

# Influencia del número de discos de freno sobre el poder de frenado en trenes de alta velocidad

Liviu Sevastian Bocîi\*

## Abstract

In this paper is presented the influence of the number of brake discs per axle on the brake power in the case of stopping brake of the high-speed railway vehicles. The braking power is considerably influenced by the number of brake-discs on the axle-tree, by their configuration and the maximum load on the axle-tree.

For self-ventilating brake-discs, when increasing the number of brake-discs on the axle-tree from  $n_d = 1$  to  $n_d = 3$  at a braking duration of  $t_b = 50$  seconds and a starting braking speed of  $V = 180$  Km/h, one can remark a decrease of the braking power of 33.32% ( $P_{mfd1} = 356.2$  KW,  $P_{mfd3} = 118.7$  KW).

It is very important to consider this phenomenon when studying the thermal regime of the braking couple elements of disk brake.

**Keywords:** brake disc, kinetic energy, brake power, high speed trains.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de frenado es el principal sistema que interviene entre dos estadios energéticos de un vehículo ferroviario en movimiento modificando los parámetros del estadio energético inicial (la energía cinética  $E_c$  y la velocidad  $V$ ).

La modificación del estadio energético de un vehículo ferroviario es posible debido a las funciones principales de un sistema de frenado, que se presentan en el esquema<sup>1,2</sup> de la figura 1.

Se observa que un sistema de frenado es el elemento que modifica la energía del vehículo desde el momento de su entrada en acción, hasta la anulación de esta energía en el caso de la parada, o hasta el valor de la energía cinética dada por la velocidad que tiene que mantener constante sobre una sección de remolque.

Las principales funciones de un sistema de frenado son las siguientes:

- La función de transformación de la energía cinética del vehículo ferroviario de alta velocidad;
- La función de almacenamiento del resultado de la transformación de la energía cinética (el calor);
- La función de disipación del calor resultado por la fricción (seca o húmeda) entre los elementos del acoplamiento de fricción del freno de disco.

En la mayoría de los sistemas de frenado utilizados para equipar los vehículos ferroviarios de alta

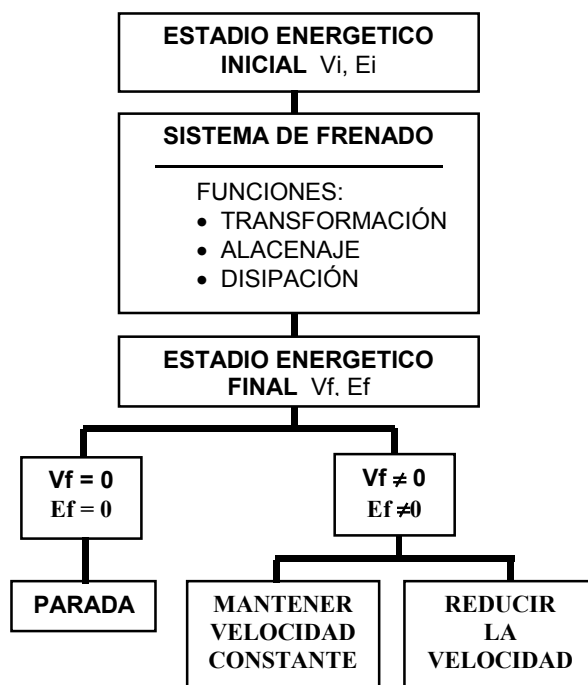


Fig. 1. Modificación del estadio energético de un vehículo ferroviario al aplicar el sistema de frenado.

\* Secretario General Académico de la Universidad «Aurel Vlaicu» de Arad, Rumania.  
E-mail: cancelar.uav@inext.ro

velocidad, la energía cinética que posee el vehículo al principio de la frenada se transforma en trabajo mecánico de deformación (elástica y plástica) y después en calor. El efecto de esta transformación es el incremento de la temperatura de los elementos en contacto directo (disco de freno y pastilla de fricción).

## 2. ENERGÍA CINÉTICA QUE TIENE QUE SER DISIPADA EN EL CASO DE FRENADO HASTA PARADA

La energía cinética que tiene que ser disipada por frenado hasta parada durante el tiempo  $t_b$  (la duración de la frenada) es dada por la relación:

$$E_{cf} = \frac{(1+\gamma) \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3,6}\right)^2 - 20 \cdot S_f \cdot R_t}{2} \quad [\text{J}] \quad (1)$$

donde:

$1 + \gamma$  = factor de masa determinado experimentalmente (en los cálculos  $1 + \gamma = 1.05$ );

$V$  = velocidad [km/h];

$m$  = masa del vehículo (o tren);

$S_f$  = espacio de frenado [m];

$R_t$  = resistencia total al avance del vehículo [sdaN].

