

## DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN ENTRE CERDAS DE ACERO DE CEPILLOS LATERALES PARA BARRER CALLES

### Determination of the Coefficient of Friction between Steel Bristles of Gutter Brushes for Road Sweeping

#### RESUMEN

El objetivo de este artículo es determinar los coeficientes de fricción entre dos cerdas delgadas de acero de los cepillos laterales en barredoras de calles. Dichos coeficientes se determinan experimentalmente utilizando diferentes pesos sobre las cerdas en un plano inclinado. Los resultados indican que el coeficiente de fricción depende de la fuerza normal. Cuando ésta es pequeña, los coeficientes de fricción son grandes. Al incrementar la fuerza normal, los coeficientes de fricción se reducen hasta alcanzar un valor donde incrementos adicionales de la fuerza normal no producen cambios apreciables en los coeficientes.

**PALABRAS CLAVES:** cepillos laterales, cerdas de acero, coeficiente de fricción, fricción dinámica, fricción estática, fuerza normal.

#### ABSTRACT

*The aim of this paper is to determine the coefficients of friction between two slender steel bristles of gutter brushes of street sweepers. These coefficients are determined experimentally by using different weights on bristles on an inclined surface. The results indicate that the coefficients of friction depend on the normal force. When this is minute, the coefficients of friction are large. As the normal force is increased, the coefficients of friction reduce until a value is reached where a further increase in the normal force does not produce appreciable changes in the coefficients.*

**KEYWORDS:** *coefficients of friction, gutter brushes, kinematic friction, normal force, static friction, steel bristle.*

#### 1. INTRODUCCIÓN

La limpieza de carreteras es un servicio ampliamente empleado alrededor del mundo. Los escombros y contaminantes que se encuentran sobre las autopistas y calles tienen que ser removidos. Esto no solamente se realiza para ver limpias las calles. La limpieza ayuda también a prevenir que las partículas contaminadas sean dispersadas en el aire y que alcance los sistemas acuáticos a través de los sistemas de desagüe. En algunos países, las actividades de limpieza en las calles y carreteras se realizan por medio de vehículos barredores.

Las barredoras de carreteras comprenden normalmente un cepillo lateral en forma de copa, el cual es empleado para barrer los escombros que se encuentran en las cunetas de las calles. Estos escombros son removidos en algunos casos por medio de una potente unidad de succión y un cepillo central que hace las veces de escoba. Las cerdas de los cepillos laterales pueden ser consideradas como vigas delgadas, las cuales pueden estar fabricadas de materiales como acero o polipropileno. Las cerdas se montan en un disco de montaje de madera por grupos, los cuales son colocados

en una o más filas, para formar el cepillo lateral como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Cepillos laterales para barredoras de calles

Se acepta que alrededor del 80% de los escombros se encuentran en las cunetas de las calles [1,2]. Por lo tanto, la operación efectiva de los cepillos laterales es importante. A pesar de esto, la investigación publicada acerca del desempeño y de las características de los cepillos laterales es extremadamente limitada [1-3].

**LIBARDO VANEGAS USECHE**

Ingeniero Mecánico, Ph. D.

Profesor Asociado

Universidad Tecnológica de Pereira

[lvanegas@utp.edu.co](mailto:lvanegas@utp.edu.co)

**MAGD M. ABDEL WAHAB**

Ingeniero Civil, Ph. D.

Senior Lecturer

University of Surrey

[m.wahab@surrey.ac.uk](mailto:m.wahab@surrey.ac.uk)

**JUAN FELIPE ARROYAVE L.**

Ingeniero Mecánico, M. Sc.

Profesor Auxiliar

Universidad Tecnológica de Pereira

[jfa@utp.edu.co](mailto:jfa@utp.edu.co)

Este trabajo hace parte de una investigación sobre el mejoramiento del desempeño de los cepillos laterales. El objetivo es determinar el coeficiente de fricción relacionado con la interacción entre un par de cerdas en los cepillos laterales. La determinación del coeficiente de fricción es importante para modelar el comportamiento de los cepillos laterales.

