

Fuerza de Rozamiento

En muchos casos de la vida cotidiana podemos observar que cuando hay dos cuerpos en contacto, existe una fuerza de resistencia que se opone al desplazamiento relativo entre los dos cuerpos. Esta resistencia proviene de la interacción entre las superficies de ambos cuerpos. A la fuerza producto de esta interacción la llamamos *fuerza de rozamiento* (o fuerza de fricción). Sin la fuerza de rozamiento no podríamos caminar, los autos no podrían circular por la calle y tampoco podrían doblar en una curva. Aunque el rozamiento es muy importante, muchas veces se trata de evitarlo. Los lubricantes, como el aceite en un motor de coche o el líquido sinovial en nuestro cuerpo, son materiales que reducen el rozamiento.

A continuación estudiaremos las fuerzas de rozamiento que aparecen cuando dos superficies sólidas no lubricadas están en contacto (rozamiento seco). Este tipo de rozamiento se distingue del rozamiento viscoso, que es el que aparece cuando se sumerge un sólido en un fluido (puede ser un líquido o un gas) y tiene algunas características diferentes.

Supongamos por ejemplo, que queremos mover una caja pesada que está apoyada en el suelo (Figura 1). Si aplicamos sobre la caja una fuerza externa \vec{F} , mientras \vec{F} sea pequeña, la caja permanecerá en reposo debido a la presencia de la fuerza de rozamiento en dirección opuesta a \vec{F} . A la fuerza de rozamiento que actúa mientras las dos superficies de contacto no tengan movimiento relativo se la conoce como **fuerza de rozamiento estático** (\vec{F}_{RE}). Mientras la caja no se mueva, se cumple que $\vec{F} = \vec{F}_{RE}$ y si \vec{F} aumenta, también lo hace \vec{F}_{RE} . Si seguimos aumentando la fuerza \vec{F} , la caja comenzará a deslizarse. Cuando la caja está a punto de deslizarse la fuerza \vec{F}_{RE} toma su máximo valor \vec{F}_{REmax} . Una vez que \vec{F} supera \vec{F}_{REmax} , la caja se mueve y se acelera en dirección de la fuerza \vec{F} . A la fuerza de fricción para un objeto en movimiento se le llama **fuerza de rozamiento cinético** (\vec{F}_{RC}). Cuando la caja está en movimiento, la fuerza \vec{F}_{RC} es menor que \vec{F}_{REmax} .

La fuerza neta $\vec{F} - \vec{F}_{RC}$ en la dirección x produce una aceleración hacia la derecha, de acuerdo con la segunda ley de Newton. Si se cumple que $\vec{F} = \vec{F}_{RC}$, la aceleración es cero y la caja se mueve hacia la derecha con velocidad constante. Si la fuerza aplicada \vec{F} se elimina de la caja en movimiento, la fuerza de rozamiento \vec{F}_{RC} que actúa hacia la izquierda proporciona una aceleración de la caja en la dirección de las x negativas y finalmente la caja se detiene.

En resumen, mientras no exista desplazamiento relativo entre las superficies de contacto, actúa la fuerza de rozamiento estático, la cual puede tomar diferentes valores hasta que alcanza su valor máximo \vec{F}_{REmax} . Una vez que el módulo de la fuerza \vec{F} supera el valor $|\vec{F}_{REmax}|$, comienza el deslizamiento relativo entre las superficies y actúa la fuerza de rozamiento cinético.

