

COMPARACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LOS SISTEMAS DE FRENO CANTILEVER Y V-BRAKE EMPLEADOS EN BICICLETAS

D. Martínez Krahmer⁽¹⁾, D. Russo⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Casilla de Correo 1650, Miguelete, Provincia de Buenos Aires, Argentina. mkrahmer@inti.gov.ar

RESUMEN

En este estudio, se pretende comparar, a partir de la geometría de las palancas de freno y de los balancines, los sistemas de freno accionados por cable más empleados en bicicletas de uso público, denominados Cantilever y V-Brake, con el objeto de plantear modelos matemáticos para ambos sistemas que permitan determinar la carga teórica promedio que se transmite a la zapata de freno, a partir de aplicar una carga normalizada sobre la palanca de freno.

Asimismo, para verificar los resultados teóricos, se efectuaron ensayos de frenado en seco con las configuraciones mencionadas, evaluando la capacidad de frenado tanto cuando se emplean los sistemas delantero-trasero en forma simultánea, como así también cuando sólo se aplica el sistema de freno trasero.

Los resultados de la comparación teórica, ponen en evidencian que los sistemas de freno V-Brake transmiten al patín de freno una fuerza más de dos veces superior a la generada por los sistemas Cantilever.

A su vez, los resultados experimentales de las pruebas de frenado confirman los resultados teóricos, por cuanto las distancias de frenado promedio de bicicletas dotadas con sistemas de freno Cantilever resultan entre 1,9 a 2,6 veces mayores a las obtenidas con bicicletas con sistemas V-Brake, cuando se emplean los sistemas delantero-trasero y sólo trasero respectivamente.

Además, los resultados experimentales indican que las bicicletas con sistemas de freno Cantilever no cumplen los requisitos de frenado de la norma IRAM 40020, mientras aquellas con sistemas V-Brake si cumplen.

Palabras claves: bicicletas, sistemas de freno Cantilever, sistemas de freno V-Brake.

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia de un sistema de freno utilizado en bicicletas depende esencialmente de: la geometría y rigidez de las palancas de freno y balancines; el material y el área de contacto de las zapatas; del coeficiente de rozamiento y paralelismo entre zapatas y llanta; de la longitud y disposición de cables de freno; y del rozamiento entre cables y fundas.

Dentro de los requisitos de seguridad en bicicletas, los sistemas de freno ocupan un lugar muy importante. Si bien, como se explicó antes, son muchas variables las que influyen sobre su eficiencia, la geometría de los balancines, así como la manera en que la fuerza del cable de freno se transmite a dichos balancines, ocupan un rol preponderante.

Existen en Argentina dos sistemas de freno económicos, con un costo similar, que son empleados mayoritariamente en las bicicletas de uso público. Son los sistemas denominados Cantilever y V-Brake.

El sistema V-Brake fue introducido comercialmente en el año 1996, aunque Keith Bontrager experimentó con este concepto varios años antes, cuando todavía no existían palancas de freno compatibles para este diseño [1]. Por otro lado, Sheldon Brown [2] realizó un examen teórico sobre la geometría del sistema Cantilever, aunque sin llegar a plantear un modelo matemático que lo represente.

Las marcadas diferencias que presentan en la geometría de sus balancines así como la manera en que los cables de freno se vinculan a los mismos, permite presuponer que,

el sistema V-Brake produce una amplificación sustancialmente mayor que el sistema Cantilever de la fuerza aplicada a la palanca de freno, respecto de la que finalmente se transmite a las zapatas de freno y que influye decisivamente sobre la acción de frenado.

Estas diferencias, y la inexistencia de antecedentes sobre el tema, constituyeron los fundamentos para efectuar un estudio teórico-experimental comparativo entre los sistemas de freno indicados.

