

*Efecto de la Fuerza Normal sobre
el Coeficiente de Fricción entre dos
Superficies Sólidas*

*Effect of the Normal Force upon the Friction
Coefficient between two Solid Surfaces*

Libardo Vicente Vanegas-Useche

*Ph.D. in Mechanical Engineering,
M.Sc. in Advanced Manufacturing Technology
Profesor Titular Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
Grupo de Investigación en Procesos de Manufactura y Diseño de Máquinas
lvanegas@utp.edu.co*

Juan Felipe Arroyave Londoño

*Ingeniero Mecánico
M.Sc. Sistemas Automáticos de Producción
Profesor Asistente Universidad Tecnológica de Pereira
Grupo de Investigación en Tecnología Mecánica
jfa@utp.edu.co*

Magd M. Abdel-Wahab

*Ph.D., D.Sc., M.Sc., B.Sc.
Professor Faculty of Engineering and Architecture
Ghent University, Belgium
Magd.AbdelWahab@UGent.be*

Recibido junio 10 de 2011 – Aceptado Noviembre 30 de 2011

RESUMEN

En este artículo se presenta el proyecto de investigación basado en la dependencia del coeficiente de fricción, μ , entre dos superficies sólidas, de la fuerza normal, N , aplicada a éstas. Se hace una revisión de los modelos y resultados experimentales sobre este tema, y se presentan los resultados de experimentos con cerdas de acero para barredoras de carreteras. Muchos trabajos teóricos y experimentales han mostrado que

μ puede aumentar o decrecer con N . Sin embargo, la mayor parte de la literatura parece indicar que μ se reduce al aumentar N , bajo ciertas condiciones. Esto ocurre principalmente para fuerzas pequeñas y cuando la superficie es muy lisa. Se concluye que este fenómeno puede deberse a varios factores: las fuerzas de adhesión que afectan las superficies muy lisas tienden a ser significativas cuando N es pequeña y tienen el efecto de aumentar el valor de μ . Las diferencias en los radios de contacto de las asperezas pueden aportar también a este fenómeno. Cuando N es pequeña, un gran número de asperezas en contacto tiene radios pequeños, y se podrían desarrollar grandes esfuerzos cortantes de fricción. En contraste, para fuerzas grandes, los radios de contacto más grandes dominan la fricción; aparecen esfuerzos de fricción que son menores que los cortantes, generando coeficientes de fricción más pequeños. Además, el cambio de contacto elástico, para fuerzas pequeñas, a contacto elástico-plástico, para fuerzas mayores, puede provocar una reducción de μ al aumentar N .

Palabras clave: fricción, coeficiente de fricción, fuerza normal, leyes clásicas de fricción, Coulomb.

ABSTRACT

The results of the research related to the dependency of the friction coefficient, μ , between two solid surfaces, on the normal force, N , is presented. A review of models and experimental results in this area is made, and results of friction experiments with steel wire bristles for street sweepers are referred. Many theoretical and experimental works have shown that μ may increase or decrease when N increases. However, the literature indicates that mostly μ reduces as N is increased. This mainly occurs for small forces and very smooth surfaces. It is concluded that this phenomenon may be caused by several factors. Adhesion forces, which affect very smooth surfaces, tend to be significant when N is small and have the effect of increasing μ . The differences in the contact radii of the asperities may also cause this phenomenon. When N is small, a great number of asperities in contact have small radii, and large shear friction stresses may be developed. In contrast, for large forces, the larger contact radii dominate friction; friction stresses, which are smaller than the shear ones, appear producing small friction coefficients. It is also concluded that the change from elastic contact, for small forces, to elastic-plastic contact, for larger ones, may reduce μ when N increases.

Key words: friction, friction coefficient, normal force, classical laws of friction, Coulomb friction.

1. INTRODUCCIÓN

El rozamiento (fricción) es la resistencia al movimiento cuando dos cuerpos en contacto se mueven o se intentan mover tangencialmente uno con respecto al otro, o cuando se intenta rodar uno sobre el otro. Rabinowicz (1995) plantea que la fricción se produce por fuerzas tangenciales transmitidas a través del contacto, cuando las superficies son presionadas a través de una fuerza normal. La resistencia debida al rozamiento corresponde a una fuerza que es opuesta al sentido del movimiento o a la dirección en la cual se intenta desplazar el cuerpo. Consecuentemente, dicha resistencia puede generar la disminución de la velocidad relativa entre las superficies. No existe deslizamiento relativo si la componente de la fuerza externa tangencial al plano de movimiento es tan pequeña que no logra vencer la fuerza de fricción. Ocurre desplazamiento relativo si la magnitud de la fuerza externa es lo suficientemente grande; más grande que la máxima fuerza de fricción que la interface puede soportar.

En la literatura sobre interacción de superficies, se ha reportado que el rozamiento depende de factores que no sólo involucran la naturaleza del material, sino también condiciones que determinan la unión (cierre) de sus elementos, condiciones ambientales y condiciones de operación. La magnitud de la fuerza normal, la velocidad de deslizamiento, el estado superficial, la humedad relativa y la dirección del movimiento son algunos de los factores que afectan las condiciones de fricción. Por ejemplo, el coeficiente de fricción tiende a ser mayor para superficies lisas (Paslay & Plunkett, 1953; Rabinowicz, 1995). Además, la medida del coeficiente de fricción puede variar sustancialmente debido a los diferentes métodos para estudiar la fricción y a los aparatos y dispositivos para caracterizarla. Con respecto a esto último, Jeswiet et al. (2005) argumentan que el mejor método para obtener la fuerza de fricción es la técnica de punzón-disco.