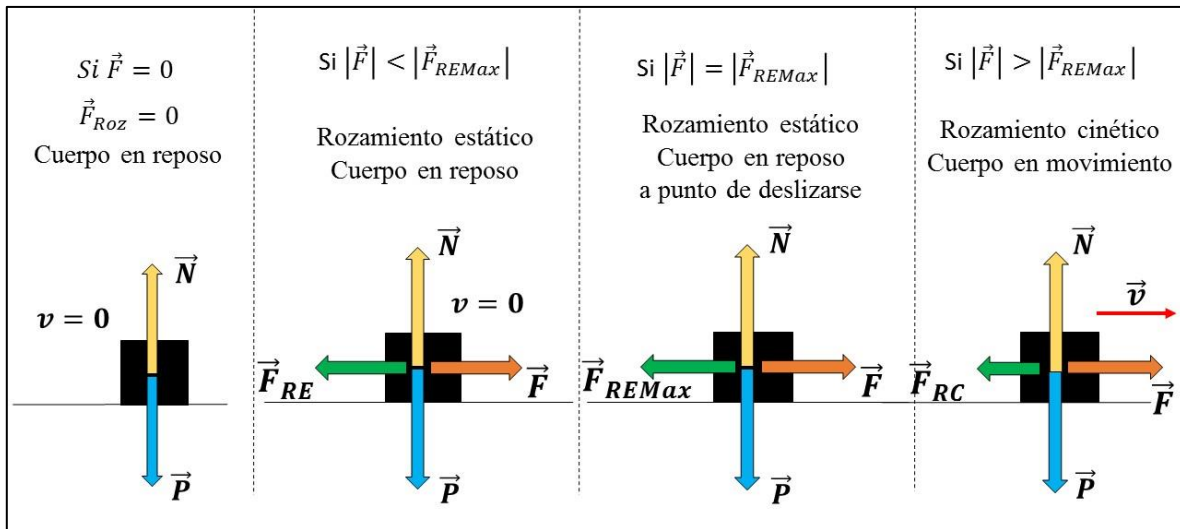


Figura 1. Ejemplo de fuerzas de rozamiento aplicado al movimiento de una caja. Si no se aplica ninguna fuerza, el rozamiento es nulo. Si se aplica una pequeña fuerza externa \vec{F} , el cuerpo se mantiene en reposo debido a la fricción estática. Si se va aumentando la fuerza externa \vec{F} , en algún momento se supera el máximo valor de la fuerza de rozamiento estático y se rompe el equilibrio, el cuerpo comienza a deslizarse respecto al piso.

Se puede verificar experimentalmente que la magnitud de \vec{F}_{RC} , para muchos propósitos prácticos puede considerarse como proporcional a la magnitud de la fuerza normal \vec{N} que se ejerce sobre un objeto por la superficie. La constante de proporcionalidad se conoce como coeficiente de rozamiento cinético y se denota con la letra griega μ_C .

Entonces si llamamos μ_C al coeficiente de rozamiento cinético se cumple que:

Magnitud de la Fuerza de rozamiento cinético

➔

$$|\vec{F}_{RC}| = \mu_C |\vec{N}| \tag{1}$$

La magnitud de la fuerza de rozamiento estático entre dos superficies en contacto tiene los siguientes valores:

Magnitud de la Fuerza de rozamiento estático

➔

$$|\vec{F}_{RE}| \leq \mu_E |\vec{N}| \tag{2}$$

donde μ_E es el coeficiente de rozamiento estático y $|\vec{N}|$ es la magnitud de la fuerza normal que ejerce una superficie sobre la otra. La igualdad en la ecuación (2) se cumple cuando las superficies están a punto de deslizarse, esto es, cuando $|\vec{F}_{RE}| = |\vec{F}_{REMax}| = \mu_E |\vec{N}|$. Esta

situación se llama *movimiento inminente o punto crítico*. La desigualdad se cumple cuando las superficies no están a punto de deslizarse.

Dirección de la fuerza de rozamiento

La dirección de la fuerza de rozamiento es paralela a la dirección de las superficies en contacto y con sentido tal que se opone al deslizamiento relativo entre ambas superficies. Si un objeto se encuentra en reposo respecto a una superficie, la dirección de la fuerza de rozamiento estático se opone al sentido al cual tendería a moverse el cuerpo respecto a la superficie.

Los valores de μ_C y μ_E son magnitudes adimensionales (no tienen unidad) y dependen de la naturaleza de las superficies. Dentro de la gama de fuerzas y velocidades que encontramos comúnmente, podemos considerar estas magnitudes (μ_C y μ_E) como constantes para un par dado de superficies. El intervalo de los valores típicos para coeficientes de rozamiento fluctúan de 0,03 a 1,0 (aunque puede haber algunos casos excepcionales donde $\mu > 1$) La Tabla 1 indica algunos valores reportados.

En general se cumple que μ_C es menor que μ_E . Por lo tanto, para un contacto dado entre dos superficies, la fuerza de rozamiento cinética es menor que la fuerza de rozamiento estático máxima. Pensemos, por ejemplo, cuando empujamos un auto detenido. Al principio cuesta ponerlo en movimiento y es probable que necesitemos ayuda de alguna persona más. Una vez que el auto se pone en movimiento, la fuerza necesaria para moverlo es menor, hasta quizás no necesitamos la ayuda de otra persona.