Adicionalmente, se pretende mediante el presente trabajo: desarrollar los modelos teóricos correspondientes a las configuraciones de los sistemas de freno Cantilever y V-Brake empleados en bicicletas; comparar la fuerza teórica transmitida por cada sistema a las zapatas de freno; presentar resultados de ensayos de frenado en seco de ambos sistemas de freno; representar en forma gráfica la influencia del ángulo γ formado por el cable de freno respecto del balancín en el sistema Cantilever sobre la fuerza aplicada a la zapata de freno (F_p), la longitud de palanca (l_p) y la componente de la fuerza aplicada al cable de freno que se transmite al balancín ($F_c\gamma$); proponer mejoras específicas para las bicicletas con cuadro dama y establecer la relación existente entre la distancia de frenado y la fuerza aplicada a la zapata de freno.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para efectuar la comparación de los sistemas Cantilever y V-Brake, se emplearon 7 bicicletas por clase de freno, de distintos procedencias (Ensambladores-fabricantes) y tipos (Mountain Bike, paseo, dama, bicicletas con cuadro de acero, con cuadro de aluminio, etc).

Para las determinaciones dimensionales se utilizó un calibre digital centesimal NSK y para aplicar la carga normalizada F_p de 180N[3] un dinamómetro Chatillon DFM 100. Este último se empleó con el objeto de poner en evidencia la modificación de la geometría, especialmente en lo sistemas Cantilever, y determinar el nivel de fuerza que requiere ser aplicado a las palancas de freno de sistemas Cantilever y V-Brake, hasta que las mismas toquen el caño de manubrio.

Los ensayos de frenado en seco se realizaron siguiendo las pautas establecidas en la norma IRAM 40020, y las distancias de frenado df en m, se midieron mediante un dispositivo diseñado y construido al efecto, denominado "Frenómetro" (ver Fig. 1). Dicho equipo guarda el registro de la velocidad de desplazamiento al momento en que fueron aplicados los frenos, y mediante una tercera rueda, mide la distancia recorrida, hasta que la bicicleta se detiene.



Fig. 1: Equipo de medición para ensayos de frenado

Amplificación originada por la palanca de freno

La forma de la palanca de freno, produce una amplificación de la fuerza F_p aplicada a la misma, caracterizada por un factor f_1 que la transforma en la fuerza aplicada al cable F_c .

En la Fig. 2 se muestra la geometría típica de una palanca de freno y las variables involucradas.

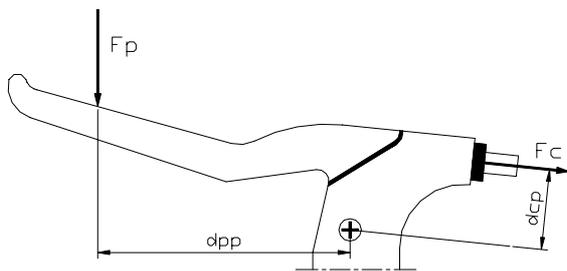


Fig. 2: Geometría de una palanca de freno.

Las variables son: la fuerza aplicada a la palanca F_p ; la distancia d_{pp} entre F_p y el pivote; la fuerza aplicada al cable de freno F_c ; y la distancia d_{cp} entre F_c y el pivote. En consecuencia, el factor de amplificación de fuerza f_1 generado por la palanca resulta:

$$F_c = (d_{pp}/d_{cp}) * F_p = f_1 * F_p \quad (1)$$

Modelo teórico del sistema de freno V-Brake

Por la configuración del sistema V-Brake, puede aceptarse, que la geometría de los balancines y las rectas de acción tanto de la fuerza aplicada al cable de freno F_c como a las zapatas de freno F_z , medidas en N, no varían con la magnitud de la fuerza aplicada a la palanca de freno F_p .

En la Fig. 3 se observa la geometría típica y las variables que intervienen en la formulación de un modelo teórico de un sistema de freno V-Brake.