Este artículo está organizado de la siguiente forma. La próxima sección presenta brevemente literatura relevante sobre fricción. Posteriormente, en la sección 3, se describe la metodología de las pruebas experimentales. Luego se presentan los resultados y su análisis. Los resultados son comparados con datos presentados en la literatura. Finalmente la sección 5 concluye este artículo.

## 2. LITERATURA SOBRE FRICCIÓN

La interacción de superficies es un área que no ha sido entendida totalmente, ya que ésta depende de muchos factores. En esta sección se presentan algunos conceptos básicos sobre fricción y se da una revisión de la literatura relevante.

Fricción es la resistencia al movimiento que ocurre cuando uno de dos cuerpos en contacto se mueve o se intenta mover tangencialmente con respecto al otro. Ésta se produce por fuerzas tangenciales (fricción) transmitidas a través del contacto cuando las superficies son presionadas por la fuerza normal [4]. La dirección de la fuerza de fricción es opuesta a la dirección del movimiento o a la dirección en la cual el cuerpo se intenta mover. Si la magnitud de la fuerza externa, tangencial a la interface, es lo suficientemente pequeña, la fuerza de fricción generada es igual a la fuerza externa (pero con dirección opuesta), entonces, no hay movimiento.

El desplazamiento ocurre si la magnitud de la fuerza externa es lo suficientemente grande; más grande que la máxima fuerza de fricción que la interface puede soportar.

Existen tres tipos de fricción (viscosa, estática y de Coulomb). En la fricción viscosa la relación entre la fuerza aplicada y la velocidad es lineal y se presenta como un amortiguador (figura 2(a)). La fricción estática (figura 2(b)) representa una fuerza que tiende a impedir el movimiento desde el comienzo; ésta desaparece una vez se inicia el movimiento.

Finalmente, una aproximación simple para la fuerza de fricción entre dos superficies sólidas está dada por la fricción de Coulomb. La fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal,  $N$ , y la constante de proporcionalidad es definida como coeficiente de fricción (COF). La fuerza de fricción de Coulomb es una fuerza que tiene una amplitud constante con respecto al cambio

de velocidad. La relación para el COF se da en la ecuación 1:

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (1)$$

donde  $f$  es la fuerza de fricción y  $\mu$  es el COF.

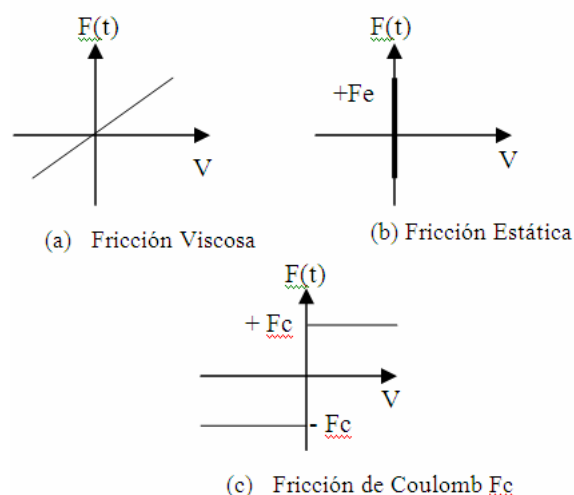


Figura 2. Diagrama fuerza velocidad para tres tipos de fricción

Es conveniente expresar el COF en términos del ángulo de fricción:

$$\mu = \tan \theta_f \quad (2)$$

El ángulo  $\theta_f$  representa el máximo ángulo de inclinación de una superficie tal que cualquier objeto que se encuentre sobre ésta, descansa estacionariamente. Si se incrementa el ángulo cualquier cantidad, se producirá deslizamiento del objeto. La figura 3 muestra el diagrama de cuerpo libre de un cuerpo sobre una superficie inclinada. Cuando  $\tan \theta_f = \mu$ , el deslizamiento es inminente.