La curva de la Figura 2 refleja el comportamiento de la fuerza de rozamiento en función de la fuerza externa aplicada.

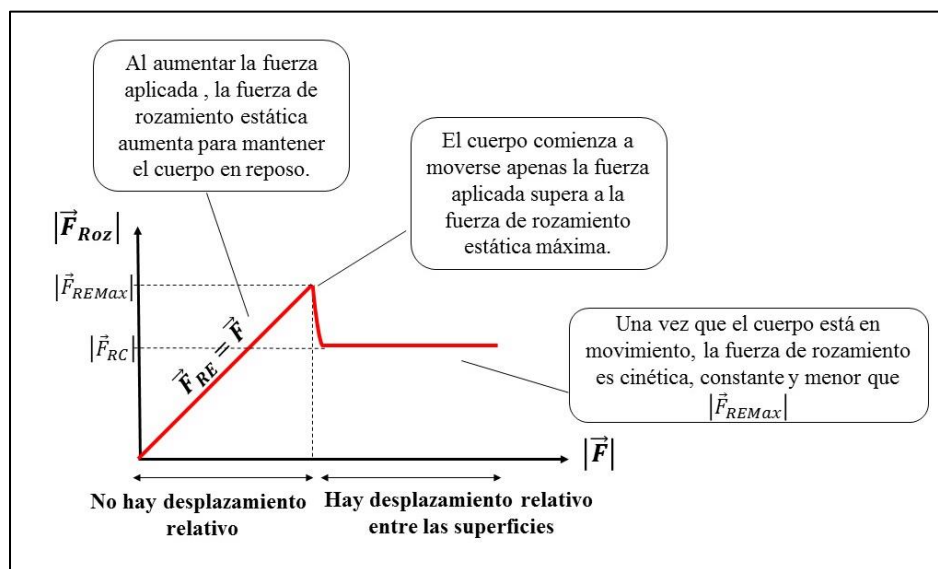


Figura 2. Variación de la fuerza de rozamiento en función de la fuerza externa aplicada.

Una observación final es que los coeficientes de fricción son casi independientes del área de contacto entre las superficies. Es de esperar que al colocar un objeto en el lado que tiene más área aumente la fuerza de fricción. Aunque este método proporciona más puntos de contacto, el peso del objeto se dispersa sobre un área más grande y los puntos individuales no se oprimen tan estrechamente entre sí. Ya que estos efectos se compensan, aproximadamente, uno con otro, podemos concluir que:

La fuerza de rozamiento es independiente del área de contacto entre las superficies.

Tabla 1. Coeficientes de rozamiento.

Superficies de contacto	μ_E	μ_C
Hule sobre concreto	1,0	0,8
Acero sobre acero	0,74	0,57
Aluminio sobre acero	0,61	0,47
Vidrio sobre vidrio	0,94	0,4
Cobre sobre acero	0,53	0,36
Madera sobre madera	0,25 - 0,5	0,2
Madera encerada sobre nieve húmeda	0,14	0,1
Metal sobre metal (lubricado)	0,15	0,06
Teflón sobre teflón	0,04	0,04
Hielo sobre hielo	0,1	0,03
Articulación sinovial en humanos	0,01	0,003

Nota: Todos los valores son aproximados. En algunos casos el coeficiente de rozamiento puede superar 1.0.

Diferencia entre deslizamiento relativo de superficies y movimiento del cuerpo Cuerpo sobre cinta transportadora.

La dirección de la fuerza de rozamiento es opuesta a la dirección del deslizamiento relativo entre las superficies de contacto, pero...¿qué significa deslizamiento relativo?.

Para entender la diferencia entre deslizamiento relativo de superficies y movimiento del cuerpo, veamos un ejemplo.

