

AC 14 14

¿Qué objetivos nos proponemos alcanzar con el estudio del presente tema y cuál es su conexión con temas anteriores? Como habrá observado usted, hasta ahora los sistemas físicos objeto de estudio han sido la partícula y el cuerpo rígido, sistema este cuyo movimiento translacional puede asimilarse al de una partícula en virtud del vínculo de rigidez, y a pesar de que el número de partículas constitutivas, átomos, moléculas, será enormemente grande, del orden de magnitud del número de Avogadro. Por otro lado, queremos recordar, una vez más, que la noción de partícula, tal como se entiende en mecánica clásica, es decir, como un punto material, constituye una idealización de sistemas físicos, bien porque su tamaño sea muy pequeño al nivel de la observación macroscópica, tal es el caso, por ejemplo, de las partículas elementales, de los átomos o de las moléculas, o bien porque sus dimensiones geométricas, aun siendo considerables, resulten pequeñas con respecto a las distancias que separan dichos sistemas. En ciertos casos, pues, un astro, un sistema estelar, o incluso una galaxia, podrán considerarse como partículas.

En cualquier caso, hemos estudiado hasta el presente el movimiento de un sistema reducible a un punto material, y en este sentido se han definido la energía cinética de una partícula móvil y la energía potencial de una partícula situada en un campo de fuerzas, es decir, en interacción con otra u otras partículas. Conviene notar, a este respecto, que como ya sabemos, la energía potencial es una magnitud que caracteriza una interacción conservativa, mecanismo o proceso que requiere la existencia de al menos dos partículas, de manera que la energía potencial es una energía no tanto de una partícula en concreto como del sistema global formado por las partículas interactuantes. Sin embargo, reiteradamente hemos aludido a la energía potencial de una partícula, bien, evidentemente, quiere esto decir no que la partícula se encuentre aislada del resto del universo, en cuyo caso no tendría sentido alguno hablar de energía potencial, sino que, por las circunstancias propias de cada caso, resultaba conveniente analizar la evolución dinámica de dicha partícula por separado, ignorando a las demás, y reemplazándolas en consecuencia por el formalismo del campo de fuerzas.

Este procedimiento podrá ser de interés en ciertos casos como, por ejemplo, cuando se trata de estudiar el movimiento de un cuerpo bajo la acción de las fuerzas gravitatorias ejercidas por la Tierra y, en general, siempre que el número de cuerpos asimilables a partículas integrantes de un sistema dado sea reducido. No debemos olvidar, sin embargo, que el número de partículas, átomos o moléculas integrantes de un cuerpo de dimensiones macroscópicas es enorme, y que el vínculo de rigidez no deja de ser sino una idealización de la realidad física, aplicable, por supuesto, solo a los sólidos. No obstante, los cuerpos sólidos estarán formados por átomos o moléculas localizados con arreglo a una determinada simetría en los nudos de la red cristalina, pero esta disposición no es en absoluto estática, sino que las mencionadas partículas describirán oscilaciones de pequeña amplitud en torno a las posiciones de equilibrio correspondientes a los nudos de la red.

En cuanto a las moléculas de un líquido o de un gas, resulta evidente que el vínculo de rigidez será a todas luces inaplicable. En estos casos, si bien las moléculas están sometidas a interacciones mutuas, sus movimientos tendrán una componente aleatoria de índole térmica, de manera que las velocidades moleculares obedecerán a cierta ley probabilística de distribución. Esto se hace aún más evidente en el caso de un gas ideal al admitir que las moléculas solo interactúan durante la brevísima fracción de tiempo en que colisionan, moviéndose el resto del tiempo como partículas libres.

De esta forma, vemos que al estudiar el movimiento de un sistema de partículas se impone una distinción entre los movimientos internos de las partículas y el movimiento macroscópico del sistema como un todo. Me explico. Por movimientos internos entenderemos los que apreciaría un observador que se desplazase juntamente con el macrosistema, a la misma velocidad que éste.