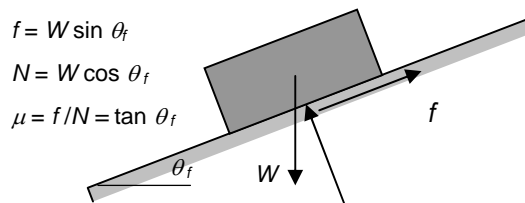


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre de un cuerpo sobre una superficie inclinada

De hecho, el COF no es constante y depende de muchos factores, tales como la velocidad relativa de deslizamiento de los cuerpos en contacto. Cuando no hay

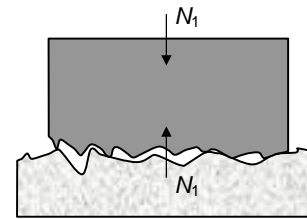
movimiento relativo, el COF toma un valor máximo, llamado el coeficiente estático de fricción,  $\mu_s$ . Cuando ocurre el deslizamiento, el COF toma un mínimo valor, denominado coeficiente de fricción dinámico,  $\mu_k$ . Sin embargo, el COF varía con la velocidad, y, por lo tanto, no existe un solo valor para  $\mu_k$ . Este puede aumentar, permanecer constante o decrecer con la velocidad, dependiendo del rango de velocidades considerados [4].

El COF puede variar también con la fuerza normal,  $N$ , especialmente para fuerzas del orden de los miligramos. [4]. Una revisión de la literatura indica que el coeficiente de fricción puede incrementarse o decrecer con  $N$  [5], dependiendo de un número de factores. Adams *et al.* [5] demuestran teóricamente que  $\mu$  decrece con  $N$ , principalmente para fuerzas pequeñas y cuando la superficie es muy lisa y tiende a ocurrir contacto de asperezas en escala manométrica. Esto se debe principalmente a las fuerzas de adhesión que afectan las superficies muy lisas. Sin embargo, esto ocurre también cuando en el modelo no existen fuerzas de adhesión y la superficie está altamente contaminada. Esto quizás es atribuido a las diferencias en los radios de contacto de las asperezas. Cuando  $N$  es pequeña, un gran número de asperezas en contacto tienen radios pequeños, lo cual, de acuerdo con el modelo, resulta en el desarrollo de esfuerzos cortantes de fricción grandes. En contraste, para fuerzas altas, los radios de contacto más grandes dominan la fuerza de fricción, aunque el esfuerzo por fricción sea más bajo.

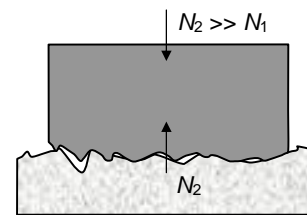
Como se presenta en Adams *et al.* [5], el modelo de Hurtado y Kim propone que si los radios de contacto son más pequeños que cierto valor, el esfuerzo de fricción es constante. Más allá de este valor, el esfuerzo de fricción disminuye con el incremento del radio de contacto hasta cierto punto, donde el esfuerzo de fricción vuelve a ser independiente del tamaño de contacto. En otras palabras, para fuerzas pequeñas aparecen grandes esfuerzos cortantes, produciendo altos coeficientes de fricción, mientras que para cargas más grandes, los esfuerzos de fricción, que son menores que los cortantes, aparecen generando coeficientes de fricción más pequeños. De manera similar, otras investigaciones teóricas y experimentales muestran también que  $\mu$  disminuye con  $N$  [6,7].

Aparte de la ley dada por la ecuación 1, otra ley cuantitativa de fricción es que  $f$  es normalmente independiente del área de contacto aparente. Con respecto a esto, hay una gran diferencia entre el área de contacto "real" y el área de contacto "aparente" entre dos superficies. El área real es la formada con las asperezas en contacto. Dicha área es la que determina la magnitud de la fuerza de contacto y tiende a ser proporcional a  $N$  e independiente del área aparente. Esto se ilustra en la figura 4. Excepciones de esta regla pueden ocurrir en superficies muy pulidas y limpias, debido a las grandes

fuerzas de interacción (fuerzas de adhesión) entre las superficies [12].