Se han presentado muchos modelos que tratan de representar o explicar las características de la fricción. En general, estos modelos están basados en muchas asunciones y no han sido totalmente representativos o satisfactorios en su aplicación. Por otro lado, la literatura reporta rangos de valores para los coeficientes de fricción, los cuales son producto de suposiciones de diferentes modelos o de ensayos experimentales con diversas características y condiciones. Debido a éstos y otros factores,

no se tiene un resultado definitivo sobre el comportamiento real de la fricción. En algunas aplicaciones se requieren modelos más exactos que involucren más aspectos que intervienen en la fricción. Estos modelos deben apoyarse en datos experimentales.

En este trabajo se investiga el efecto que tiene la magnitud de la fuerza normal sobre el coeficiente de fricción. El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se habla sobre algunos modelos de la literatura que describen la mecánica de la fricción y sobre los cuales se tiene evidencia experimental para validarlos. Posteriormente, se describen y discuten los resultados de pruebas experimentales que han mostrado que el coeficiente de fricción depende de la magnitud de la fuerza normal. Finalmente, la sección 4 concluye el artículo.

2. MODELOS DE FRICCIÓN

Las primeras ecuaciones que modelan la fricción en los cuerpos son atribuidas a Amontons y a Coulomb. Se plantea que, en condiciones de deslizamiento o deslizamiento inminente, la fuerza de fricción, f , es proporcional a la fuerza normal, N , lo que define el coeficiente de fricción, μ , de la forma:

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

Esta es una de las tres leyes cuantitativas de la fricción deslizante (Rabinowicz, 1995). Entonces, μ , que depende de las características de los materiales en contacto, es constante e independiente de la fuerza normal. La segunda ley declara que la fuerza de fricción es independiente del área de contacto aparente, A_a , por lo que cuerpos pequeños o grandes tienen igual valor de μ . Estas leyes han sido sustentadas teóricamente y tienden a representar satisfactoriamente muchos casos de fricción (Rabinowicz, 1995).

Sin embargo, resultados de muchos autores (por ejemplo, Paslay & Plunkett (1953), Chang et al. (1988), Etsion & Amit (1993), Rabinowicz (1995), Sahoo & Chowdhury (2000), Adams et al. (2003), Adams & Müftü (2005), Etsion et al. (2005), Jeong & Yong (2007) y Unal & Findik (2008)) han revelado teórica o experimentalmente que el coeficiente de fricción depende de la fuerza normal. Principalmente, se ha mostrado que μ decrece cuando N se incrementa.

Por ejemplo, de acuerdo con un modelo en Chang et al. (1988) para el coeficiente de fricción estático, μ_s , la fuerza normal tiene un gran efecto sobre μ_s , especialmente para superficies muy lisas sometidas a pequeñas fuerzas normales. También, Adams et al. (2003) demuestran teóricamente que μ decrece con N principalmente para fuerzas pequeñas y cuando la superficie es muy lisa y tiende a ocurrir contacto de asperezas en escala nanométrica. Similarmente, Rabinowicz (1995) plantea que el coeficiente de fricción puede variar con la fuerza normal, especialmente cuando ésta es del orden de miligramos o para materiales muy duros como el diamante o muy blandos como el Teflón. Posibles explicaciones de éste y otros fenómenos se dan a continuación y en la sección 3.

Archard (1961) explica que la reducción en el coeficiente de fricción con el incremento de la fuerza normal es más pronunciado en un contacto elástico que en uno plástico; cuando hay contacto plástico el coeficiente de fricción tiende a ser independiente de la carga. Basándose en un contacto Hertziano (elástico) entre una aspereza esférica y una superficie plana, al ser el área de la huella de contacto, A , proporcional a $N^{2/3}$ y la fuerza de fricción requerida para cizallar la aspereza proporcional a dicha área:

$$A \propto N \quad \text{y} \quad f \propto A, \quad (2)$$

se argumenta que,

$$\mu = \frac{f}{N} \propto \frac{N}{N}, \quad \text{o} \quad \mu \propto N^0, \quad (3)$$

En conclusión, para valores pequeños de N , el coeficiente de fricción está dominado por la cizalladura de las asperezas, lo cual está de acuerdo con lo discutido por Adams et al. (2003), y $\mu \propto N^{-1/3}$. Como la fricción está determinada por la resistencia a la cortadura, μ tiende a ser grande.

Cuando el contacto es plástico, el área A es proporcional a la fuerza N :

$$A \propto N \quad \text{y} \quad f \propto A, \quad (4)$$

entonces

$$\mu = \frac{f}{N} \propto \frac{N}{N}, \quad \text{o} \quad \mu \propto N^0, \quad (5)$$

es decir, el coeficiente de fricción es independiente de la fuerza normal. La deformación plástica de las asperezas tiene el efecto de reducir el coeficiente de fricción (Nolle & Richardson, 1974).

Para el contacto entre superficies rugosas, donde algunas asperezas operarán bajo contacto elástico y otras con contacto plástico, μ puede expresarse como

$$\mu \propto N^{-m} \quad \text{o} \quad \mu = CN^{-m}, \quad (6)$$

donde $0 \leq \mu \leq 1/3$.

Como se verá más adelante, varios autores (por ejemplo, Comaish & Bottoms (1971) y Zatsiorsky (2002)) reportan que la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal puede describirse como:

$$f = \mu N^n \quad (7)$$

donde el exponente n es una constante menor a 1. En la sección 3 se mostrará que las Ecs. (6) y (7) son equivalentes.

De muchos trabajos teóricos sobre el área real de contacto de una superficie rugosa, A_r , la cual influye directamente sobre la fuerza de fricción, se concluye que dicha área es independiente del área de contacto aparente, A_a . En muchos de estos trabajos se modela el contacto de una sola aspereza esférica, y esto se incorpora en un modelo estadístico para varias asperezas. Ejemplos son el modelo GW (Greenwood & Williamson, 1966), para contacto primordialmente elástico, el modelo PW (Pullen & Williamson, 1972), para contacto plástico puro, y el modelo CEB (Chang et al., 1987; Chang et al., 1988), para contacto elástico-plástico. Recientemente, modelos elasto-plásticos, basados en elementos finitos, han sido suministrados por Kogut & Etsion (2002) y Kogut & Etsion (2003). Ambos modelos contradicen también las leyes clásicas de fricción y, de acuerdo con Etsion et al. (2005), predicen el coeficiente de fricción estática para contacto esférico con más precisión que modelos anteriores. Ensayos experimentales han sido reportados para validar algunos de los modelos mencionados; resultados de dichos ensayos se presentan en la siguiente sección.

Un resultado importante en Kogut & Etsion (2003), es que el modelo (esfera-superficie plana) predice que μ_s depende de un parámetro adimensional, N/N_c , donde N_c es la fuerza normal crítica, que corresponde a la carga con la cual aparece fluencia por primera vez. La fuerza crítica

N_c es proporcional a H^3D^2/E^2 , donde D es el diámetro de la esfera, H es la dureza de la esfera (más suave que la superficie plana) y E es el módulo de elasticidad combinado del contacto. Cuando $N/N_c < 1.3$, el contacto es elástico y para $N/N_c > 1.3$, comienza a ser elástico-plástico (Etsion et al., 2005).

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

En muchas aplicaciones, se ha mostrado experimentalmente que el coeficiente de fricción varía al aumentar la fuerza normal (generalmente disminuye). En esta sección se revisan resultados de pruebas experimentales sobre fricción entre diversos materiales, en las que se muestra dicho comportamiento. Por ejemplo, Archard (1961) muestra que el coeficiente de fricción decrece al incrementar la fuerza normal para $N > 100$ N. Sin embargo, en el rango $10 \text{ N} < N < 50 \text{ N}$, el coeficiente de fricción tiende a ser constante, como lo predice la ley de Coulomb. Similarmente, Jeong & Yong (2007) presentan resultados experimentales que muestran que, para una bola de acero en contacto con una superficie plana oscilando a 1 Hz, el coeficiente de fricción es casi constante para $N < 20$ N y se reduce al aumentar N más arriba de 20 N. Los autores deducen que a 20 N se pasa de deslizamiento (sliding o gross slip regime) a adhesión (sticking o mixed-slip regime). De otro lado Rabinowicz (1986) presenta resultados experimentales obtenidos con un material de un sistema de grabación magnética. Para un rango de fuerzas normales de $0.01 < N < 10$ N, el coeficiente de fricción decrece con el incremento de la carga y presenta un comportamiento dado por la Ec. (6). De acuerdo con Rabinowicz (1986), el exponente m está en el rango $0 \leq m \leq 0.33$. Rabinowicz & Kaymaram (1991) muestran un comportamiento similar en discos magnéticos rígidos particulados.

3.2. Materiales viscoelásticos

Un caso en el cual se ha mostrado que μ depende de N es en el contacto entre la piel y diversas superficies (Comaish & Bottoms, 1971; Han et al., 1996; Koudine et al., 2000; Sivamani et al., 2003; Tomlinson et al., 2007a). Para materiales viscoelásticos, Unal et al. (2004) and Unal et al. (2006) reportan que para algunos polímeros el coeficiente de fricción decrece linealmente con el incremento de la fuerza normal, pero sólo hasta cierto

valor de ésta. Pero en otro estudio, Unal & Mimaroglu (2003) muestran que μ aumenta con el incremento de N. Similarmente, para el caso de contacto piel-objeto, McDonnell et al. (2005) muestran que un aumento en el área de contacto, que puede ser producido por un aumento de la fuerza normal, incrementa el coeficiente de fricción. Realmente, el comportamiento de los materiales viscoelásticos es diferente de aquellos que no lo son (Tomlinson et al., 2007b); éstos no cumplen la ley de Coulomb (Ec. (1)), y la fuerza de fricción depende del área de contacto (Comaish & Bottoms, 1971).

Algunos de los resultados disponibles se han organizado en la Figura 1. En todas estas gráficas se observa que μ disminuye al aumentar N. Además de otras razones discutidas más adelante, esto puede atribuirse a la mayor rigidez de la piel cuando las cargas son mayores, lo que reduce el mecanismo de histéresis de fricción (Tomlinson et al., 2007b). La piel es un material viscoelástico que está compuesto por elastina y fibras de colágeno que actúan activamente en diferentes etapas del contacto. Para fuerzas normales pequeñas, la piel se estira linealmente debido a la elastina. Para fuerzas mayores, las fibras de colágeno comienzan a estirarse aumentando la rigidez de la piel. Los diferentes valores de μ se deben a que los experimentos son de diferente índole y con diferentes materiales, partes de la piel, fuerzas y sujetos.

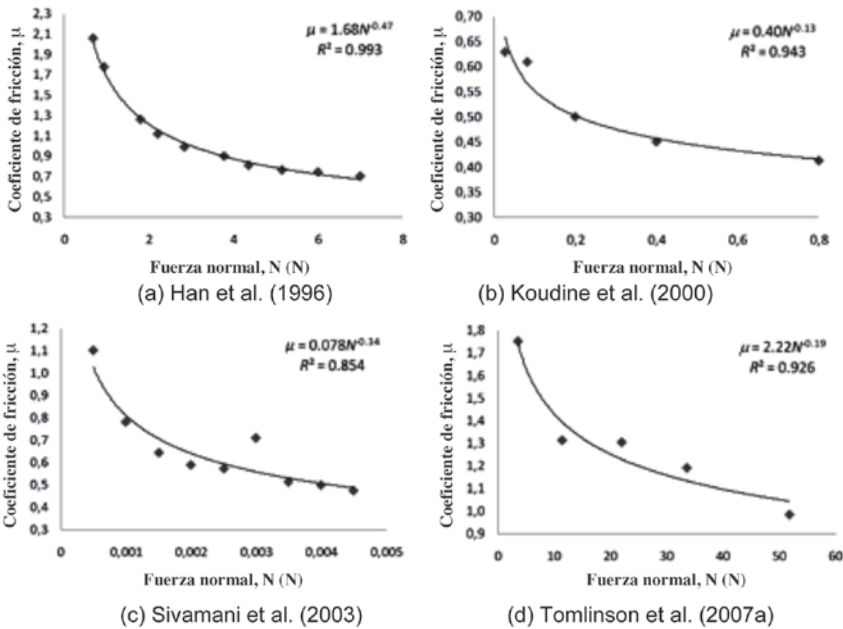


Figura 1. Curvas μ - N para diversos contactos piel-superficie

Para los resultados experimentales, se han obtenido líneas de tendencia de la forma:

$$\mu = \frac{f}{N} = CN^{n-1} \quad (8)$$

Se suministra también el valor de R^2 . En general, las líneas se ajustan aceptablemente a los datos experimentales. La Ec. (8) se ha definido de dicha forma, ya que corresponde al modelo descrito por la Ec. (7): de la Ec. (8) se obtiene que

$$\frac{f}{N} = CN^{n-1}, \quad \text{entonces} \quad f = CN^{n-1}N = CN^n \quad (9)$$

de donde, comparando la expresión anterior ($f = CN^n$) con la Ec. (7), se deduce que en el modelo de esta última ecuación, μ se toma igual al valor obtenido de C en la Figura 1 y que n se toma igual a 1 más el exponente de N en la Ec. (8). Por lo tanto, de los resultados de la Figura 1, los valores de n son 0.53, 0.87, 0.66 y 0.81.

Los valores de n obtenidos en estos casos oscilan entre 0.53 y 0.87, lo que concuerda con la sugerencia de que $n < 1$ (por ejemplo, Tomlinson et al. (2007b)). Aunque la literatura indica que $n \approx 0.3$ (Koudine et al., 2000; Sivamani et al., 2003) o $0 \leq n \leq 0.33$ (Archard, 1961; Rabinowicz, 1986; Rabinowicz & Kaymaram, 1991), en el caso de fricción piel-objeto, las características de la piel hacen que el comportamiento de fricción sea diferente, como se discutió anteriormente. Los valores del coeficiente μ para el contacto piel-superficie son altos ($0.33 \leq \mu \leq 2.5$, según Tomlinson et al. (2007b)). Por ejemplo, valores pequeños corresponden a acero inoxidable y valores grandes a caucho y papel. En las gráficas de la Figura 1, $0.078 \leq \mu \leq 2.2$.

Utilizando el método del punzón sobre disco, Unal & Findik (2008) investigaron el comportamiento tribológico de poliamidas y poliamidas reforzadas con fibra de vidrio en contacto con discos de compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio. El aparato usado consta de un disco giratorio (accionado por un motor de velocidad variable), sobre el cual se presiona un punzón estacionario. El punzón está fijo a un brazo articulado, con pesas en el extremo para suministrar la presión entre el punzón y el disco. La Figura 2 muestra el coeficiente de fricción dinámico promedio (obtenido de datos para 1 km de deslizamiento) para tres valores de N . La tendencia promedio es una reducción de μ con el aumento de la fuerza. Al igual que la piel, estos materiales tienen un

comportamiento viscoelástico. La temperatura incide significativamente en su comportamiento; por lo tanto, μ tiende a depender de N , ya que ésta afecta el nivel de calor generado y la temperatura durante el deslizamiento.

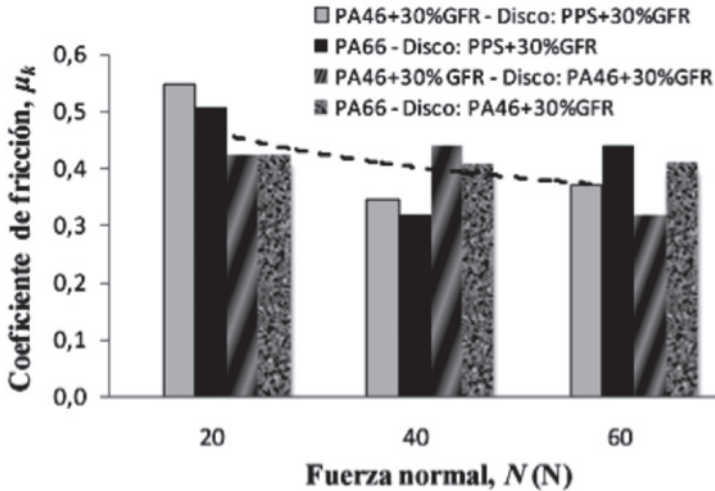


Figura 2. Coeficiente de fricción cinético, μ_k , promedio para tres fuerzas normales en contactos entre polímeros y compuestos (fuente: Unal & Findik - 2008)

3.3. Fricción en metales y cerámicos

Etsion & Amit (1993) investigaron el efecto de fuerzas normales pequeñas en superficies muy lisas, para validar el modelo de Chang et al. (1988) (sección 2). Se investigó la fricción entre tres probetas pequeñas de aleaciones de aluminio con un disco de aluminio recubierto con una capa dura y lisa de níquel. A manera de ejemplo, la Figura 3 muestra los resultados experimentales para Al 2024 sobre níquel para dos humedades relativas. Las otras dos aleaciones de aluminio presentaron comportamientos similares. Las líneas de regresión son de la forma dada por la Ec. (6). De los resultados se concluye que en este caso μ disminuye significativamente al aumentar la fuerza normal. Además, μ_s es mayor para la mayor humedad relativa. Según Etsion & Amit (1993), esto puede deberse a que el vapor de agua hace un “puente” entre las asperezas que no están en contacto, incrementando sustancialmente el área de contacto y, consecuentemente, las fuerzas de adhesión, ya que éstas son mayores para mayores áreas de contacto. Entonces, μ_s tiende a ser mayor, como se explicará más adelante (Ec. (10)). Estos resultados parecen validar el modelo de Chang et al. (1988).

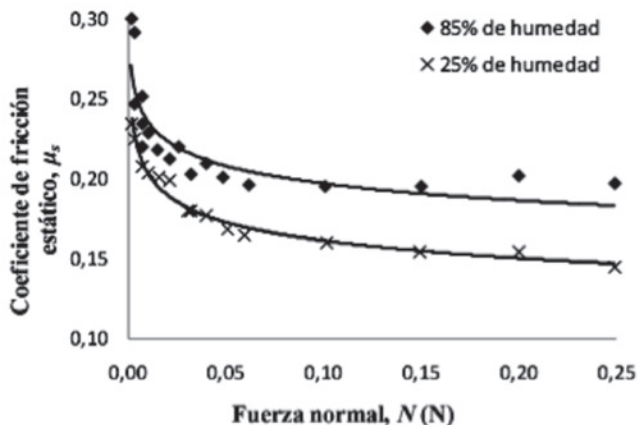


Figura 3. Curvas $\mu_s - N$ para contacto Al 2024 sobre níquel (fuente: Etsion & Amit - 1993)

Jeong & Yong (2007) investigaron la fricción entre bolas de acero aleado con cromo y superficies oscilantes de acero AISI 1045. En este tipo de ensayo (fretting conditions) las condiciones de fricción son tales que ocurren ciclos de adhesión (sticking) y deslizamiento (sliding). La Figura 4 muestra los puntos experimentales de coeficiente de fricción contra fuerza normal. Los autores concluyen que para $N < 20$ N ocurre deslizamiento entre la bola y la superficie y para $N > 20$ N tiende a ocurrir adherencia (la bola y la superficie tienden a oscilar como un solo cuerpo). La curva para $N < 20$ N es similar a otras curvas mostradas anteriormente, para la cuales μ puede modelarse con la Ec. (6).

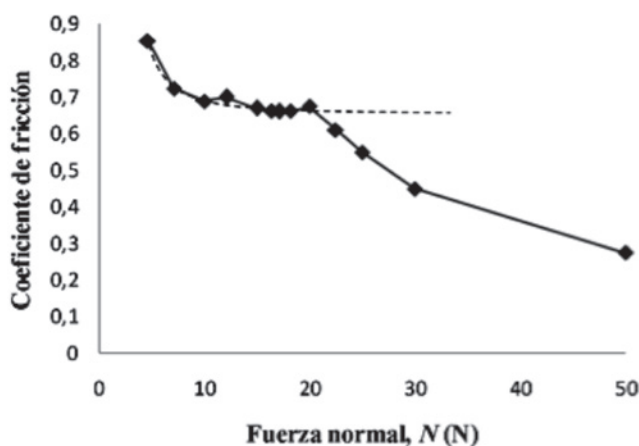


Figura 4. Curvas $\mu - N$ para bolas de acero sobre superficie de acero oscilante (fuente: Jeong & Yong - 2007)

Para $N > 20$ N ocurre un cambio abrupto en la curva, lo cual puede deberse a lo siguiente. A partir de este valor de N , el deslizamiento tiende a desaparecer. En ausencia de deslizamiento, la Ec. (1) no se satisface (excepto cuando el deslizamiento es inminente), siendo $f < \mu N$. Aunque el autor no especifica cómo se calculó el coeficiente de fricción, aparentemente éste se obtuvo con la Ec. (1). Entonces, si ocurre adherencia entre las superficies, el valor verdadero de μ sería mayor que f/N y no el dado por dicha ecuación. Podría especularse que μ seguiría la línea a trazos mostrada en la Figura 4.

Etsion et al. (2005) realizaron experimentos de fricción con probetas esféricas de cobre en contacto con superficies de zafiro o acero. La superficie "rígida" se hizo desplazar a 450 mm/s, y se midió la fuerza de fricción entre ésta y la probeta "blanda" de cobre. De los experimentos se determinaron los coeficientes de fricción estática para diferentes diámetros de probetas y $1 \text{ N} \leq N \leq 120 \text{ N}$. La Figura 5 presenta las curvas μ_s contra N para la superficie de zafiro. Similar a otros resultados experimentales reportados arriba, las tendencias de las curvas siguen el modelo de la Ec. (6). Se obtuvieron diferentes valores de μ_s para los tres diámetros de probetas. Con el fin de verificar que μ_s depende de N/N_c (como lo predice el modelo de Kogut & Etsion (2003)), los autores graficaron el coeficiente de fricción estática contra este parámetro adimensional. Como ejemplo, la Figura 6 muestra los resultados para la superficie de zafiro. La convergencia de éstos parece sugerir que la predicción de que μ_s depende de N/N_c es cierta. Por otro lado, comparaciones de estos resultados experimentales con los del modelo de Kogut & Etsion (2003) parecen indicar que éste no predice adecuadamente el valor de μ_s , aunque sí predice que μ_s disminuye con el aumento de N .

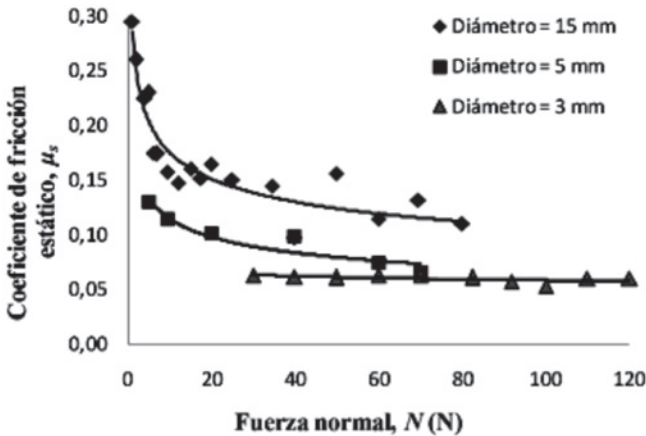


Figura 5. Curvas $\mu_s - N$ del contacto entre probetas de cobre sobre zafiro (fuente: Etsion et al. - 2005)

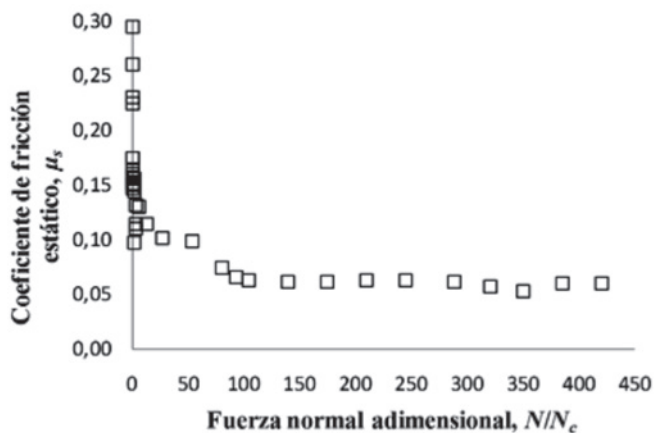


Figura 6. Curvas $\mu_s - N/N_c$ del contacto entre probetas de cobre sobre zafiro (fuente: Etsion et al. - 2005)

Finalmente, los autores del presente trabajo realizaron pruebas experimentales para determinar μ_s y μ_k para el contacto de barras rectangulares de acero de $2 \times 0.5 \text{ mm}^2$; éstas corresponden a las cerdas usadas en cepillos laterales para barrer calles. Se utilizó el método de la superficie inclinada. Los resultados se presentan en La Figura 7, en la cual se observa que tanto μ_s como μ_k decrecen al aumentar N , cuando ésta es muy pequeña. Cuando $N > 0.3 \text{ N}$, el coeficiente de fricción parece ser prácticamente constante, y se cumpliría la ley de Coulomb dada por la Ec. (1). Las curvas demuestran también que μ_k es más pequeño que μ_s . Las barras de error en la figura representan errores estándar.

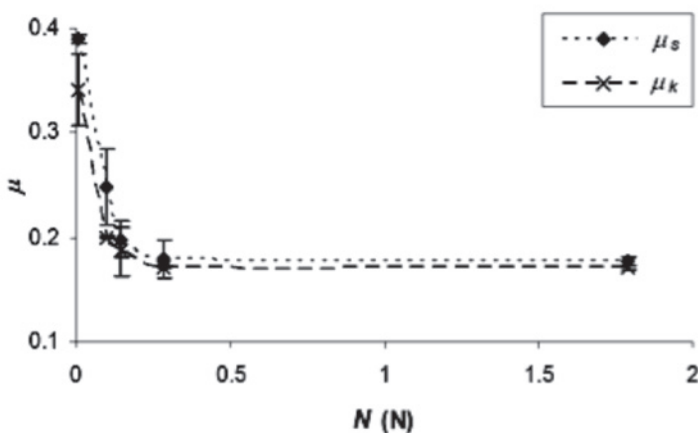


Figura 7. Curvas $\mu_s - N$ y $\mu_k - N$ para el contacto de un par de cerdas de acero para barrido de calles

3.4. Discusiones adicionales

Como se ha discutido anteriormente (Ecs. (3) a (6)), una explicación de la reducción de μ al aumentar N es que el contacto pasa de ser elástico a plástico, pasando el área real de contacto de ser proporcional a $N^{2/3}$ a N (Archard, 1961). Por otro lado, se ha argumentado que la explicación de este fenómeno es más bien que a medida que aumenta la fuerza normal, las asperezas que fallan por compresión tienden a perder habilidad para resistir fuerza tangencial adicional (Chang et al., 1988). Esto está de acuerdo con Nolle & Richardson (1974), quienes argumentan que la deformación plástica de las asperezas reduce el valor de μ . Cuando la fuerza normal es pequeña, ocurre también otro fenómeno. La fuerza normal de contacto, F_c , entre dos superficies es igual a la suma de la fuerza normal aplicada, N , y la fuerza de adhesión, F_s . Entonces, de la Ec. (1):

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{f}{F_c - F_s}. \quad (10)$$

Como la fuerza de adhesión, F_s , tiende a ser muy pequeña, ésta podría ser despreciable si N es suficientemente grande. Sin embargo, F_s tiende a ser significativa para valores pequeños de la fuerza normal y tiene el efecto de aumentar el coeficiente de fricción.

Como se dijo anteriormente, según Adams et al. (2003), μ decrece con N , especialmente cuando N es pequeña y para superficies muy lisas. Esto se atribuye primordialmente a las fuerzas de adhesión, las cuales afectan a las superficies muy lisas. Sin embargo, esto también ocurre en el modelo de Adams et al. (2003), cuando no existen fuerzas de adhesión y la superficie está altamente contaminada. Probablemente, esto se debe 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. Por otro lado, cuando N es grande, los radios de contacto más grandes dominan la fuerza de fricción, aunque el esfuerzo por fricción sea más bajo.

Según el modelo de Hurtado y Kim (Adams et al., 2003), si los radios de contacto son más pequeños que cierto valor, el esfuerzo de fricción es constante. Por encima de este valor, el esfuerzo de fricción disminuye con el aumento del radio de contacto hasta cierto punto, donde el esfuerzo de fricción vuelve a ser independiente del tamaño de contacto. Es decir, para

fuerzas pequeñas aparecen grandes esfuerzos cortantes, produciendo grandes coeficientes de fricción. Para fuerzas más grandes, aparecen los esfuerzos de fricción, los cuales son menores que los cortantes, generando coeficientes de fricción más pequeños.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se investigó la variación del coeficiente de fricción con respecto a la fuerza normal. Se revisaron varios modelos que están de acuerdo o no con las leyes clásicas de fricción. Además, se presentaron resultados experimentales que muestran que μ disminuye al aumentar N . En particular, se suministraron resultados de experimentos donde se estudió la fricción entre cerdas de acero para barredoras de calles.

Se concluye que μ tiende a reducirse al aumentar N , para cierto rango de ésta. Dicho rango depende de los materiales en contacto y de las características de éste. Esto ocurre primordialmente cuando las fuerzas normales son pequeñas o cuando las superficies en contacto son muy lisas. Se concluye también que la variación de μ con N puede deberse a varios factores. Como las fuerzas de adhesión tienden a volverse significativas cuando N es pequeña y las superficies son muy lisas, éstas fuerzas aumentan el valor de μ .

Por otro lado, en los contactos entre superficies rugosas, cuando N es pequeña un gran número de asperezas en contacto tiene radios pequeños, y se podrían generar esfuerzos cortantes de fricción grandes. En contraste, los radios de contacto más grandes dominan la fricción cuando las fuerzas son grandes. Los esfuerzos de fricción que aparecen producen coeficientes de fricción más pequeños, ya que dichos esfuerzos son menores que los cortantes. Además, el cambio de contacto elástico, para fuerzas pequeñas, a contacto elástico-plástico, para fuerzas mayores, puede provocar una reducción de m al aumentar N .

Finalmente, se concluye que la fricción depende de la interacción de tantos factores que es difícil entenderla completamente; se requiere de mucha investigación para comprender mejor los fenómenos involucrados y para desarrollar modelos teóricos o numéricos más generales y exactos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de la Universidad Tecnológica de

Pereira, la Universidad de Surrey (Reino Unido) y el Programa Alban, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina, n° de identificación (E03D04976CO).

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, G. G., Müftü, S., & Azhar, N. M. (2003). ***A Scale-dependent Model for Multi-asperity Contact and Friction***. J. Tribology – Transactions of the ASME 125, 700-708.
- Adams, G. G., & Müftü, S. (2005). ***Improvements to a Scale-dependent Model for Contact and Friction***. J. Physics D: Applied Physics 38, 1402-1409.
- Archard, J. F. (1961). ***Single Contacts and Multiple Encounters***. J. Applied Physics 32 (8) 1420-1425.
- Chang, W. R., Etsion, I., & Bogy, D. B. (1987). ***Elastic Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces***. J. Tribology – Transactions of the ASME 109, 257-262.
- Chang, W. R., Etsion, I., & Bogy, D. B. (1988). ***Static Friction Coefficient Model for Metallic Rough Surfaces***. J. Tribology – Transactions of the ASME 110, 57-63.
- Comaish, S. & Bottoms, E. (1971). ***The Skin and Friction: Deviations from Amonton's Laws, and the Effects of Hydration and Lubrication***. Br. J. Dermatology 84 (1), 37-43.
- Etsion, I., & Amit, M. (1993). ***The Effect of Small Normal Loads on the Static Friction Coefficient for very Smooth Surfaces***. J. Tribology – Transactions of the ASME 115, 406-410.
- Etsion, I., Levinson, O., Halperin, G., & Varenberg, M. (2005). ***Experimental Investigation of the Elastic-plastic Contact Area and Static Friction of a Sphere on Flat***. J. Tribology – Transactions of the ASME 127, 47-50.
- Greenwood, J. A., & Williamson, J. B. P. (1966). ***Contact of Nominally Flat Surfaces***. Proc. R. Soc. London. Ser. A 295, 300-319.

- Han, H.-Y., Shimada, A., & Kawamura, S. (1996). **Analysis of Friction on Human Fingers and Design of Artificial Fingers**. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Minneapolis, Minesota, p. 3061-3066.
- Jeong, S.-H., & Yong, S.-J. (2007). **Friction and Wear Characteristics Due to Stick-slip under Fretting Conditions**. *Tribology Transactions* 50, 564-572.
- Jeswiet, J., Arentoft, M., & Henningsen, P. (2005). **Methods and Devices Used to Measure Friction in Rolling**. *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture* 220, 49-57.
- Kogut, L., & Etsion, I. (2002). **Elastic-plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat**. *J Applied Mechanics – Transactions of the ASME* 69, 657-662.
- Kogut, L., & Etsion, I. (2003). **A Semi-analytical Solution for the Sliding Inception of a Spherical Contact**. *J Tribology – Transactions of the ASME* 125, 499-506.
- Koudine, A. A., Barquins, M., Anthoine, P. H., Aubert, I., & Leveque, J. L. (2000). **Frictional Properties of Skin: Proposal of a New Approach**. *Int. J. Cosmet. Sci.* 22, 11-20.
- McDonnell, M. N., Ridding, M. C., Flavel, S. C., & Miles T. S. (2005). **Effect of Human Grip Strategy on Force Control in Precision Tasks**. *Expl. Brain Res.* 16, 1368-1373.
- Nolle, H., & Richardson, R. S. H. (1974). **Static Friction Coefficients for Mechanical and Structural Joints**. *Wear* 28, 1-13.
- Paslay, P. R., & Plunkett, R. (1953). **Design of Shrink-fits**. *Transactions of the ASME* 75, 1199-1202.
- Pullen, J., & Williamson, J. B. P. (1972). **On the Plastic Contact of Rough Surfaces**. *Proc. R. Soc. London. Ser. A* 327, 159-173.
- Rabinowicz, E. (1986). **The Tribology of Magnetic Recording Systems – an Overview**. *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems* 3, 1-7.

- Rabinowicz, E. (1995). ***Friction and Wear of Materials***. 2nd edition, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Rabinowicz, E., & Kaymaram, F. (1991). ***On the Mechanism of Failure of Particulate Rigid Disks***. Tribology Transactions 34 (4), 618-622.
- Sahoo, P., & Chowdhury, S. K. R. (2000). ***A Fractal Analysis of Adhesive Friction between Rough Solids in Gentle Sliding***. Proc. I MECH E Part J. Eng. Tribology 214, 583-595.
- Sivamani, R. K., Goodman, J., Gitis, N. V., & Maibach, H. I. (2003). ***Friction Coefficient of Skin in Real Time***. Skin Res. Technol. 9, 235-239.
- Tomlinson, S. E., Lewis, R., & Carré, M. J. (2007a). ***Improving the Understanding of Grip***. In The Impact of Technology on Sport II, p. 129-134.
- Tomlinson, S. E., Lewis, R., & Carré, M. J. (2007b). ***Review of the Frictional Properties of Finger-object Contact when Gripping***. Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology 221, 841-850.
- Unal, H., & Findik, F. (2008). ***Friction and Wear Behaviours of some Industrial Polyamides against different Polymer Counterparts under Dry Conditions***. Industrial Lubrication and Tribology 60 (4), 195-200.
- Unal, H., & Mimaroglu, A. (2003). ***Friction and Wear Behaviour of Unfilled Engineering Thermoplastics***. Materials and Design 24 (3), 183-187.
- Unal, H., Mimaroglu, A., & Arda, T. (2006). ***Friction and Wear Performance of some Thermoplastic Polymers and Polymer Composites against Unsaturated Polyester***. Applied Surface Science 252 (23), 8139-8146.
- Unal, H., Sen, U., & Mimaroglu, A. (2004). ***Dry Sliding Wear Characteristics of some Industrial Polymers against Steel Counterface***. Tribology International 37 (9), 727-732.
- Zatsiorsky, V. M. (2002). ***Kinetics of Human Motion***. In: Human Kinetics, Champaign, Leeds.