

¿Por qué el rozamiento puede frenarnos y ayudarnos a caminar?

Juan Segurola · Todos los derechos reservados

QUE · Artículo 005 · Preguntas sencillas, respuestas profundas · Versión 0.1 ES

Una caja que se desliza pierde rapidez por el rozamiento. Una persona que empieza a caminar depende del rozamiento para avanzar. Estas observaciones familiares solo parecen incompatibles si definimos el rozamiento como una fuerza que siempre se opone al movimiento de un objeto. La pregunta más útil es qué harían las superficies de un contacto una respecto a la otra y cómo se opone el contacto a ese movimiento.

La distinción importa porque un objeto puede moverse mientras un contacto concreto permanece momentáneamente en reposo. Un zapato apoyado puede agarrarse al suelo mientras avanza el cuerpo de la persona. El rozamiento puede entonces actuar hacia delante sobre la persona sin que la suela se deslice hacia delante. Para comprender esas funciones aparentemente contradictorias, debemos separar el movimiento de un cuerpo, el movimiento en sus contactos y la conversión de energía mecánica en otras formas.

1. La fuerza responde al contacto

En un contacto deslizante sencillo, el rozamiento cinético actúa contra la velocidad relativa de deslizamiento. Una caja que viaja hacia la derecha sobre un suelo inmóvil experimenta una fuerza de rozamiento hacia la izquierda. El suelo experimenta una fuerza igual y opuesta. Las fuerzas actúan sobre cuerpos distintos, por lo que no se cancelan en la ecuación de movimiento de la caja por sí sola.

El rozamiento estático describe un contacto que no desliza. Su magnitud se ajusta a las fuerzas y restricciones de la situación concreta hasta un valor límite. Una pequeña fuerza horizontal sobre una caja inmóvil puede equilibrarse mediante una pequeña fuerza de rozamiento estático. Es incorrecto introducir la máxima fuerza de rozamiento posible en todos los problemas solo porque se conoce un coeficiente. El modelo empírico elemental distingue explícitamente entre la fuerza real y su cota superior [1].

Para un contacto con fuerza normal N , ese modelo escribe $|f_s| \leq \mu_s N$ antes del deslizamiento y $|f_k| \approx \mu_k N$ durante este. Los subíndices distinguen el rozamiento estático del cinético. Los coeficientes describen un par de superficies bajo condiciones especificadas. No son propiedades inmutables de una sustancia, y la aproximación no abarca todas las velocidades, lubricantes, temperaturas o geometrías de contacto.

2. Por qué el suelo puede impulsar hacia delante a quien camina

Durante una parte propulsora del paso, la acción muscular tiende a llevar el pie apoyado hacia atrás respecto al suelo. Si el contacto se mantiene sin deslizar, el suelo ejerce sobre el pie una fuerza tangencial hacia delante. Esa fuerza contribuye a acelerar hacia delante el centro de masas de la persona. La Tierra recibe el cambio opuesto de cantidad de movimiento, aunque su enorme masa hace despreciable, para este propósito, el cambio resultante de su velocidad.

Un ciclo completo de marcha es más complejo que esa fase aislada. La colocación del pie puede producir una fase de frenado, además de una fase propulsora. Con rapidez media constante sobre suelo horizontal, las ganancias y pérdidas de cantidad de movimiento horizontal se equilibran a lo largo de un ciclo. Por tanto, también sería un error decir que

el rozamiento debe apuntar hacia delante durante todo el paso. Su dirección depende de la mecánica instantánea del contacto.

Una ilustración numérica sencilla muestra la diferencia entre un requisito y un límite. Supongamos que un contacto soporta $N = 600 \text{ N}$ y que su coeficiente estático es provisionalmente $\mu_s = 0,5$. El modelo permite una fuerza tangencial de hasta 300 N . Si el movimiento requiere solo 100 N en ese instante, la fuerza de rozamiento es 100 N , no 300 N . Son datos hipotéticos, no valores medidos de un zapato o una persona concretos.

3. Si no hay deslizamiento, ¿de dónde viene la energía?

En un contacto ideal fijo respecto a un suelo rígido e inmóvil, el punto donde actúa la fuerza del suelo tiene velocidad cero. Por tanto, la potencia mecánica instantánea transmitida por ese contacto inmóvil es cero. Aun así, la fuerza del suelo puede cambiar la cantidad de movimiento de la persona. La fuerza y la transferencia de energía responden a preguntas diferentes: una fuerza no tiene que aportar potencia en cada instante en que aporta impulso.