(a) Cuando la fuerza normal es pequeña, el área de contacto es pequeña



(b) Cuando la fuerza normal es grande, el área de contacto es grande

Figura 4. Representación esquemática del contacto entre asperezas

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para modelar el contacto entre dos cerdas mediante elementos finitos (FEA), es necesario determinar el COF para la interacción entre ellas. No obstante, el coeficiente de fricción entre éstas puede variar ampliamente, dependiendo de las condiciones de trabajo. Los cepillos laterales trabajan usualmente en ambientes sucios, con cantidades variables de humedad, agua y partículas adheridas a las cerdas. Además, la superficie de la cerda puede tener películas de óxido de espesores variables. Estos espesores dependen, por ejemplo, de si la cerda ha estado quieta en contacto con agua o ha estado trabajando varias horas. Por lo tanto,  $\mu$  puede variar drásticamente de un escenario a otro. Debido a esto, no es posible determinar un COF exacto.

Para la medición experimental de los COFs se emplearon dos cerdas prismáticas (sección transversal:  $2 \times 0.5 \text{ mm}^2$ ; longitud: 95 mm y 100 mm) de cepillos laterales reales. Éstas estaban libres de agua, excepto por la humedad proporcionada por el aire, y libres de cantidades significativas de polvo. La superficie presentaba un leve grado de contaminación (una pequeña capa de óxido), debido a la interacción con la atmósfera. Sin embargo, la corrosión presente no es detectable visualmente.

El montaje del experimento se muestra esquemáticamente en la figura 5. La figura 6 muestra un

ejemplo del montaje real para la prueba. Se adhirió un par de cerdas a la superficie de un plano inclinado, y otro par en la misma disposición fue adherido al peso. Se hicieron por lo menos dos pruebas para cada uno de los pesos empleados. Se usaron cinco pesos diferentes, incluyendo la prueba sin peso.

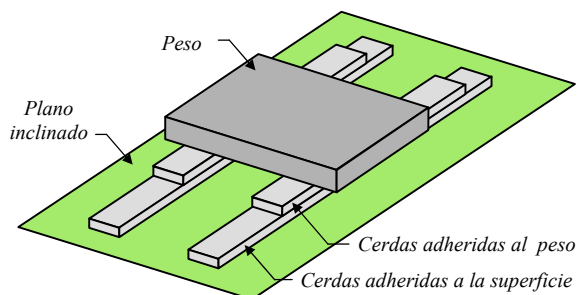


Figura 5. Esquema inicial para la prueba de fricción



Figura 6. Montaje real para determinar los COFs para el contacto cerda-cerda

El propósito de los pesos es obtener diferentes fuerzas normales, ya que en la interacción entre un par de cerdas de un cepillo en funcionamiento la fuerza normal es variable. Para determinar el coeficiente de fricción estático,  $\mu_s$ , los pares de cerdas fueron colocados en contacto, y la inclinación de la superficie se fue incrementando gradualmente hasta que ocurriera deslizamiento. La tangente del ángulo que produce deslizamiento corresponde a  $\mu_s$ , como se indica en la ecuación 2. El método para obtener el coeficiente de fricción dinámica,  $\mu_k$ , es diferente. Para una cierta inclinación, la cual puede ser inicialmente un valor menor al obtenido para el cálculo del coeficiente estático, el peso fue empujado hacia abajo muy suavemente. Si el peso paraba, la pendiente de la superficie se incrementaba. Finalmente, un cierto ángulo hace que al empujar el peso se produzca un deslizamiento constante. La tangente de este ángulo corresponde al valor de  $\mu_k$ . La fuerza normal,  $N$ , se calcula como se muestra en la figura 3.

Se hace notar que el área real de contacto entre dos cuerpos puede incrementarse con el tiempo cuando no

existe una velocidad de deslizamiento relativa [4]. De hecho, se anticipa que la prueba experimental sugiere que cuando las cerdas están en contacto unos pocos segundos, el COF se incrementa. Por lo tanto, durante el experimento, las cerdas no fueron dejadas varios segundos en una sola posición, sino que éstas fueron movidas constantemente cuando se trató de encontrar  $\mu_s$ .