El espacio de frenado de la relación 1 tiene la siguiente expresión:

$$S_f = \frac{3,93 \cdot (1+\gamma) \cdot V^2}{10 \cdot \mu_s \cdot \delta + r_T} + \frac{V \cdot t}{7,2} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

donde:

$\mu_s$  = coeficiente de fricción entre el disco de freno y la pastilla de fricción;

$\delta$  = coeficiente de frenado (en los cálculos  $\delta = 0.35$ );

$r_T$  = resistencia específica al avance del vehículo (en los cálculos  $r_T = 20$  N/kN);

$t$  = tiempo de relleno del cilindro de freno con aire comprimido (en los cálculos  $t = 4$  segundos).

Teniendo en cuenta la expresión de la resistencia total al avance del vehículo, determinada experimentalmente<sup>3,4</sup>, la energía cinética que tiene que ser disipada por frenado hasta parada, en el caso de vehículo ferroviario de alta velocidad que circula en línea recta y terreno plano, es dada por la relación

$$E_{cf} = \frac{(1+\gamma) \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{2} - 10 \cdot \left[ \frac{3,93 \cdot (1+\gamma) \cdot V^2}{10 \cdot \mu_s \cdot \delta + r_T} + \frac{V \cdot t}{7,2} \right] \cdot (a + b \cdot V + c \cdot V^2) \quad [\text{J}] \quad (3)$$

donde, de acuerdo a la expresión experimental de Guiheu<sup>3</sup>:

$$a = 250 \text{ [N]}$$

$$b = 3.256 \text{ [Kg/s]}$$

$$c = 0.0572 \text{ [Kg}^2\text{/s}^2\text{]}$$

Mediante estas relaciones se puede calcular la energía cinética para diferentes velocidades iniciales de frenado, por ejemplo  $V \in [0, 200]$  km/h, el espacio de frenado, la energía cinética del vehículo y también la energía por eje o por disco de freno.

## 3. LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE DISCOS DE FRENO SOBRE EL PODER DE FRENADO

El poder medio de frenado que corresponde a la energía cinética, obtenida de la relación 3, está dado por la relación siguiente:

$$P_{mf} = \frac{E_{cf}}{t_b} \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Sustituyendo en la relación 4 la expresión de la energía cinética se obtiene el poder medio de frenado:

$$P_{mf} = \frac{(1+\gamma) \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{2 \cdot t_b} - \frac{10}{t_b} \cdot \left[ \frac{3,93 \cdot (1+\gamma) \cdot V^2}{10 \cdot \mu_s \cdot \delta + r_T} + \frac{V \cdot t}{7,2} \right] \cdot (a+b \cdot V+c \cdot V^2) \quad [W] \quad (5)$$

Considerando un frenado hasta parada utilizando sólo el freno de disco, el poder medio de frenada por disco es dado por la relación

$$P_{mf} = n_d \cdot P_{mfd} \Rightarrow P_{mfd} = \frac{(1+\gamma) \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{2 \cdot t_b \cdot n_d} - \frac{10}{t_b \cdot n_d} \cdot \left[ \frac{3,93 \cdot (1+\gamma) \cdot V^2}{10 \cdot \mu_s \cdot \delta + r_T} + \frac{V \cdot t}{7,2} \right] \cdot (a+b \cdot V+c \cdot V^2) \quad [W] \quad (6)$$

Mediante la relación 6 se puede calcular, para un tren de alta velocidad de composición conocida<sup>3,4</sup> el poder de frenada por disco ( $P_{mfd}$ ). Considerando uno, dos o tres discos por eje ( $n_d = 1; 2; 3$  discos) mediante los valores presentados en la tabla I, en las figuras 2, 3, 4 se ha representado la variación del poder de frenada en función de velocidad ( $f1(x) \rightarrow n_d = 1, f2(x) \rightarrow n_d = 2, f3(x) \rightarrow n_d = 3$ ), para distintas duraciones de la frenada ( $t_b = 30; 50; 60$  segundos).