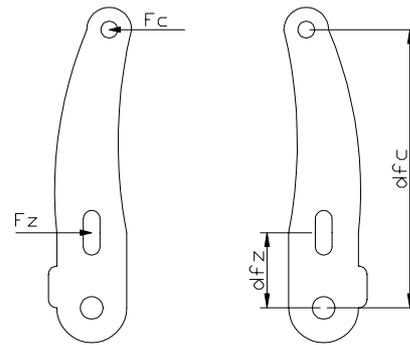


Fig. 3: Modelo de Sistema de freno V-Brake

Las variables son: la fuerza aplicada al cable de freno F_c , la fuerza aplicada a la zapata F_z , las distancias entre la recta de acción de F_z respecto del pivote del balancín indicada como d_{fz} , y aquella entre la recta de acción de la fuerza F_c y el citado pivote d_{fc} .

Durante la acción de frenado, el sistema de fuerzas se comporta como un sistema en equilibrio, de modo que la sumatoria de momentos de las fuerzas actuantes respecto del eje del pivote es igual a cero, entonces:

$$F_z * d_{fz} - F_c * d_{fc} = 0 \quad (2)$$

$$F_z = (d_{fc}/d_{fz}) * F_c \quad (3)$$

El sistema V-Brake produce una amplificación de la fuerza F_c , representada por un factor f_2 , tal que:

$$F_z = f_2 * F_c \quad (4)$$

Modelo teórico del sistema Cantilever

Por la configuración geométrica del sistema Cantilever, a diferencia de lo que ocurre con el sistema V-Brake, resulta evidente que la misma depende de la magnitud de la fuerza aplicada a la palanca de freno F_p , la cual, al modificar el valor del ángulo Y formado por el cable de freno respecto del balancín, produce cambios significativos sobre la longitud de palanca (l_p) y la componente de la fuerza aplicada al cable de freno que se dirige al balancín ($F_c Y$), modificando la fuerza transmitida a la zapata F_z .

En la Fig. 4 se observa la geometría típica y las variables que intervienen en la formulación de un modelo teórico de un sistema de freno Cantilever.

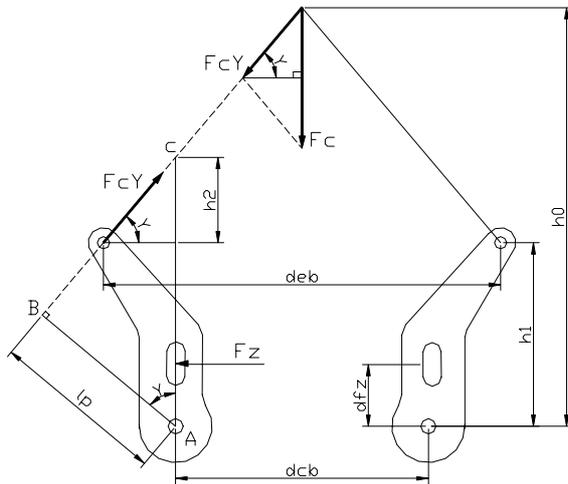


Fig. 4: Modelo de Sistema de freno Cantilever

A partir de la Figura 4 pueden deducirse las siguientes ecuaciones:

$$Y = \arctan [2 \cdot (h_0 - h_1) / deb] \quad (5)$$

$$F_{cY} = F_c / (2 \cdot \sin Y) \quad (6)$$

En el triángulo ABC resulta:

$$h_2 = (\tan Y) \cdot [(deb - dcb) / 2] \quad (7)$$

$$lp = (h_1 + h_2) \cdot (\cos Y) \quad (8)$$

Puesto que la sumatoria de momentos de las fuerzas actuantes respecto del eje del pivote es igual a cero resulta:

$$F_z = (F_{cY} \cdot lp) / dfz \quad (9)$$

Reemplazando la (6) en la (9) resulta:

$$F_z = [lp / (2 \cdot \sin Y \cdot dfz)] \cdot F_c \quad (10)$$

El sistema Cantilever produce una amplificación de la fuerza F_c , representada por un factor f_2 , tal que:

$$F_z = f_2 \cdot F_c \quad (11)$$

Si se combinan en forma genérica las ecuaciones (4) y (11) con la (1) resulta:

$$F_z = f_1 \cdot f_2 \cdot F_p = f_t \cdot F_p \quad (12)$$

3. RESULTADOS

En la tabla I se indican las magnitudes promedio de los factores de amplificación, según se trate de sistemas Cantilever o V-Brake (El factor f_1 es producido por la forma de la palanca, el f_2 por la geometría del sistema de freno, y el factor total $f_t = f_1 \cdot f_2$ es el aportado en conjunto por el tipo de palanca y configuración de freno).