Consideremos un cuerpo apoyado en una cinta transportadora la cual se mueve con aceleración constante, puede ser una valija en la cinta transportadora de un aeropuerto, un producto próximo a pagar en la línea de cajas de un supermercado o una caja siendo despachada. La primera pregunta que nos hacemos es ¿qué tipo de fuerza de rozamiento actúa sobre el cuerpo? Tendríamos que definir si hay o no deslizamiento relativo entre las superficies de contacto. Si bien el cuerpo está en movimiento, **NO** se desliza respecto de la cinta transportadora. La cinta transportadora y el cuerpo se mueven juntos, como si estuviesen encastrados. Y en realidad, si nos vamos a escala microscópica, vemos que ambas superficies están “encastradas”. El cuerpo se mueve respecto de un observador en la Tierra

pero no se mueve respecto de la cinta transportadora, por lo tanto no hay deslizamiento relativo entre las superficies. Sobre el cuerpo actúa la **fuerza de rozamiento estático**. Y aquí está la diferencia, el cuerpo tiene movimiento acelerado si se observa desde la Tierra, pero no tiene deslizamiento relativo respecto a la cinta transportadora (Figura 4). De hecho la fuerza de rozamiento **estático** es la causante de que se puedan transportar de manera efectiva objetos sobre una cinta transportadora.

La segunda pregunta que nos hacemos es ¿en qué sentido apunta la fuerza de rozamiento estático?

Si no hay deslizamiento relativo, la fuerza de rozamiento estático se opone al sentido al cual tendería a moverse el cuerpo respecto a la cinta transportadora. En este caso, pensemos hacia donde se movería el cuerpo si no estuviese “encastrado” a la cinta (rozamiento nulo). Si la cinta se acelera hacia adelante (x positivas) y no hay rozamiento de ningún tipo, el cuerpo tendería a quedarse en su posición, porque no existe ninguna fuerza actuando sobre él, que pueda modificar su estado de reposo. Por lo tanto, si nos paramos sobre la cinta transportadora y no hay rozamiento veríamos el cuerpo moverse en dirección de las x negativas. La dirección del desplazamiento de la superficie del cuerpo relativo a la cinta transportadora sería en dirección de las x negativas. De esta manera, la fuerza de rozamiento apunta en sentido de las x positivas.

Si las dos superficies son rugosas y se encastran, entonces también hay una fuerza de rozamiento estático aplicada sobre la cinta que se debe a la interacción entre la superficie de la caja y la cinta. ¿En qué dirección y sentido actúa dicha fuerza (sobre la cinta)?

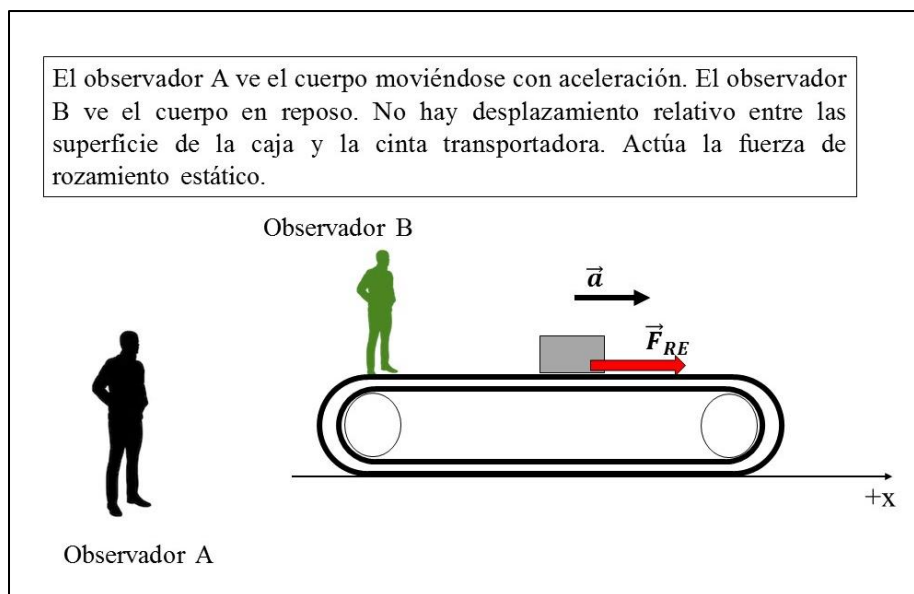


Figura 4. Movimiento de una caja sobre una cinta transportadora. Actúa la fuerza de rozamiento estático en dirección del movimiento de la caja.

Naturaleza de la Fuerza de Rozamiento

El rozamiento es un fenómeno complejo que surge como consecuencia de la fuerza de atracción entre las moléculas que forman dos superficies en contacto. La naturaleza de esta atracción es electromagnética, la misma naturaleza de enlace molecular que mantiene la materia unida. Todos los objetos, aunque tengan superficies pulidas, de aspecto liso y suave, a escala atómica son ásperos y rugosos. Por lo tanto, cuando ponemos en contacto dos superficies cualesquiera de dos cuerpos cualesquiera, el contacto se realiza solo en unas cuantas posiciones donde se tocan los picos del material (Figura 3). Se produce como una especie de enganche o encastre. Cuando se intenta desplazar un cuerpo respecto del otro, las partes enganchadas se resisten al deslizamiento mutuo. La suma de todas esas resistencias constituye la fuerza de rozamiento.

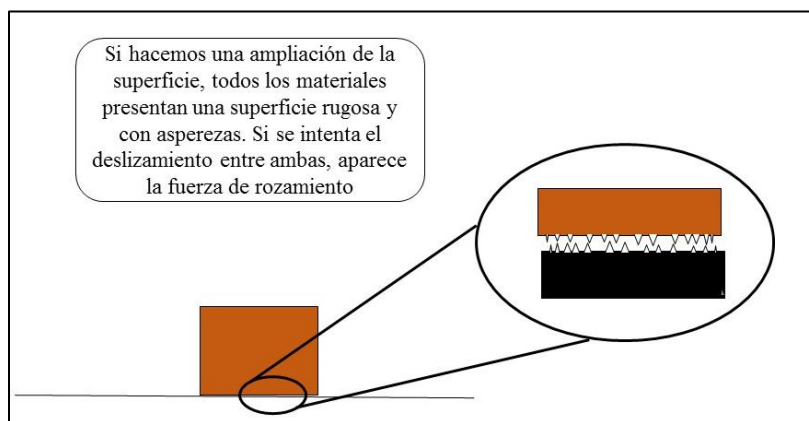


Figura 3. Esquema representativo de la ampliación de dos superficies en contacto.

Ejemplo. Fuerza de rozamiento en el diseño de automóviles

La fuerza de rozamiento tiene un efecto positivo en el movimiento de un auto, ya que la fricción entre los neumáticos y la carretera es la que hace posible la aceleración del auto y la mínima distancia de frenado. Tanto las llantas de un auto como las carreteras están diseñadas para que esté presente la fuerza de fricción. Entre más rugosa la superficie, más rápido el auto podrá acelerar y más rápido podrá frenar. Por este motivo, las calles están hechas con pavimento rugoso y las llantas de los autos tienen bandas de rodadura que ofrecen una buena tracción en diferentes condiciones. Los diseños de las bandas de rodadura canalizan el agua afuera de la superficie de apoyo en carreteras mojadas, para combatir la tendencia al aquaplaning (una condición que hace que el coche se deslice por la carretera como esquiando). Las bandas de rodadura tienen coeficientes de fricción de alrededor de 0.7 para calzada seca y de 0.4 para la calzada mojada.

Por otro lado, la fricción también está presente entre el aire y el automóvil. La fricción entre el aire y el automóvil se opone a su movimiento, por lo que representa un aspecto negativo. En este caso, un diseño aerodinámico contribuye a disminuir la resistencia del aire. Por lo general los fabricantes buscan ofrecer la menor resistencia posible al aire en el diseño de sus automóviles. El [túnel de viento](#) es una herramienta que permite a los ingenieros estudiar este efecto a través de la simulación de las condiciones a las que se encuentra el auto respecto a la fricción con el aire.

Bibliografía

Serway R.A., Jewet J W, “Física para ciencias e ingeniería”. Volumen 1. Séptima edición. Cengage Learning editores (2008).

Bauer W, Westfall G. D., “Física para ingeniería y ciencias”. Volumen 1. McGraw-Hill/Interamericana editores (2011).

Sears F. W., Zemansky M.W., Young H. D., Freedman R. A. “Física Universitaria”. Volumen 1. Décimo primera edición. Pearson Addison Wesley editores.

Resnick R., Halliday D, Kenneth S. K. “Física”. Volumen 1. Cuarta edición. Compañía editorial continental (1993).