El movimiento macroscópico sería el observado desde un sistema de referencia exterior. Ilustraremos esta cuestión con un ejemplo. Supongamos que nuestro sistema de partículas en movimiento es una corriente de aire.

Un observador ante el que pasa detecta un movimiento macroscópico unidireccional del aire en conjunto con una cierta velocidad. Por el contrario, para un observador que pudiese desplazarse juntamente con la masa de aire, tal velocidad sería nula, pero no por eso dejaría de notar ciertos movimientos de naturaleza térmica de las moléculas de aire. Estos serían, en el presente ejemplo, los movimientos internos a los que hemos aludido con anterioridad.

Aquí creo que nos enfrentamos con una dificultad. Hasta este momento, como usted bien ha señalado, tanto en la cinemática como en la dinámica, el sistema físico que hemos considerado como objeto de estudio ha sido la partícula material o en todo caso cualquier cuerpo que en virtud del vínculo de rigidez o de las razones que usted ha mencionado anteriormente, pudiese asimilarse a una partícula. De esta forma, definimos el momento lineal o la energía cinética como magnitudes que caracterizaban el estado dinámico de la partícula y la fuerza o la energía potencial como magnitudes representativas de las interacciones a que pudiese estar sometida dicha partícula, cuyo efecto sería alterar su estado dinámico.

Quiero decir con esto que, por ejemplo, la energía cinética ha sido definida para una partícula, pero no para un sistema de partículas. Del mismo modo, las leyes fundamentales de la dinámica, a excepción de la tercera, que prevé la existencia de por lo menos dos partículas en interacción, los teoremas del trabajo y de la energía cinética y del trabajo y de la energía potencial, así como la ley de conservación de la energía mecánica, se han enunciado teniendo la partícula y no un sistema de partículas como sistema físico objeto de nuestra atención. Al hablar usted ahora de un sistema de partículas, desearía saber si es posible la redefinición de las magnitudes a que hemos hecho referencia hasta el presente, así como si es igualmente factible generalizar las leyes y teoremas de la dinámica al considerar el sistema de partículas y no la partícula como sistema físico de nuestro interés.

Efectivamente, todo lo que usted sugiere no solo es posible, sino que de hecho, si no se hiciera, quedaría bien enmenguado el formalismo no solo de la dinámica, sino también de otras importantes parcelas de la física como la termodinámica o la física estadística. No es nuestra intención, sin embargo, desarrollar exhaustivamente en este curso introductorio el formalismo de la dinámica de un sistema de partículas. Esta será tarea de un curso posterior.

No obstante, a fin de lograr una completa comprensión de los conceptos contenidos en este tema, será provechoso generalizar al caso de un sistema de partículas algunas de las cuestiones que ya han sido tratadas en el estudio de la dinámica de la partícula. Empecemos por decir que, por definición, la energía cinética de un sistema de partículas viene dada por la suma de las energías cinéticas individuales de cada partícula. Como es sabido, la energía cinética de una partícula será diferente según se calcule en un sistema de referencia o en otro, ya que la velocidad será evidentemente diferente en los distintos sistemas de referencia.

De esta forma, también la energía cinética de un sistema de partículas tomará distintos valores según cuál sea el sistema de referencia con respecto al cual sean medidas las velocidades de las partículas constitutivas del sistema. La energía cinética asociada a los movimientos internos, a que antes hemos hecho alusión, recibe el nombre de energía cinética interna. De acuerdo con la idea ya expuesta de que el movimiento de un sistema de partículas puede verse como la superposición de los movimientos internos de las mismas y del movimiento del macrosistema como un todo, resulta razonable pensar que la energía cinética del sistema puede expresarse como suma de dos términos, uno, la energía cinética interna y otro, asociado al movimiento conjunto del sistema, que puede demostrarse correspondería a la energía cinética de una partícula de masa igual a la total del sistema con un momento lineal igual a la suma de los momentos lineales de cada partícula.

Suma vectorial, por supuesto, al tratarse dichos momentos de magnitudes vectoriales. Así pues, dado un sistema de partículas, el menor valor posible de su energía cinética para distintos observadores corresponderá a la energía cinética interna, al alunarse el término que describe el movimiento macroscópico del sistema mediante una adecuada elección del sistema de referencia. Entonces, si no he entendido mal, cuando el macrosistema no interactúa con otros, describirá en conjunto un movimiento libre, es decir, de traslación uniforme, ¿no es así? En efecto, lo que usted acaba de decir es cierto y constituye una generalización de la ley de la inercia para un sistema de partículas.

Si éste es aislado, es decir, si no interactúa con otros, o sea, si no actúa ninguna fuerza externa sobre él, el movimiento global del sistema corresponderá, como usted ha señalado, a una traslación uniforme. Por el contrario, si el sistema de partículas aparece sometido a alguna interacción con sistemas exteriores, interacción que podrá expresarse por medio de la correspondiente energía potencial externa, no describirá ya en conjunto el mencionado movimiento libre. En realidad, estas cuestiones serán tratadas con más detalle en nuestra próxima charla, reservando para entonces una mayor extensión en los comentarios que puedan hacerse al respecto.

Sin embargo, deberemos observar ahora que, tanto si el sistema de partículas objeto de estudio es aislado, como si interactúa con otros, las partículas que lo constituyen interactuarán en general entre sí, por lo que los movimientos internos no tendrán la apariencia de movimientos libres. Dichas interacciones, en caso de que las fuerzas implicadas sean conservativas, podrán caracterizarse por medio de las correspondientes energías potenciales. De esta forma, definimos la energía potencial interna de un sistema de partículas como la suma de las energías potenciales de interacción para todos los pares de partículas del sistema, en el supuesto, claro está, de que las fuerzas de interacción sean conservativas.

Puesto que la energía potencial que define la interacción entre dos partículas depende sólo de la distancia de separación entre dichas partículas, tomará el mismo valor en todos los posibles sistemas de referencia. Así, otro tanto ocurrirá con la energía potencial interna que, como hemos dicho, viene dada por la suma de las energías potenciales de interacción entre cada par de partículas del sistema. A este respecto, debemos notar, una vez más, la diferencia existente entre la energía cinética y la potencial, en tanto que la última no dependerá del sistema de referencia elegido.

La primera sí que dependerá de tal sistema, al tomar la velocidad valores distintos en los diferentes sistemas de referencia. Recapitulando sobre todo lo que hoy hemos venido exponiendo, es probable que usted se pregunte cuál es la razón de haber definido las energías cinética y potencial internas de un sistema de partículas. El motivo fundamental de haber procedido así es que las definiciones anteriores nos permiten definir nuevamente una magnitud que permanece constante en el tiempo, siempre que el sistema sea aislado.

Tal magnitud se denomina energía interna del sistema de partículas, definiéndose como suma de sus energías cinética y potencial internas. La energía interna es quizá la magnitud que define con mayor detalle el estado de un sistema de muchas partículas, un gas molecular, por ejemplo, pero no es directamente accesible a la medición, por lo que habrá de introducirse una nueva magnitud que, desde un punto de vista fenomenológico, describa el estado del sistema y que pueda ser medida. Esta magnitud es la temperatura.

No podemos entrar ahora en cómo es definida la temperatura de un sistema de partículas, pero baste el hecho de su íntima relación con la energía interna para considerar la estrecha conexión existente entre los fenómenos térmicos y los mecánicos. Recordemos a este respecto que cuando tratemos el problema del movimiento de un sistema físico constituido por un conjunto de partículas, habremos de distinguir entre el movimiento del macrosistema y los movimientos internos de las partículas que lo forman. Este sería, por ejemplo, el caso de nuestro sistema solar, el cual describe en conjunto movimientos relativos a otros sistemas solares de la galaxia que se superponen a los movimientos internos de los planetas con relación al Sol y de los satélites con relación a los planetas.

