capaz de mantener las prestaciones de frenado, es decir, ha de poder frenar en un espacio concreto.
- El material rodante tiene que poder circular por una determinada línea a una velocidad que permita la correcta explotación de la misma.
- No se deben sobrepasar los esfuerzos máximos en los ganchos que unen los diferentes elementos de la composición.
- El tren ha de ser capaz de arrancar en caso de quedar detenido en cualquier punto de la línea.

Para realizar el cálculo de la carga máxima nos apoyaremos en la norma técnica NT – GGC – 6. La mencionada norma define la metodología a seguir para calcular las cargas máximas admisibles por las locomotoras diésel y eléctricas en las diferentes líneas, teniendo en cuenta tanto las capacidades del material motor como el perfil longitudinal de la propia línea, para una explotación normal.

3 Objetivos

Una vez que el alumnado se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Identificar la importancia de la carga máxima y explicar su importancia en el transporte de mercancías por ferrocarril
- Obtener el valor de la carga máxima para una determinada locomotora.

4 Cálculo de la carga máxima

De manera general, la determinación de la carga máxima se realiza sobre la base de considerar dos parámetros:

- La rampa característica más desfavorable del recorrido del tren.
- La carga máxima de las locomotoras, en función de la rampa característica resultante anterior.

Cabe en este momento destacar que en el ámbito ferroviario se entiende por rampa característica al valor de la rampa ficticia más restrictiva del trayecto considerado, contemplando en él las correcciones correspondientes a las rampas no significativas. De esta forma, la carga máxima representa la carga que técnicamente puede arrastrar una locomotora en condiciones extremas de explotación.

Dicho esto, para calcular la carga máxima de una determinada locomotora, se parte de los siguientes factores:

- Potencia de la locomotora.
- Esfuerzo máximo por adherencia.
- Límite de esfuerzo admisible por los enganches.
- Resistencia al avance del tren.

Con todo, el valor de carga máxima para una determinada locomotora y rampa característica es la mínima entre la denominada carga máxima arrancable y la carga máxima remolcable. A continuación, se determina el cálculo de cada una de ellas.

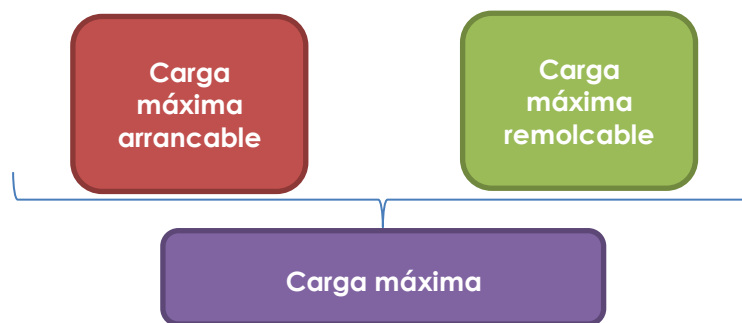


Gráfico 1. Esquema de cálculo de la carga máxima.

4.1 Carga máxima arrancable

La carga máxima arrancable se obtiene como el valor mínimo obtenido de la carga máxima relativa al esfuerzo de arranque de la locomotora y la carga máxima relativa a la adherencia en el arranque.

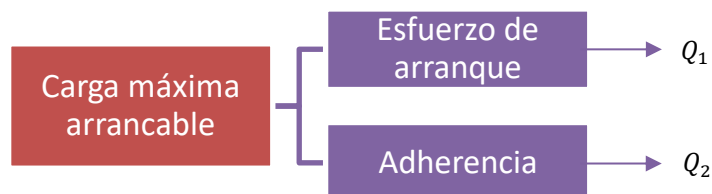


Gráfico 2. Esquema de cálculo de la carga máxima arrancable

En cuanto al primer aspecto, la carga máxima relativa al esfuerzo de arranque se obtiene según la siguiente fórmula:

$$Q_1 = \frac{F_{Maximo} * 10^3}{r_a + i} - M_{Locomotora}$$

Ecuación 1. Expresión de la carga máxima arrancable relativa al esfuerzo de arranque.

donde F_{Maximo} es el esfuerzo tractor máximo en llantas que puede ejercer una determinada locomotora en el arranque (en toneladas); $M_{Locomotora}$ es la masa de la locomotora (en toneladas); r_a es la resistencia específica al avance (daN/t) y i es la rampa característica (en mm/m).

Así pues, el valor de la resistencia específica al avance representa el esfuerzo necesario para producir la iniciación y mantenimiento del movimiento del tren a muy bajas velocidades, en un tiempo aceptable. Para obtener este valor se debe tener en cuenta que, cuando la vía está en horizontal y recta, el esfuerzo necesario alcanza un valor de 4 daN/t. Por otra parte, el esfuerzo acelerador mínimo necesario para arrancar el tren en un tiempo aceptable es de 3 daN/t. Por lo tanto, el valor mínimo es de 7 daN/t.