#### 4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

La figura 7 presenta los resultados de las pruebas experimentales. En ésta se observa que ambos coeficientes  $\mu_s$  y  $\mu_k$  decrecen con la fuerza normal  $N$ , cuando está es muy pequeña. Esto está de acuerdo con lo reportado en la literatura (sección 2). Cuando  $N \gg 0.3$  N, el COF se vuelve prácticamente constante, lo cual corresponde a la teoría de fricción de Coulomb. Adicionalmente las curvas demuestran que  $\mu_k$  es más pequeño que  $\mu_s$ , como se esperaba. El coeficiente dinámico de fricción es un poco más pequeño que el estático para todo el rango de la fuerza normal estudiado. Las barras de error en la figura 7 representan errores estándar.

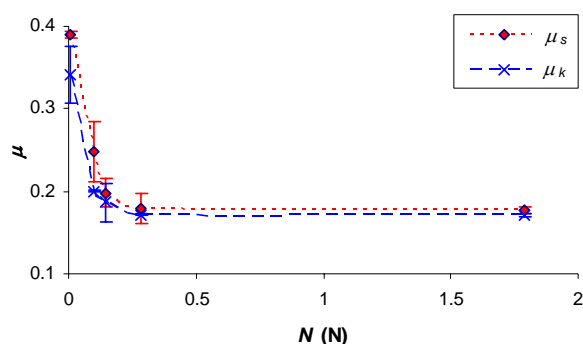


Figura 7. Coeficiente estático y dinámico entre cerdas, en función de la fuerza normal

Los resultados indican que, exceptuando cargas muy pequeñas,  $\mu_s = 0.178 \pm 0.004 \approx 0.18$  y  $\mu_k = 0.171 \pm 0.002 \approx 0.17$ . Estos valores son similares a los reportados en la literatura. Por ejemplo, los siguientes valores fueron encontrados en dos fuentes: 0,1 - 0,3 para metal-metal expuestos a condiciones ambientales y, por lo tanto, compuestos de una película; 0,15 - 0,2 para contacto seco metal-metal [4].

En la literatura se dan rangos, en vez de valores exactos, debido a los diferentes fenómenos que ocurren en los procesos de contacto. De hecho, el COF entre dos cuerpos de acero puede incrementarse drásticamente si la capa de óxido es removida. Rabinowicz [4] da un valor de 0,8 para el coeficiente de fricción metal-metal no lubricado.

Los resultados muestran que el coeficiente de fricción tiende a incrementarse ( $\mu_s = 0.389 \pm 0.004 \approx 0.39$  y  $\mu_k = 0.34 \pm 0.03$ ), cuando la carga normal está dada solamente por el peso de las cerdas (la presión producida es de  $3.6 \text{ mg/mm}^2$ ). Sin embargo, cuando dos cerdas hacen contacto en el proceso dinámico de barrido, se espera que las fuerzas sean mucho más grandes que las producidas por los pesos de las cerdas. Por lo tanto, los COFs para la interacción entre cerda y cerda durante el proceso de barrido pueden asumirse iguales a los valores mínimos obtenidos. Además, debido a las incertidumbres en las condiciones de operación de la barredoras, podría asumirse  $\mu_s = \mu_k = 0.17$  ó  $0.18$ .

## 5. CONCLUSIONES

Los fenómenos de fricción e interacción de superficies no han sido totalmente entendidos. Usualmente, la fricción entre superficies secas se modela como fricción de Coulomb, en la que la relación fuerza de fricción - fuerza normal está dada por un parámetro constante, denominado coeficiente de fricción. En la práctica, las fuerzas de fricción se ven afectadas por muchos factores, tales como la velocidad relativa y la fuerza normal entre las superficies.