Otro tanto cabría decir de un gas molecular que se desplaza de una región a otra del espacio, en cuyo caso, además del movimiento macroscópico conjunto, las moléculas correspondientes

describen movimientos microscópicos de naturaleza térmica. Sin embargo, en el primer ejemplo, los movimientos internos de las partículas, planetas, satélites, son ordenados, obedeciendo a la ley de gravitación, mientras que en el segundo, los movimientos internos de las partículas, las moléculas del gas, tienen un carácter aleatorio asociado a las colisiones estocásticas de dichas partículas. La energía interna correspondiente a estos movimientos desordenados internos recibe el nombre de energía térmica y su valor denota el grado de agitación térmica de las moléculas del gas.

A una mayor agitación térmica, a una mayor energía térmica, corresponde una mayor temperatura y viceversa. En el caso de un gas ideal, su energía interna es únicamente cinética, puesto que el modelo que describe tal gas reposa en la hipótesis de suponer que las moléculas se mueven como partículas libres durante la mayor parte del tiempo, variando sus respectivas energías cinéticas como consecuencia tan solo de las colisiones que puedan sufrir entre ellas procesos que serán de una muy corta duración. Después de la exposición introductoria que usted acaba de realizar, me gustaría que nos centrásemos en el tema concreto que nos ocupa, que es el estudio de los sistemas disipativos.

¿Podría usted hacer ya algún comentario explicativo del texto acerca de tales sistemas? Con mucho gusto. Recordará usted que al finalizar la emisión anterior ya nos referimos entonces a la eventualidad de que sobre una partícula o un cuerpo de dados actuasen además de fuerzas conservativas otras no conservativas o disipativas. Sin embargo, he creído que sería útil comenzar hoy exponiendo las ideas generales anteriores con objeto de poder comprender exactamente los conceptos contenidos en el presente tema.

Bien, empecemos considerando una partícula moviéndose bajo la acción simultánea de fuerzas conservativas y no conservativas. En tal caso, el trabajo total realizado por estas fuerzas puede escribirse como suma del trabajo efectuado por las fuerzas conservativas más el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas. Puesto que el teorema del trabajo y de la energía cinética se aplica tanto a fuerzas conservativas como no conservativas, tendremos que el trabajo total realizado por las fuerzas actuantes al desplazar la partícula desde una posición a otra, correspondientes a sendos instantes de tiempo, es igual a la diferencia de la energía cinética final menos la inicial.

En cambio, el teorema del trabajo y de la energía potencial sólo se aplica a las fuerzas conservativas. Entonces, el trabajo realizado por estas fuerzas durante el desplazamiento de la partícula entre las posiciones anteriores es igual a la diferencia de la energía potencial inicial menos la final. Sustituyendo las correspondientes expresiones en la que nos define el trabajo total como suma de los trabajos efectuados por uno y otro tipo de fuerzas y recordando la definición de energía mecánica de una partícula, encontramos que el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas durante el movimiento de la partícula corresponde precisamente a la variación de su energía mecánica, es decir, a la diferencia de la energía mecánica final menos la inicial.

Por consiguiente, cuando sobre una partícula actúa alguna fuerza no conservativa, su energía mecánica ya no es una constante del movimiento, es decir, no se mantiene constante en el tiempo, sino que su variación es igual al trabajo realizado por las fuerzas no conservativas. Por ejemplo, si la fuerza no conservativa es una fuerza de fricción que se opone al movimiento de la partícula, el trabajo realizado por tal fuerza es negativo, por lo que la energía mecánica disminuye, decreciendo pues también la energía cinética. En tal caso ha tenido lugar un proceso de degradación o disipación de energía mecánica, es decir, la energía mecánica de la partícula o parte de ella se ha convertido en una forma degradada de energía, que llamamos calor, de manera que la pérdida de energía mecánica por parte de la partícula se traduce en un aumento de las energías mecánicas asociadas a los movimientos desordenados de las partículas constitutivas del medio en el que se desplazaba la primera partícula, resultando pues que la temperatura de dicho medio experimentará a sí mismo un aumento.

Usted se acaba de referir a un proceso de disipación de energía mecánica de una partícula bajo la acción de la fricción ejercida por las partículas del medio en el cual se movía, proceso representado por la correspondiente fuerza de rozamiento, que supone un recuento estadístico de las fuerzas desarrolladas a nivel microscópico. Supongo que, en líneas generales, habrá que decir otro tanto en el caso de que, en lugar de una partícula, sea un sistema de partículas el sistema físico sometido a alguna fuerza disipativa, como las fuerzas de fricción. ¿Es así? Efectivamente, así es.

Sin embargo, debo decirle que si me he referido inicialmente a una partícula, ha sido en aras de una mayor simplicidad en los razonamientos que han conducido al resultado de que la energía mecánica de un móvil no se conserva cuando actúan fuerzas no conservativas sobre aquel. No debemos olvidar, además, que la noción de partícula, tal como se entiende la mecánica clásica, supone una abstracción de la realidad, útil en ciertos casos, pero que en otros puede enmascarar aspectos relevantes de los sistemas físicos y de los procesos que tienen lugar en ellos. En última instancia, sólo las partículas elementales de la física moderna podrían considerarse como indivisibles, aunque no sabemos realmente si quizá presentan una estructura interna.

De todas formas, la asimilación a un punto de un cuerpo de dimensiones tanto macroscópicas como microscópicas sólo puede hacerse en un marco meramente matemático cuando proceda a tal abstracción, pero, desde luego, esta simplificación no corresponderá a la realidad física. Por otro lado, cuando hablamos de una partícula única, no tiene ningún sentido, por supuesto, establecer distinción alguna entre movimiento macro o microscópico. Bien, después de estas consideraciones, contestaré a su pregunta.

Ciertamente, la discusión anterior referente a la disipación de la energía mecánica de una partícula no sólo es generalizable a un sistema de partículas, sino que es aquí donde este fenómeno puede interpretarse fielmente de acuerdo con la realidad física. Tales sistemas de partículas podrán ser, por ejemplo, un péndulo oscilando en un medio viscoso, un cuerpo que desliza sobre una superficie rugosa, un gas que es obligado a atravesar un orificio estrecho,

etc. En definitiva, tendremos que, en cualquier caso, la disipación, bajo fuerzas de fricción de la energía cinética o potencial asociadas al movimiento ordenado y conjunto del sistema como un todo, se traduce en un aumento de la energía interna del sistema, es decir, en un aumento de las energías cinéticas de los movimientos más o menos desordenados de las partículas que forman ese sistema.

En este sentido, podemos decir que, en realidad, no ha habido pérdida de energía mecánica, sino una conversión de la energía macroscópica ordenada en energía microscópica desordenada, distribuyéndose entre las distintas partículas del sistema. Sin embargo, este proceso, que en el caso de un sistema molecular, llevará a que las moléculas tengan una mayor energía térmica, que es la energía asociada a los movimientos internos desordenados, aumentando así su agitación traslacional, e incluso excitándose otros movimientos correspondientes a los distintos grados de libertad, rotación, vibración, es un proceso esencialmente irreversible. Una vez que el proceso ha tenido lugar, el proceso contrario no podrá ocurrir de una forma espontánea, así, un meteorito que penetra en la atmósfera terrestre a gran velocidad puede aumentar tanto su temperatura al frenarse que se desintegre.

En cambio, si calentamos una piedra, ésta ciertamente no aprovechará la energía suministrada para iniciar un movimiento. La razón de esto estriba en el hecho de que cualquier macrosistema, por pequeño que sea, contiene un número muy grande de partículas, átomos o moléculas, de forma que no es que en rigor sean imposibles los procesos opuestos a los disipativos, sino que serán sumamente improbables, tan improbables que nunca los observaremos, al no existir direcciones privilegiadas para los movimientos de las partículas, movimientos que tendrán, pues, un carácter esencialmente aleatorio representativo de la agitación térmica. En definitiva, la energía mecánica macroscópica puede disiparse aumentando la energía interna del sistema considerado y de los sistemas interactuantes, pero una vez que se ha alcanzado esta situación de equilibrio no podrá ocurrir espontáneamente el proceso opuesto.

O, en otras palabras, la energía asociada a los movimientos ordenados del macrosistema puede convertirse en energía de los movimientos internos desordenados de las muchas partículas que constituyen los sistemas en interacción, pero no así a la inversa. Como consecuencia de todo lo anterior, es interesante observar que en el equilibrio térmico entre sistemas físicos cesan los movimientos macroscópicos relativos entre las partes, desapareciendo así la posibilidad de realizar un trabajo mecánico aprovechable o útil. Puesto que usted ha anticipado ya que generalizaríamos hoy la ley de conservación de la energía cuando el sistema físico en consideración estuviese sometido a la acción de fuerzas disipativas, creo que estamos ya en condiciones de proceder a dicha generalización, ¿no le parece? Evidentemente.

De una manera general, en física, los procesos que conducen a una disminución de la energía mecánica del macrosistema, aumentando la energía interna del mismo, se denominan genéricamente procesos de fricción o rozamiento. Naturalmente, el mecanismo de fricción

supone una interacción entre el sistema objeto de estudio y los sistemas circundantes, que como ya se ha señalado, aumentarán asimismo su energía interna. Podemos pues enunciar la ley de conservación de la energía total diciendo que cualquiera que sea su forma, la energía del sistema en consideración y de los sistemas exteriores con los que interactúa permanece constante en el tiempo.

En el caso de sistemas disipativos que hoy nos ocupa es de interés la introducción de una magnitud denominada calor a la que ya hemos aludido y que definiremos ahora como el trabajo cambiado de signo realizado por las fuerzas disipativas. De esta forma, la variación de la energía mecánica del sistema más el calor desarrollado es igual a cero. Cuando intervengan otros tipos de fuerzas no conservativas, la energía mecánica puede transformarse en otras formas de energía eléctrica, por ejemplo.

En cualquier caso, la energía total de un sistema aislado o de sistemas en interacción, que en conjunto pueden considerarse como un único sistema aislado, permanecerá constante en el tiempo. Así ocurrirá en última instancia con el propio universo. Hay que llamar también la atención sobre el hecho de que la noción de calor, al igual que ocurre con el trabajo, tiene un sentido dinámico como transbase de energía, como energía en tránsito.

Por ello, el calor no define el estado de un sistema siendo la energía interna la magnitud que lo especifica. Sólo tiene sentido, pues, hablar de calor en tanto se desarrollan los procesos disipativos dejando de tener después significado físico alguno. El calor, como toda forma de energía, se medirá en julio en el sistema internacional de unidades.

Sin embargo, cuando la naturaleza del calor no era todavía bien comprendida, se empleaba una unidad especial que aún se sigue usando en ciertos casos, aunque su utilización no es afortunada, llamada caloría. Esta equivale a la cantidad de calor que es preciso comunicar a un gramo de agua destilada a 14,5 grados centígrados para elevar su temperatura en un grado bajo la presión de una atmósfera. Un múltiplo de la caloría es la kilocaloría igual a mil calorías.

La relación entre la caloría y el julio viene dada por una caloría igual a 4,185 julios. Puesto que hemos citado a las fuerzas de fricción como ejemplo de fuerzas no conservativas o disipativas, ¿podría hacer algún comentario acerca de estas fuerzas? Con mucho gusto. Un ejemplo típico de fuerzas de fricción corresponde al deslizamiento de un cuerpo sólido sobre otro.

La experiencia nos confirma que al empujar un cuerpo inicialmente en reposo sobre una superficie plana, podremos conseguir que inicie un movimiento, pero en el momento en que se le deja libre, su velocidad irá disminuyendo hasta que finalmente se detendrá. Todo ocurre entonces como si sobre el cuerpo actuase una fuerza opuesta al movimiento, la cual sería responsable de la deceleración y en su caso de la detención de dicho cuerpo móvil. Esta fuerza se conoce con el nombre de fuerza de fricción o derrozamiento por deslizamiento.

Tal fuerza tiene un carácter esencialmente fenomenológico, describiendo estadísticamente las interacciones que tienen lugar entre las moléculas de las superficies en contacto del cuerpo

móvil y del cuerpo sobre el cual desliza el anterior. En un buen número de situaciones se encuentra experimentalmente que la fuerza de fricción es proporcional en módulo a la reacción normal del cuerpo sobre el que desliza el cuerpo móvil, en donde la constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de fricción y carece de dimensiones. Su valor para materiales dados depende del estado de las superficies, así como de las posibles sustancias contaminantes adheridas a aquellas.

Para superficies metálicas el valor de dicho coeficiente se sitúa normalmente entre 0,5 y 1,5. Si las superficies están completamente limpias, las interacciones moleculares entre ambas pueden ser tan intensas que los cuerpos queden totalmente adheridos. Conviene señalar por otro lado que el área de la superficie de contacto efectivo puede ser mucho menor que el área de la superficie macroscópica, del orden de 10^4 a 10^5 veces más pequeña, debido a la existencia de picos en las superficies de una longitud de hasta 10^4 al cuadrado o 10^5 al cubo Armstrong, longitud notablemente superior a la distancia de separación intermolecular.

Además, a lo largo de todo el movimiento se produce constantemente una separación de las superficies de contacto con formación de otras nuevas. En general, los picos mencionados están deformados debido al peso del cuerpo que desliza. En los materiales plásticos existe una presión límite más allá de la cual cesa la deformación.

La superficie de contacto efectivo vendrá pues entonces determinada por la condición de que el producto de la presión límite por el área de dicha superficie sea igual a la reacción normal. Así pues, la fuerza necesaria para vencer las interacciones superficiales es proporcional al área de contacto efectivo y, por tanto, a la reacción normal. En definitiva, la fuerza de fricción no depende del área aparente de contacto.

Otra cuestión es que, para grandes variaciones de velocidad, encontramos experimentalmente que la fuerza de fricción depende de la velocidad instantánea, pero si el intervalo de variabilidad de la velocidad es pequeño, podemos considerar constante la fuerza de fricción en dicho intervalo. Frecuentemente se habla de dos coeficientes de fricción, uno estático y otro cinético. El primero estaría asociado a la mínima fuerza que habría que aplicar a un cuerpo en reposo sobre otro para iniciar el deslizamiento.

El segundo, en cambio, estaría relacionado con la fuerza necesaria para mantener el movimiento. En realidad, sería más correcto referirse a un único coeficiente de fricción capaz de tomar valores distintos en función de la velocidad del cuerpo sometido a un rozamiento. Como es lógico, a una menor velocidad debe corresponder un mayor coeficiente de fricción y viceversa.

Así, los valores del coeficiente estático para materiales dados serán mayores que los del coeficiente cinético. No obstante, las diferencias suelen ser del orden del 10 al 20%. Finalmente, diremos que se ha de revisar todo lo anterior si entre las superficies en contacto existe algún líquido lubricante, debiendo introducir en el análisis del problema las propiedades del líquido

como su viscosidad, magnitud, que da una medida de su fricción interna.

Debemos señalar que, en todo caso, las leyes anteriores no tienen ningún carácter fundamental. Son leyes deducidas experimentalmente y que presentan, eso sí, grandes ventajas de utilidad práctica. Acaban ustedes de escuchar Introducción al curso universitario de Ciencias Físico-Naturales, tema noveno, Sistemas Disipativos, por el profesor don Antonio Rueda de Andrés.

Nos despedimos de ustedes hasta el próximo domingo a las 9.30 de la mañana, en que podrán escuchar Repetitorio de la Universidad Nacional de Educación a Distancia. El tercer programa de Radio Nacional de España les ha ofrecido... Universidad Nacional de Educación a Distancia. En su emisión diaria... Universidad para Todos.

Ha sido un espacio universitario preparado por su claustro de profesores y adaptado y presentado radiofónicamente por el tercer programa de Radio Nacional de España.