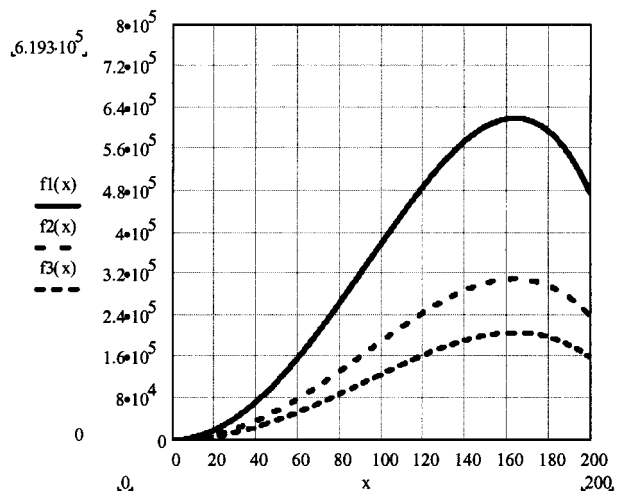


Fig. 2. La variación del poder de frenado en w para  $t_b = 30$  segundos Vs. la velocidad en Km/h.

TABLA I												
Velocidad [km/h]		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$t_b = 30$ segundos	Pm f1 [KW]	0	18.49	73.07	157.6	263.4	378.4	488.2	574.9	618	593.6	475
	Pm f2 [KW]	0	9.246	36.54	78.82	131.7	189.2	244.1	287.5	309	296.8	237.5
	Pm f3 [KW]	0	6.164	24.36	52.55	87.78	126.01	162.7	191.06	206	197.9	158.3
$t_b = 50$ segundos	Pm f1 [KW]	0	11.10	43.84	94.59	158	227.1	292.9	345	370.8	356.2	285
	Pm f2 [KW]	0	5.548	21.92	47.29	79.01	113.5	146.5	172.5	185.4	178.1	142.5
	Pm f3 [KW]	0	3.698	14.61	31.53	52.67	75.69	97.64	115	123.6	118.7	95.01
$t_b = 60$ segundos	Pm f1 [KW]	0	9.246	36.54	78.82	131.7	189.2	244.1	287.5	309	296.8	237.5
	Pm f2 [KW]	0	4.623	18.27	39.41	65.84	94.61	122	143.7	154.5	148.4	118.8
	Pm f3 [KW]	0	3.082	12.18	26.27	43.89	63.07	81.37	95.82	103	98.93	79.17

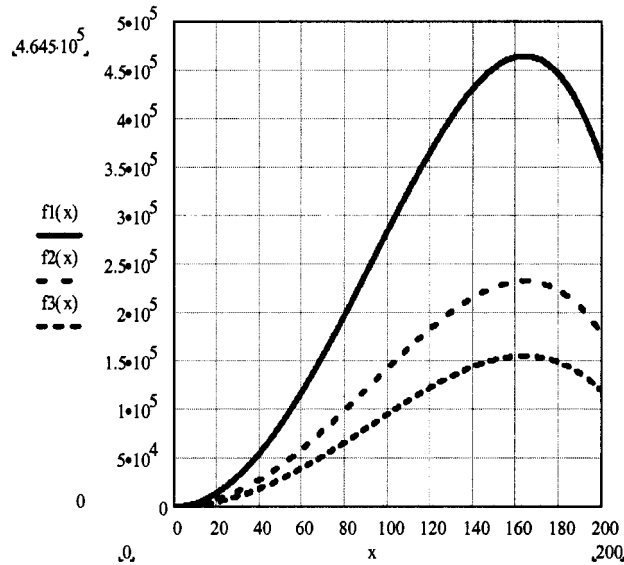


Fig. 3. La variación del poder de frenada en  $w$  para  $t_b = 50$  segundos Vs. la velocidad en Km/h.

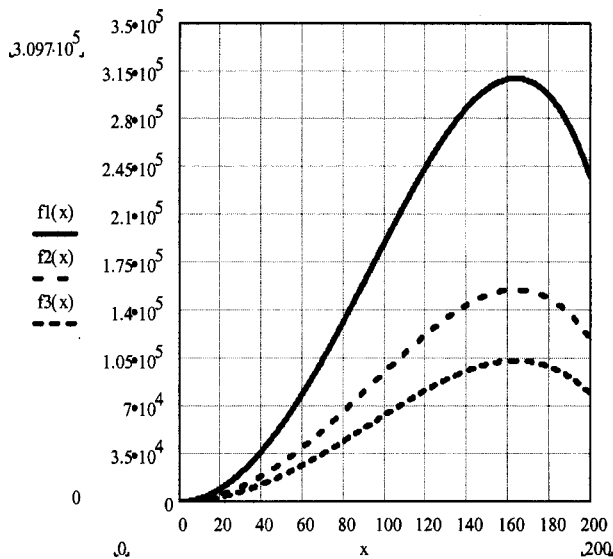


Fig. 4. La variación del poder de frenada en  $w$  para  $t_b = 60$  segundos Vs. la velocidad en Km/h.