Tabla I: Valores promedio de los factores de amplificación.

Factor	Sistema Cantilever	Sistema V-Brake
f_1	3,10	2,20
f_2	1,18	3,75
f_t	3,66	8,25

Para los sistemas de freno V-Brake, se presentan en la tabla II los valores promedio teóricos, para las variables dfz , dfc , F_c y F_z .

Tabla II: Valores promedio de las variables de un sistema V-Brake

dfz (mm)	dfc (mm)	F_c (N)	F_z (N)
26,8	100,6	396	1485

Para los sistemas de freno Cantilever, se presentan en la tabla III los valores promedio teóricos para las variables Y , lp , dfz , F_{cY} , y F_z .

Tabla III: Valores promedio de las variables de un sistema Cantilever.

Y (°)	lp (mm)	dfz (mm)	F_{cY} (N)	F_z (N)
49,5	46,6	25,4	367	673,6

En la Tabla IV se indican, las distancias límites de frenado según IRAM 40020 (A partir de una velocidad inicial de 25km/h), y los valores promedio experimentales con su desvío estándar $\sigma\%$, de las distancias de frenado para ambos tipos de sistemas, cuando se emplearon los frenos delantero-trasero, y sólo trasero.

Tabla IV: Distancias límites, comparación de distancias de frenado y desvío para sistemas Cantilever vs V-Brake

Sistemas de freno empleados	Distancias límites de frenado (m)	Distancia y $\sigma\%$ con sistema Cantilever (m)	Distancia y $\sigma\%$ con sistema V-Brake (m)
Delantero y trasero	7	$11,2 \pm 29\%$	$5,9 \pm 21\%$
Sólo trasero	15	$31,5 \pm 33\%$	$11,8 \pm 22\%$

Para los sistemas de freno Cantilever, en la figura 5 se presenta un gráfico teórico que muestra la variación de la fuerza aplicada a la zapata F_z , de la componente de la fuerza aplicada al cable de freno que se dirige al balancín F_{cY} y de la longitud de palanca lp , en función del ángulo Y formado por el cable de freno respecto del balancín (Ver expresiones 6; 8 y 10).

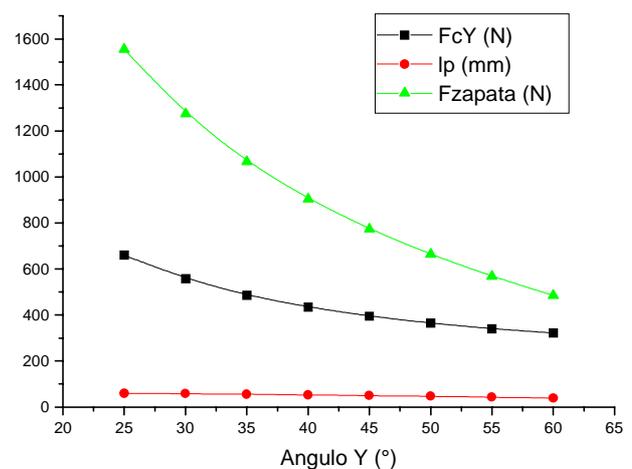


Fig. 5: Variación de F_{cY} ; lp y F_z en función de Y .

Además, en el caso particular de las bicicletas dama, se observó que el sistema de freno trasero presenta una marcada pérdida de eficacia. Por la forma del cuadro,

necesita de un cableado largo, y la forma tradicional de efectuarlo, sigue una trayectoria con varios cambios de dirección (Fig. 6).



Fig. 6: Cableado trasero en bicicleta dama (Cantilever).