La interacción entre las cerdas de un cepillo puede ser modelada por medio de la fricción de Coulomb. Sin embargo, esta ley de fricción no es válida para todos los casos. Por ejemplo, para cargas pequeñas, el coeficiente de fricción puede variar con la fuerza normal. Los resultados sugieren que los coeficientes de fricción dependen de la magnitud de la fuerza normal. Para fuerzas muy pequeñas, los coeficientes de fricción disminuyen con la fuerza normal hasta cierto valor de ésta, donde dichos coeficientes tienden a volverse constantes. Se encontró que los coeficientes de fricción adecuados para la interacción entre un par de cerdas de acero pueden ser  $\mu_s = 0.18$  y  $\mu_k = 0.17$ .

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad de Surrey (Reino Unido) y el Programa Alβan, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina, n° de identificación (E03D04976CO).

## REFERENCIAS

- [1] G. Peel, M. Michielen, and G. Parker, "Some aspects of road sweeping vehicle automation," *2001 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intellig. Mechatronics Proc., I-II*, pp. 337-342.
- [2] M. Michielen, G. A. Parker, "Detecting debris using forward looking sensors mounted on road sweeping vehicles," *Proc. Mechatronics 2000*, No.: M2000-094.
- [3] L. V. Vanegas Useche, M. M. Abdel Wahab, and G. A. Parker, "Theoretical model for the free-flight behaviour of the bristles of an oscillatory gutter brush for road sweeping," *Proc. XI<sup>th</sup> Int. Conf. Vibration Engineering*, Timisoara (Rumania), Sep. 27- 30 de 2005, pp. 83-90.
- [4] E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, second edition, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [5] G. G. Adams, S. Müftü, and N. M. Azhar, "A scale-dependent model for multi-asperity contact and friction," *ASME, J. Tribology*, vol. 125, pp. 700-708, 2003.
- [6] P. Sahoo, and S. K. Roy Chowdhury, "A fractal analysis of adhesive friction between rough solids in gentle sliding," *Proc. I MECH E Part J. Eng. Tribology*, vol. 214, pp. 583-595, 2000.
- [7] G. G. Adams, and S. Müftü, "Improvements to a scale-dependent model for contact and friction," *J. Physics D: Applied Physics*, vol. 38, pp. 1402-1409, 2005.
- [8] G. M. Peel and G. A. Parker, "Initial investigations into the dynamics of cutting brushes for sweeping," *ASME J. Dynamic Syst. Meas. Con.*, vol. 124, pp. 675-681, 2002.
- [9] G. Peel, "A general theory for channel brush design for street sweeping," Ph.D. thesis, School of Engineering, University of Surrey, UK, 2002.
- [10] C. Wang, "Brush modelling and control techniques for automatic debris removal during road sweeping," Ph.D. thesis, School of Engineering, Univ. of Surrey, UK, 2005.
- [11] L. V. Vanegas Useche, M. M. Abdel Wahab, and G. A. Parker, "Dynamics of a freely rotating cutting brush subjected to variable speed," *Int. J. of Mech. Sciences*, vol. 50, pp. 804-816, 2008.
- [12] L. V. Vanegas Useche, M. M. Abdel Wahab, and G. A. Parker, "Dynamics of an unconstrained oscillatory flicking brush for road sweeping," *J. of Sound and Vibration*, vol. 307, pp. 778-801, 2007.
- [13] M. Abdel Wahab, G. Parker, and C. Wang, "Modelling rotary sweeping brushes and analyzing brush characteristic using finite element method," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 43, pp. 521-532, 2007.
- [14] L. V. Vanegas Useche, M. M. Abdel Wahab, and G. A. Parker, "Theoretical model for the dynamics of an unconstrained cutting brush of a street sweeper, in *Proc. 8th ASME Conf. Eng. Sys. Des. Analysis ESDA 2006*, Turín (Italia), pp. ESDA2006-95563-1-10.
- [15] L. V. Vanegas Useche, M. M. Abdel Wahab, and G. A. Parker, "Brush dynamics: models and characteristics, *Proc. 8th ASME Conf. Eng. Sys. Des. Analysis ESDA 2006*, Turín (Italia), pp. ESDA2006-95565-1-10.