La energía química interna de la persona permite el trabajo muscular y la reorganización de los segmentos del cuerpo. Un cálculo con la fuerza multiplicada por el desplazamiento del centro de masas describe una relación de energía cinética del centro de masas; no es automáticamente el trabajo transferido en el contacto real del pie. Confundir esos dos desplazamientos hace que el suelo parezca una fuente de energía inexplicada.

La marcha real añade deformación de la suela y del suelo, movimiento de las zonas de contacto, impactos y disipación interna. La afirmación ideal de potencia cero no debe extenderse a todas las partes de una interacción real entre zapato y suelo. Identifica un caso límite controlado que explica cómo el agarre puede facilitar el movimiento sin que el suelo suministre la energía metabólica.

4. Por qué el deslizamiento suele disipar energía mecánica

Para dos superficies que deslizan una respecto a la otra bajo una fuerza de rozamiento de magnitud f , el ritmo al que se disipa su energía mecánica macroscópica conjunta es, en el modelo sencillo, f multiplicada por su rapidez relativa de deslizamiento. Parte de la energía aparece como energía interna; también pueden importar la deformación, la vibración y el desgaste. La energía no se destruye cuando disminuye el movimiento visible.

Utilizar los valores ilustrativos $f = 20 \text{ N}$ y una distancia relativa de deslizamiento de 3 m da 60 J transferidos fuera del movimiento mecánico macroscópico considerado. Ese número no determina por sí solo el aumento de temperatura de ninguno de los cuerpos. También harían falta sus capacidades caloríficas, el reparto de la energía depositada y el transporte posterior de calor. Es la misma distinción que impide reducir el rozamiento a una fórmula universal del ritmo de calentamiento.

Tampoco una rapidez de deslizamiento nula implica que un contacto real carezca de pérdidas internas. Los materiales pueden deformarse y relajarse, pueden formarse y desaparecer zonas de contacto, y una región nominalmente inmóvil puede contener pequeños movimientos locales. La división macroscópica entre estático y cinético es útil sin agotar la descripción microscópica.

5. La rugosidad es solo parte de la explicación

El área visible de contacto no es necesariamente el área en la que dos sólidos se tocan realmente. Las asperezas microscópicas, la adhesión, la deformación y las películas sobre las superficies pueden controlar los contactos que soportan la carga. Una superficie pulida no tiene por qué presentar un rozamiento nulo, y aumentar la rugosidad visible no proporciona una predicción universal de su coeficiente [1].

Dieterich y Kilgore observaron directamente contactos de rozamiento en experimentos de laboratorio. Sus observaciones relacionaron cambios en la resistencia al rozamiento con cambios en el conjunto de contactos y en su edad [2]. Es una afirmación más limitada que explicar cualquier zapato, falla o máquina mediante un único mecanismo. Aun así, constituye una prueba importante contra la idea de que el coeficiente sea un número invariable e independiente de la historia del contacto.

Una medición útil del rozamiento debe especificar, por tanto, algo más que los nombres de dos materiales. La carga, la preparación de las superficies, la historia de deslizamiento y las condiciones de medida ayudan a definir qué se midió. Para poner a prueba una explicación de la marcha también harían falta los tiempos y las direcciones de las fuerzas de reacción del suelo e información sobre el deslizamiento. Este esquema es una estrategia de medición, no el informe de un experimento realizado para este artículo.

6. Las dos funciones son compatibles

Lo que está bien establecido es que las fuerzas de contacto pueden transmitir cantidad de movimiento y oponerse al deslizamiento relativo, mientras que el deslizamiento y la deformación pueden disipar energía mecánica. Lo que necesita datos empíricos es el comportamiento de un contacto concreto en condiciones concretas. El modelo sencillo de coeficientes es una aproximación útil, no una teoría microscópica completa.

El rozamiento puede frenar una caja porque esta desliza respecto al suelo. Puede ayudar a quien camina porque el pie apoyado se resiste a resbalar hacia atrás mientras el cuerpo avanza. El error consiste en asignar una dirección a la fuerza basándose solo en el desplazamiento global del cuerpo. El contacto, no la etiqueta cotidiana de «objeto en movimiento», determina el movimiento relativo pertinente.

Lectura relacionada: IDE-001, sobre la energía.

Referencias

[1] OpenStax. University Physics Volume 1, §6.2, Friction.
<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-2-friction>

[2] Dieterich, J. H.; Kilgore, B. D. Direct observation of frictional contacts: New insights for state-dependent properties. *Pure and Applied Geophysics* 143, 283–302 (1994).
<https://doi.org/10.1007/BF00874332>