El uso simultáneo de sistemas de freno V-Brake, y una manera distinta de realizar el cableado en el sistema trasero de freno de las bicicletas dama (Fig.7), que acorta su longitud en unos 300mm y elimina los cambios de dirección, garantiza no sólo el cumplimiento de los requisitos de la norma involucrada.



Fig. 7: Cableado trasero mejorado en bicicleta dama.

Finalmente, del análisis de los resultados teórico-experimentales, surge la existencia de una relación inversa entre la distancia de frenado df y la fuerza aplicada a la zapata de freno Fz del tipo:

$$df \cong 1 / Fz \quad (13)$$

Si a dicha expresión se le asigna subíndice c para los sistemas Cantilever y v para los V-Brake, y se dividen entre sí miembro a miembro resulta:

$$.dfc/dfv = 2,3 \cong Fzv/Fzc = 2,2 \quad (14)$$

4. CONCLUSIONES

Las bicicletas con sistemas de freno Cantilever no cumplen los requisitos de frenado de la norma IRAM 40020, mientras las dotadas de sistemas de freno V-Brake sí cumplen.

La fuerza teórica que se trasmite a la zapata Fz , en los sistemas V-Brake respecto de los Cantilever es 2,2 veces mayor en promedio.

El aumento del ángulo Y formado por el cable de freno con el balancín en los sistemas Cantilever, afecta

negativamente sobre la fuerza que finalmente se trasmite a la zapata de freno en dos sentidos, 1) produciendo una disminución de la componente de Fc que actúa sobre el balancín, 2) reduciendo la longitud de palanca lp .

En los ensayos experimentales, las distancias de frenado para bicicletas con sistemas Cantilever resultaron 1,9 a 2,7 (2,3 en promedio) veces mayores a las alcanzadas en aquellas dotadas de sistemas V-Brake, incluso con mayor dispersión (31% promedio en los Cantilever contra 21,5% promedio de los V-Brake).

La expresión (14) expresa la fuerte relación existente entre la distancia de frenado df y la fuerza teórica que se trasmite a la zapata Fz , por cuanto el coeficiente promedio que resulta de dividir las distancias de frenado para bicicletas con ambos sistemas de freno (2,3), es prácticamente igual al que resulta de dividir las respectivas fuerzas teóricas promedio actuantes sobre las zapatas de bicicletas con ambos sistemas (2,2).

Las distancias de frenado de bicicletas con sistema Cantilever cuando se emplean los dos sistemas de freno, son similares a las distancia de frenado de bicicletas con sistemas V-Brake cuando con ellas sólo se emplea el sistema de freno trasero.

Las fuerzas que deben ser aplicadas a las palancas de los sistemas de freno V-Brake son sustancialmente menores (Las palancas de freno de sistemas Cantilever requieren de unos 180N en promedio para que la misma toque el caño de manubrio, mientras las palancas de sistemas V-Brake sólo requieren de unos 140N).

El empleo de cables cortos uniendo los balancines en el sistema Cantilever, genera un ángulo Y más pequeño, produciendo como resultado una mayor fuerza actuante sobre la zapata de freno.

Sólo con ángulos Y (Con la geometría del sistema Cantilever ya deformada por la acción de la fuerza aplicada al cable Fc) de entre unos 25 a 27°, se obtendrían fuerzas sobre la zapata similares a las producidas por el sistema V-Brake (Se hace notar que en todas las bicicletas analizadas los Y variaron entre 37 a 58°).

5. REFERENCIAS

- [1] www.edinburghbicycle.com
- [2] www.sheldonbrown.com/cantilever-geometry.html
- [3] Norma IRAM 40020: Requisitos de seguridad en bicicletas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a C. Almada por el diseño y construcción del "Frenómetro", a G. Elvira de INTI-MECANICA por la revisión de los modelos matemáticos planteados, a J. Schneebeli y G. Lafogiannis de INTI-MECANICA por los aportes conceptuales efectuados.

Este trabajo fue financiado por el Centro de Mecánica del Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina.