
FUERZAS DE FRICCIÓN

Si lanzamos un bloque de masa m a una velocidad inicial \vec{v}_0 a lo largo de una mesa horizontal larga, al final llegará al reposo. Esto significa que, mientras se está moviendo, experimenta una aceleración promedio \vec{a}_{med} que apunta en dirección opuesta a su movimiento.

Si vemos que un cuerpo es acelerado, lo asociamos una fuerza neta, definida por la segunda ley de Newton, con el movimiento. En este caso afirmamos que la mesa ejerce una fuerza de *fricción* sobre el bloque. Generalmente aceptamos que la fricción significa una interacción de contacto entre sólidos. Los efectos de la fricción en los líquidos y los gases se describen en otros términos.

En realidad, cuando la superficie de un cuerpo se desliza sobre la de otro, los dos cuerpos ejercen una fuerza de fricción entre ellos. La fuerza de fricción de cada cuerpo es de dirección opuesta a su movimiento relativo al otro cuerpo. Las fuerzas de fricción se oponen automáticamente a este movimiento relativo y nunca contribuyen a él. Aun cuando no exista un movimiento relativo, pueden existir fuerzas de fricción entre superficies, en este caso la fuerza de fricción se opone a la tendencia a moverse, es decir, se opone al posible movimiento.

Aunque hasta ahora no hemos tenido en cuenta estos efectos, la fricción es muy importante en nuestras vidas cotidianas. En un automóvil se usa alrededor del 20% de la potencia del motor para contrarrestar las fuerzas de fricción. La fricción causa el desgaste y agarre de partes en movimiento, y se lleva a cabo un gran esfuerzo de ingeniería para reducirlas.

Por otra parte, sin fricción no podríamos caminar; no podríamos sujetar un lápiz y si pudiésemos hacerlo, no podríamos escribir; el transporte sobre ruedas, tal como lo conocemos, no sería posible.

Queremos conocer cómo expresar las fuerzas de fricción en función de las propiedades del cuerpo y de su entorno; esto es, queremos conocer la ley de la fuerza para las fuerzas de fricción. En lo que sigue, consideraremos el deslizamiento (no el rodamiento) de una superficie seca (no lubricada) sobre otra. Como veremos más adelante, la fricción, vista a nivel microscópico, es un fenómeno muy complicado. Las leyes de la fuerza para una fricción seca, deslizante, son de carácter empírico y aproximado en sus predicciones. No tienen la sencillez elegante y la precisión que encontramos en la ley de la fuerza de la gravitación. Sin embargo, es notable, considerando la enorme diversidad de superficies que uno encuentra, que muchos aspectos del comportamiento de la fricción puedan ser entendidos cualitativamente sobre la base de unos cuantos mecanismos simples.

Consideremos un bloque en reposo sobre una mesa horizontal, como en la figura 1a. Unámosle un dinamómetro (instrumento para medir fuerza) para medir la fuerza horizontal F requerida para poner al bloque en movimiento. Encontramos que el bloque no se mueve todavía cuando aplicamos una fuerza pequeña (Fig. 1b). Decimos que la fuerza que aplicamos está equilibrada por una fuerza de fricción f opuesta, ejercida sobre el bloque por la mesa, que actúa a lo largo de la superficie de contacto. Al aumentar la fuerza aplicada (Fig. 1 c, d), hallamos alguna fuerza definida mediante la cual el bloque se "desprende" de la superficie y comienza a acelerar (Fig. 1e). Al reducir la fuerza una

vez que se ha iniciado el movimiento, encontramos que es posible mantener al bloque en movimiento uniforme sin aceleración (Fig. 1f). La figura 1g muestra los resultados de un experimento para medir la fuerza de fricción. Se aplica una fuerza F creciente en, aproximadamente, $t = 2$ s, después de lo cual la fuerza de fricción aumenta con la fuerza aplicada y el objeto permanece en reposo. En $t = 4$ s el objeto comienza súbitamente a moverse y la fuerza de fricción se vuelve constante, independientemente de la fuerza aplicada.

Las fuerzas de fricción que actúan entre superficies en reposo, una respecto a la otra, se llaman fuerzas de **fricción estática**. La fuerza máxima de fricción estática (correspondiente al pico en $t = 4$ s en la Fig. 1g) será la misma que la fuerza aplicada más pequeña necesaria para iniciar el movimiento. Una vez que se ha iniciado el movimiento, las fuerzas de fricción que actúan entre las superficies usualmente disminuyen de manera que sólo es necesaria una fuerza más pequeña para mantener un movimiento uniforme (correspondiente a la fuerza casi constante en $t > 4$ s en la Fig. 1g). Las fuerzas que actúan entre superficies en movimiento relativo se llaman fuerzas de **fricción cinética**.

La fuerza máxima de fricción estática entre cualquier par de superficies no lubricadas responde a estas dos leyes empíricas: (1) Es aproximadamente

independiente del área de contacto dentro de límites amplios, y (2) es proporcional a la fuerza normal.¹ La fuerza normal se debe a las propiedades elásticas de los cuerpos en contacto. Estos cuerpos nunca son enteramente rígidos, y cuando se ejerce una fuerza sobre un cuerpo que no puede moverse en dirección de la fuerza, el cuerpo empuja en contra para evitar ser estirado o deformado. En un bloque que está en reposo sobre una mesa horizontal o se desliza sobre ella, la fuerza normal es igual en magnitud al peso del bloque. Ya que el bloque no tiene aceleración vertical, la mesa debe ejercer una fuerza sobre el bloque dirigida hacia arriba, que es igual en magnitud al jalón hacia abajo de la Tierra sobre el bloque, esto es, igual al peso del bloque.

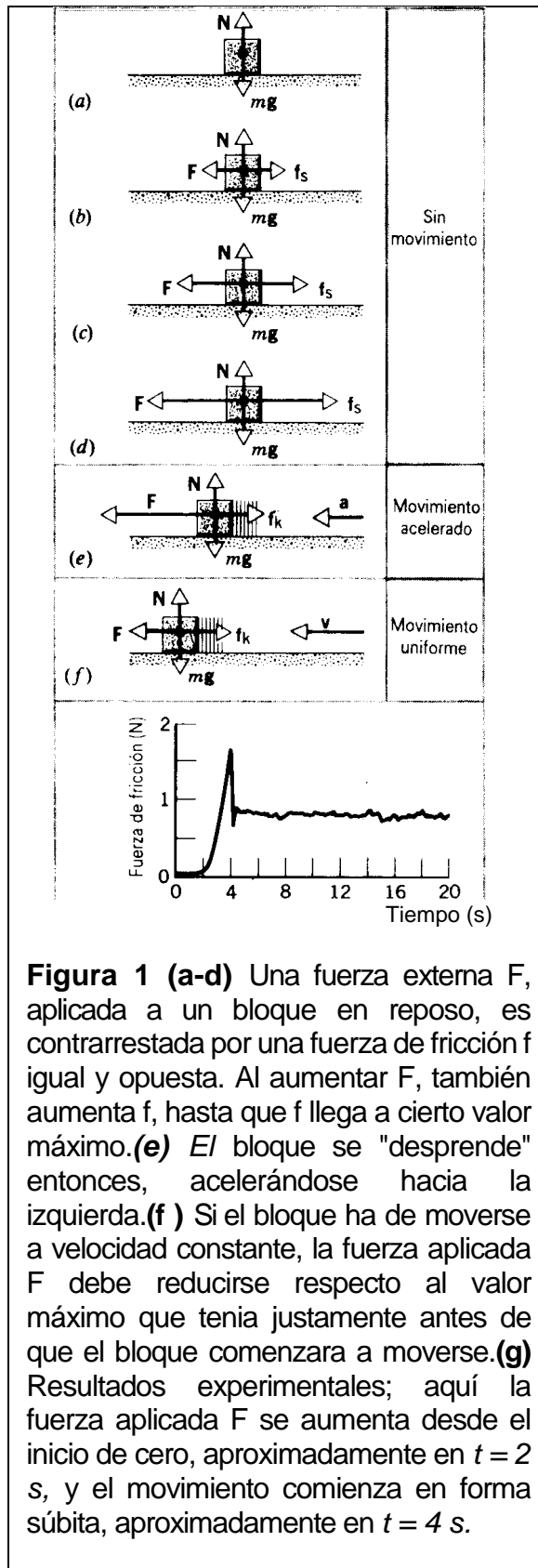
La razón entre la magnitud de la fuerza *máxima* de fricción estática y la magnitud de la fuerza normal se llama **coeficiente de fricción estática** de las superficies implicadas. Si f representa la magnitud de la fuerza de fricción estática, podemos escribir:

$$f_s \leq \mu_s N \quad (1)$$

donde μ_s es el coeficiente de fricción estática y N es la magnitud de la fuerza normal. El signo de igualdad se tiene sólo cuando f , alcance su valor máximo.

¹ Las dos leyes de la fricción fueron descubiertas experimentalmente por Leonardo da Vinci (1452-1519). El enunciado de las dos leyes de Leonardo fue notable, teniendo en cuenta que llegó a su

descubrimiento dos siglos antes de que Newton desarrollara los conceptos de fuerza. Las expresiones matemáticas de las leyes de la fricción y el concepto del coeficiente de fricción fueron desarrollados por Charles Augustin Coulomb (1736-1806), que es mejor conocido por sus estudios de electrostática.



La fuerza de fricción cinética f_k , entre superficies secas no lubricadas, sigue las mismas leyes que las dos de fricción estática.

1. Es aproximadamente independiente del área de contacto dentro de límites amplios
2. Es proporcional a la fuerza normal. La fuerza de fricción cinética es también razonablemente independiente de la velocidad relativa con la que las superficies se mueven entre sí.

La relación entre la magnitud de la fuerza de fricción cinética y la magnitud de la fuerza normal se llama **coeficiente de fricción cinética**. Si f , representa la magnitud de la fuerza de fricción cinética, entonces

$$f_k = \mu_k N \quad (2)$$

donde μ_k es el coeficiente de fricción cinética.

Tanto μ_s como μ_k son constantes sin dimensión, siendo cada una la razón de (las magnitudes de) dos fuerzas. Por lo general, para determinado par de superficies $\mu_s > \mu_k$. Los valores reales de μ_s y de μ_k dependen de la naturaleza de las dos superficies en contacto. En la mayoría de los casos podemos considerarlas como constantes (para un par dado de superficies) dentro de la gama de fuerzas y velocidades que encontramos comúnmente. Tanto μ_s como μ_k pueden exceder la unidad, aunque por lo general son menores de 1.

La tabla 1 muestra algunos valores representativos de μ_s y de μ_k .

Nótese que las ecuaciones 1 y 2 son relaciones entre las *magnitudes solamente* de las fuerzas normal y de fricción. Estas fuerzas están siempre

dirigidas perpendicularmente entre sí.

La base microscópica de la fricción

En la escala atómica aun la superficie más finamente pulida está lejos de ser plana. La figura 2, por ejemplo, muestra un perfil real, muy aumentado, de una superficie de acero que podría ser considerada como muy pulida. Podríamos creer que cuando dos cuerpos están en contacto, el área microscópica de contacto real es mucho menor que el área verdadera de la superficie; en un caso particular estas áreas estarían fácilmente en una razón de 1:10.

El área (microscópica) de contacto real es proporcional a la fuerza normal, porque los puntos de contacto se deforman plásticamente bajo los grandes esfuerzos que se desarrollan en ellos. Muchos puntos de contacto realmente resultan "soldados en frío". Este fenómeno, llamado *adhesión superficial*, ocurre a causa de que los puntos de contacto de las moléculas en lados opuestos de la superficie están tan próximos entre sí que ejercen fuerzas intermoleculares fuertes entre ellas.

TABLA 1 COEFICIENTES DE FRICCIÓN²

Superficies	μ_s	μ_k
Madera contra madera	0.25-0.50	0.20
Vidrio contra vidrio	0.90-1.0	0.40
Acero contra acero, superficies limpias	0.60	0.60
Acero contra acero, superficies lubricadas	0.090	0.050
Hule contra concreto seco	1.0	0.80
Madera encerada de un esquí contra nieve seca	0.040	0.040
Teflón contra Teflón	0.040	0.040

² Los valores son aproximados y se dan sólo como estimaciones. Los coeficientes de fricción reales para cualquier par de superficies dependen de condiciones tales

Cuando un cuerpo (digamos, un metal) es arrastrado por encima de otro, la resistencia por fricción se asocia con la rotura de estos miles de pequeñísimas soldaduras, las cuales se vuelven a formar continuamente según va habiendo ocasión de nuevos contactos (véase la Fig. 3). Los experimentos de indicadores radiactivos han demostrado que, en el proceso de rotura, pequeños fragmentos de una superficie metálica pueden ser cortados y adherirse a la otra superficie. Si la velocidad relativa de las dos superficies es suficientemente grande, puede haber fusión local en ciertas áreas de contacto aun cuando la superficie, como un total, pueda sentirse sólo moderadamente tibia. El fenómeno de "pegarse y resbalar" es el causante de los ruidos que hacen las superficies secas cuando se deslizan una contra la otra como, por ejemplo, el chirrido de la tiza contra el pizarrón.

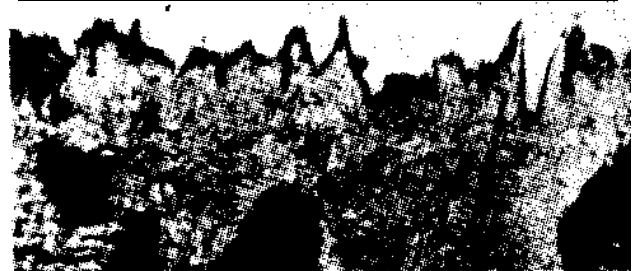


Figura 2 Una sección aumentada de una superficie de acero muy pulida. La escala vertical de las irregularidades de la superficie es de varios miles de diámetros atómicos. La sección ha sido cortada a un ángulo tal que la escala vertical resulta exagerada con respecto a la escala horizontal en un factor de 10.

El coeficiente de fricción depende de muchas variables, tales como la naturaleza de los materiales, el acabado de la superficie, las películas sobre la superficie, la

como la limpieza de las superficies, la temperatura, y la humedad.

temperatura y la cantidad de contaminación. Por ejemplo, si dos superficies de metal cuidadosamente limpias se sitúan en una cámara al alto vacío de modo que no se formen películas de óxido en ellas, el coeficiente de fricción se eleva a valores enormes y las superficies realmente se "suelan" entre sí con firmeza.

La admisión de una pequeña cantidad de aire a la cámara de modo que se puedan formar películas de óxido sobre las superficies opuestas reduce el coeficiente de fricción a su valor "normal"

La fuerza de fricción que se opone a un cuerpo que *rueda* sobre otro es mucho menor que en el movimiento deslizante; esto le da la ventaja a la rueda, que gira, sobre el trineo, que se desliza. Esta fricción reducida se debe en gran parte al hecho de que, al rodar, las soldaduras microscópicas de contacto se descascarillan en lugar de cortarse como en el caso de la fricción deslizante. Esto reduce la fuerza de fricción

en un factor grande.

La resistencia al rozamiento en la fricción seca, deslizante, puede reducirse considerablemente por medio de la lubricación. En una gruta en Egipto, un mural que data de 1900 A.C. muestra una gran estatua de piedra que es arrastrada sobre un vehículo a modo de trineo mientras el hombre enfrente del vehículo vierte aceite lubricante a su paso. Una técnica aún más eficaz consiste en introducir una capa de gas entre las superficies que se deslizan; dos ejemplos de ello son la mesa de aire del laboratorio y la chumacera soportada por gas. La fricción puede ser reducida aún más suspendiendo un objeto por medio de fuerzas magnéticas. Los trenes magnéticamente levitados que actualmente se hallan en desarrollo, tienen el potencial de viajar a alta velocidad, casi sin fricción.

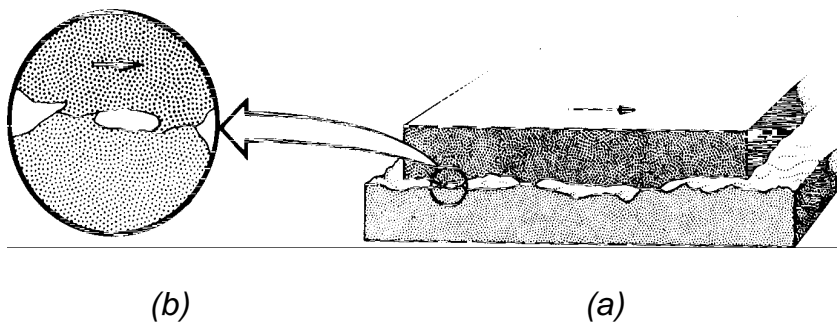


Figura 3 El mecanismo de la fricción deslizante. (a) En esta vista aumentada, la superficie superior se desliza hacia la derecha sobre la superficie inferior. (b) Un detalle, mostrando dos puntos en donde ha ocurrido una soldadura en frío. La fuerza es necesaria para romper estas soldaduras y mantener el movimiento.