Del análisis de los diagramas presentados resultan las siguientes conclusiones:

- Con el incremento del número de discos por eje, el poder de frenado por disco baja con efectos positivos para los elementos del acoplamiento de fricción (disco de freno – pastilla de fricción);
- Con el aumento de la duración de frenada (por ejemplo, desde el  $t_b = 30$  segundos hasta el  $t_b = 50$  segundos) el poder máximo de frenada por disco baja desde la  $P_{mfd} = 6.193 \cdot 10^5$  W hasta la  $P_{mfd} = 4.645 \cdot 10^5$  W, hecho que conduce a un mejor régimen térmico de los elementos del acoplamiento de fricción del freno de disco;
- El aumento del número de discos por eje conduce a una disminución de la temperatura de las superficies de fricción, pero al mismo tiempo crecen las masas no suspendidas del vehículo ferroviario;
- La utilización de discos con configuración geométrica distinta (no ventilados) caracterizados por una densidad baja (aleación base aluminio) ha permitido el crecimiento del número de discos por eje sin crecer la masa no suspendida del vehículo ferroviario de alta velocidad;
- La utilización del disco de freno no ventilado conduce a la obtención de un buen régimen térmico de los elementos del acoplamiento de fricción del freno de disco, también conduce a una reducción considerable de la resistencia aerodinámica del vehículo dada por el movimiento de rotación de los discos de freno autoventilados en el régimen de tracción (esta resistencia conduce a un consumo de aproximadamente 3% del poder instalado para tracción).

### 3. CONCLUSIONES

En el frenado hasta parada de los vehículos ferroviarios de alta velocidad, el poder de frenado es influenciado considerablemente por el número de discos de freno por eje, por la configuración de estos discos (autoventilados o no ventilados), también por la carga máxima por eje. En el caso de los discos de freno autoventilados, con el aumento del número de discos por eje, por ejemplo desde  $n_d = 1$  hasta el  $n_d = 3$ , a una duración de frenada  $t_b = 50$  segundos y una velocidad de principio de frenado  $V = 180$  km/h, se puede observar una disminución del poder de frenada de aproximadamente 33.32% ( $P_{mfd1} = 356.2$  KW,  $P_{mfd3} = 118.7$  KW).

El estudio y la puesta en evidencia de este fenómeno es muy importante para evaluar el régimen térmico de los elementos del acoplamiento de fricción del freno de disco (teniendo en cuenta la relación directa entre temperatura de los elementos del acoplamiento y el poder de frenada).

### 4. BIBLIOGRAFÍA

1. Gimenez, C. F. "Contribución al estudio de los parámetros que definen el frenado mecánico de vehículos ferroviarios" "A.I.T nr.9, pag. 33- 53 abril 1976.
2. Bocîi, L. S. "Contribuciones a la frenada de los vagones de viajeros de alta velocidad" Tesis doctoral, Timisoara 1997.
3. Guiheu, C. "La résistance a l'avancement des rames TGV-PSE. Bilan des études et des résultats des mesures" "Revue Générale des Chemins de Fer, enero 1982.
4. Bocîi, L. S. "Técnica de la alta velocidad. Sistemas de frenada para los vehículos ferroviarios de alta velocidad" Edición Mirton de Timisoara, 1999, 184 páginas.
5. Gunnar, D. "Stresses an Cracks in Brake Discs" Transactions of Machine Elements Division, Lund Technical University, Sweden 1976.
6. Adamsen, J. "Heating and cooling of Friction Brakes", Seminar on Braking , London 1986.
7. Raison, J. "Les materiaux de freinage" "Revue Générale des Chemins de Fer , julio / agosto 1991.
8. Bocîi, L. S., Dungan, M. C. "Sistemas de frenada sobre los vehículos ferroviarios de velocidades grandes y muy grandes" Sesión de Comunicaciones Científicas de la Universidad " Aurel Vlaicu " Arad, Mayo 1994.
9. Bocîi, L. S., Vadillo, E. G., Dungan, M. C. Sandner, C. "Determinación de las temperaturas de las ruedas de los vehículos ferroviarios a alta velocidad aplicados a la frenada de parada mediante el freno de zapatas" Anales de la Universidad "Constantin Brâncusi" de Târgu-Jiu seria B nr. 1/1994.