A medida que la rampa aumenta, el valor de r_a es pues mayor, debido al aumento de la resistencia que presenta el tren, siendo:

r_a (daN/t)	i (mm/m)
7	<15
8	15-20
9	21-25
10	26-29
11	30-33
12	34-37
13	38-41
14	42-45
15	> 45

Tabla 1. Valores de la resistencia específica al avance r_a según la rampa característica.

Por otro lado, la carga máxima arrancable limitada por adherencia se obtiene según la siguiente expresión:

$$Q_2 = \frac{F_{Adherencia} * 10^3}{r_a + i} - M_{Locomotora}$$

Ecuación 2. Expresión de la carga máxima arrancable relativa a la limitación por adherencia.

donde $F_{Adherencia}$ es el esfuerzo tractor limitado por adherencia. Así, durante el período de arranque, el esfuerzo tractor que puede ejercer una locomotora sin producir patinaje de sus ruedas será el siguiente:

$$F_{Adherencia} = \mu_0 * M_{ejes\ motores}$$

Ecuación 3. Expresión del esfuerzo tractor limitado por adherencia.

donde μ_0 es el coeficiente de adherencia estático y $M_{ejes\ motores}$ es la masa de los ejes motores (en toneladas). Este coeficiente estático viene normalmente suministrado por el fabricante y toma valores entre 0,2 y 0,4.

Conocida la carga máxima arrancable relativa al esfuerzo y la adherencia, se determina como carga máxima arrancable el valor más pequeño de los dos calculados, es decir:

$$Q_{max.arranque} = \min(Q_1, Q_2)$$

4.2 Carga máxima remolcable

La carga máxima remolcable corresponde con el mínimo valor que se obtiene derivado del propio funcionamiento de la locomotora (funcionamiento en régimen continuo o unihorario) así como por adherencia. Veamos su cálculo.

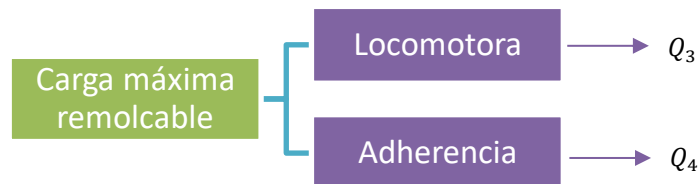


Gráfico 3. Esquema de cálculo de la carga máxima remolcable

En primer lugar, la carga máxima de la locomotora se obtiene considerando su funcionamiento en régimen continuo. Así, la carga máxima remolcable derivada del propio funcionamiento de la locomotora se obtiene según la siguiente ecuación:

$$Q_3 = \frac{10^3 * F_C - [E_L + M_{Locomotora} * (i + 1)]}{r + i + 1}$$

Ecuación 4. Expresión de la carga máxima remolcable derivada del propio funcionamiento de la locomotora.

donde F_C es el esfuerzo tractor en llanta en régimen continuo; E_L es la resistencia al avance y r la resistencia específica al avance en daN/t.

Para trenes de mercancías, el valor de E_L y r se obtiene como:

$$E_L = 0,65 * M_{Locomotora} + 13 * n + 0,01 * M_{Locomotora} * V + 0,03 * V^2$$

$$r = 2 + \frac{V^2}{1600}$$

Ecuación 5. Expresión la resistencia al avance y la resistencia específica al avance.

donde n es el número de ejes de la locomotora y V es la velocidad del tren (en km/h).



De forma más específica, la norma proporciona expresiones de la resistencia al avance en locomotoras según el número de ejes, siendo:

$$E_L = 100 + 0,8 * V + 0,03 * V^2$$

para locomotoras de 4 ejes (en daN)

$$E_L = 150 + 1,2 * V + 0,03 * V^2$$

para locomotoras de 6 ejes (en daN)

Por otro lado, se calcula la carga máxima remolcable teniendo en cuenta la limitación por adherencia mediante una expresión análoga a las anteriores:

$$Q_4 = \frac{10^3 * F_\mu - [E_L + M_{Locomotoras} * (i + 1)]}{r + i + 1}$$

Ecuación 6. Expresión la carga máxima remolcable según la adherencia.

donde F_μ es el esfuerzo tractor en llanta en régimen continuo.

Conocida la carga máxima remolcable relativa a la locomotora y la adherencia, se determina como carga máxima remolcable el valor más pequeño de los dos calculados, es decir:

$$Q_{max.remolcable} = \min (Q_3, Q_4)$$

Con todo ello, la carga máxima de la locomotora se obtiene como el valor mínimo de los calculados, es decir, el que resulte más pequeño de los cuatro valores calculados previamente:

$$Q_{max} = \min (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)$$

Según determina la norma, los valores resultantes se expresan en toneladas, se redondean por exceso a la decena superior y se representan en la denominada tabla de cargas máximas.

5 Ejemplo de aplicación

A partir de estas formulas anteriores, en este apartado se lleva a cabo la aplicación de la metodología planteada previamente. Para ello, se calculará la carga máxima arrancable y remolcable, lo cual permite determinar la carga máxima para una locomotora. En este ejemplo la locomotora escogida es la serie 253 de Renfe, por ser una locomotora muy usada en el transporte de mercancías en España.



Gráfico 4. Locomotora serie 253 de Renfe.

Los datos relativos a esta locomotora son:

- Potencia total: 5.400 Kw / 7.337 CV
- Esfuerzo tractor al arranque: 300 kN
- Esfuerzo tractor máximo limitado por adherencia: 276 kN
- Masa: 87 t (21,8 por eje, la cual posee 4 ejes)
- Velocidad en régimen continuo: 65 km/h
- Adherencia en el arranque: 0,35162
- Coef. Adherencia (a 65 km/h): 0,1828
- Rampa característica considerada: rango entre 0 y 10 milésimas.

Con estos datos vamos a seguir el proceso de cálculo.



Antes de seguir con el proceso, ¿cuál crees que es la carga limitante, la carga arrancable o remolcable?

En primer lugar, vamos a calcularnos tanto la resistencia al avance como la resistencia específica al avance, con las ecuaciones descritas en el apartado anterior:

$$E_L = 100 + 0,8 * V + 0,03 * V^2 = 100 + 0,8 * 65 + 0,03 * 65^2 = 278,75 \text{ (daN)}$$

$$r = 2 + \frac{V^2}{1600} = 2 + \frac{65^2}{1600} = 4,64 \left(\frac{\text{daN}}{t} \right)$$

Tras esto, ya podemos determinar la carga máxima arrancable, usando para ello el esfuerzo tractor máximo limitado por adherencia al ser el menor de los dos esfuerzos (arranque y adherencia). Puesto el valor de la resistencia específica al avance r_a es función de la pendiente (ver tabla 1), los resultados se obtienen en función de la misma.

$$Q_{max. arranque} = \min(Q_1, Q_2) = \frac{\min(F_{Maximo}, F_{Adherencia}) * 10^3}{r_a + i} - M_{Locomotora} \approx \frac{27,6 * 10^3}{r_a + i} - 87$$

Rampa, i, (milésimas)	$Q_{max. arranque}$ (t)
0	4283
1	3736
2	3312
3	2972
4	2694
5	2462
6	2266
7	2098
8	1952
9	1825
10	1712



Como se puede apreciar, la carga máxima arrancable depende de la rampa característica. A medida que aumenta la rampa, la carga máxima remolcable disminuye.

Una vez calculada la carga máxima remolcable y con las resistencias al avance calculadas al inicio del ejemplo, es momento de llevar a cabo el cálculo de la carga máxima arrancable. Para ello, se tiene:

$$Q_3 = \frac{10^3 * F_C - [E_L + M_{Locomotora} * (i + 1)]}{r + i + 1} \approx \frac{10^3 * 29,9 - [278,75 + 87 * (i + 1)]}{4,64 + i + 1}$$

$$Q_4 = \frac{10^3 * F_{\mu} - [E_L + M_{Locomotora} * (i + 1)]}{r + i + 1} \approx \frac{10^3 * 27,6 - [278,75 + 87 * (i + 1)]}{4,64 + i + 1}$$

$$Q_{max. remolcable} = \min(Q_3, Q_4)$$

Los resultados en función de la rampa característica son:

Rampa, i ,	$Q_{max.arranque}$ (t)	$Q_{max.remolcable}$ (t)	Q_{max}
0	4283	4925	4283
1	3736	4170	3736
2	3312	3613	3312
3	2972	3185	2972
4	2694	2845	2694
5	2462	2570	2462
6	2266	2341	2266
7	2098	2149	2098
8	1952	1985	1952
9	1825	1844	1825
10	1712	1720	1712

Así pues, es importante hacer notar que los resultados muestran, para los valores considerados con rampas características entre las 0 y 10 milésimas, el término que limita la carga máxima es la carga máxima arrancable, por ser la mínima entre las dos cargas calculadas. Esto no siempre es así, por lo que es importante llevar a cabo el cálculo de ambas cargas.

6 Conclusiones

En el presente objeto de aprendizaje hemos aprendido a conocer la importancia de la carga máxima de una locomotora, lo que constituye un valor fundamental pues determina la carga que puede transportar una determinada locomotora en una línea específica.

A lo largo del proceso se puede observar que, partiendo de los valores que caracterizan a una determinada locomotora y en función de la rampa característica se obtienen los diferentes valores de la carga máxima arrancable y la carga máxima remolcable de acuerdo con lo establecido en la Norma Técnica NT – GGC – 6. Con ello, la carga máxima se obtiene como la mínima de entre estas dos cargas.

Finalmente, se ha desarrollado un ejemplo para una locomotora convencional obteniendo los valores de la carga máxima en función de la rampa característica, la cual vienen limitada por la carga máxima arrancable para el rango de inclinaciones considerado.

7 Bibliografía

Norma Técnica NT – GGC – 6 (Renfe)