

CAPITULO SEGUNDO

FUERZA, TRABAJO, ROZAMIENTO

El Problema del Cisne, el Cangrejo y el Lucio

Una de las fábulas más conocidas de I. A. Krilov es "El cisne, el cangrejo y el lucio"¹. En ella se cuenta como un cisne, un cangrejo y un lucio se pusieron de acuerdo para tirar de un carro cargado. Pero lo más probable es que a nadie se le haya ocurrido estudiar esta fábula desde el punto de vista de la Mecánica. Y sin embargo el resultado que se obtiene no coincide con el que piensa Krilov.

Se nos plantea un problema de Mecánica en el que hay que componer varias fuerzas que actúan formando determinados ángulos entre sí. Las direcciones de estas fuerzas vienen definidas por la propia fábula:

... El cisne tira hacia las nubes,
El cangrejo hacia atrás, y el lucio al agua.

Esto quiere decir (fig. 13) que una fuerza, es decir, la del cisne, está dirigida hacia arriba; otra, la del lucio (OB), hacia un lado, y la tercera, la del cangrejo (OC), hacia atrás. Pero no podemos olvidar que existe otra fuerza, el peso del carro cargado, que está dirigida verticalmente hacia abajo. Según la fábula "el carro hasta ahora está en el mismo sitio", es decir, que la resultante de todas las fuerzas aplicadas a él es igual a cero.

Veamos si esto es así. El cisne, al tirar hacia las nubes, no estorba el trabajo que realizan el cangrejo y el lucio; al contrario, lo hace más fácil, puesto que su fuerza está dirigida en sentido contrario al de la gravedad y, por consiguiente, disminuye el rozamiento de las ruedas con la tierra y con sus ejes y alivia el peso del carro o lo equilibra por completo (puesto que la fábula dice que "para ellos liviana parecía la carga"). Admitiendo, para simplificar, este último caso, vemos que quedan únicamente dos fuerzas: la del cangrejo y la del lucio.

¹ I. A. Krilov, el gran fabulista ruso de finales del siglo XVIII y principios del XIX, plantea en esta fábula que el desacuerdo al realizar una empresa hace que resulten estériles todos los esfuerzos. Esto es lo que ocurre con el cisne el lucio y el cangrejo, que puestos a arrastrar un carro, no pesado para sus fuerzas, no consiguen moverlo del sitio porque cada cual tira para un lado. (N. del T)

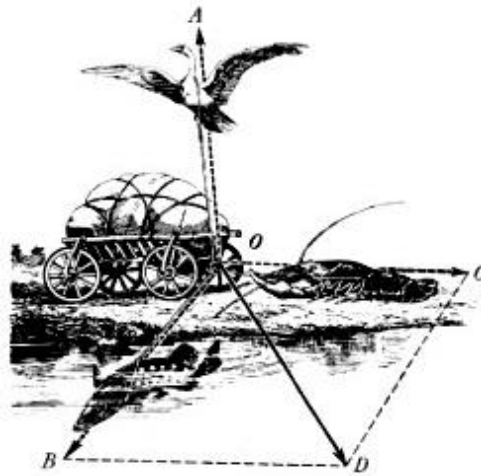


Fig. 13. El problema de] cisne, el cangrejo y el lucio resuelto por las reglas de la Mecánica. La resultante (OD) debe hacer que el carro vaya hacia el río

Sobre las direcciones de estas dos fuerzas sabemos que "el cangrejo tira hacia atrás, y el lucio al agua". Está claro que el agua no puede estar delante del carro, sino a uno de sus lados (puesto que los "trabajadores" de Krilov no se proponían tirarlo al agua). Por lo tanto, las fuerzas del cangrejo y del lucio forman un ángulo entre sí. Pero si dos fuerzas aplicadas a un cuerpo no están en línea recta su resultante no puede ser igual a cero.

Procediendo de acuerdo con las reglas de la Mecánica, construyamos sobre las fuerzas OB y OC el paralelogramo, cuya diagonal OD nos da la dirección y la magnitud de la resultante. Es evidente que esta resultante debe hacer que se mueva el carro,

sobre todo si su peso ha sido equilibrado en todo o en parte por el cisne. Nos queda por determinar hacia dónde se mueve el carro: hacia adelante, hacia atrás o de costado. Esto depende de la relación que exista entre las fuerzas y de las magnitudes que tengan los ángulos que forman entre sí.

Los lectores que tengan cierta práctica en la composición y descomposición de fuerzas pueden analizar fácilmente el caso en que el cisne no equilibra por completo el peso del carro; después de hacerlo quedarán convencidos de que en este caso tampoco puede permanecer inmóvil el carro. Solamente existe un caso en que el carro no se movería al ser solicitado por estas tres fuerzas: cuando el rozamiento de las ruedas con sus ejes o con la carretera es mayor que la resultante de las fuerzas aplicadas. Pero esto se contradice con la afirmación de que "para ellos liviana parecía la carga".

En todo caso Krilov no tenía motivo para asegurar que "el carro sigue sin moverse" y que "... hasta ahora está en el mismo sitio". Sin embargo la moraleja de la fábula sigue siendo cierta.

A Pesar de lo que Dice Krilov

Como acabamos de ver, la regla mundológica de Krilov que dice que "cuando entre amigos no hay acuerdo, sus obras éxito no tienen", no siempre concuerda con la Mecánica, puesto que las fuerzas pueden estar dirigidas en distintas direcciones y a pesar de ello producir cierta resultante. Un ejemplo de esto, que pocas personas sospechan, es el que nos ofrece el trabajo concienzudo de las hormigas (que Krilov alabó como trabajadoras ejemplares). Las hormigas realizan su trabajo colectivo precisamente por el procedimiento que el mismo fabulista como hemos visto criticaba antes. Y a pesar de esto sus esfuerzos dan resultados positivos ... gracias, otra vez, a la ley de la composición de las fuerzas. Si observamos con atención como trabajan las hormigas no tardaremos en darnos cuenta de que la colaboración racional entre ellas es sólo aparente. En realidad cada una trabaja por su cuenta y no se preocupa de ayudar a las demás.

He aquí como describe el trabajo de las hormigas un zoólogo²:

"Cuando diez hormigas arrastran una presa grande por un sitio llano todas actúan por igual y, aparentemente, colaboran entre sí. Pero si la presa (por ejemplo, un gusano) se engancha en cualquier obstáculo, sea un tallo de hierba o una piedrecilla cualquiera, y no se puede seguir arrastrando hacia adelante, sino que hay que rodear dicho obstáculo, se descubre con toda claridad que cada una de las hormigas procura salvar el obstáculo sin ponerse de acuerdo con ninguna de sus compañeras (fig. 14 y 15).



Fig. 14. Esquema de cómo arrastran las hormigas un gusano.

Unas tiran hacia la derecha, otras hacia la izquierda; éstas empujan, aquéllas tiran hacia atrás. Se trasladan de una parte a otra, agarran la presa por otro sitio, pero cada una empuja o tira por su cuenta. Cuando por casualidad las fuerzas de todas las que trabajan se componen de manera que 4 hormigas procuran mover el gusano hacia un lado, mientras que 6 procuran hacerlo en otro sentido, la presa se desplaza hacia el lado de las seis, a pesar de la reacción que oponen las otras cuatro".

² E. Elachich, "Instinto".



Fig. 15. Esquema de cómo arrastran las hormigas un gusano. Las flechas indican las direcciones aproximadas de los esfuerzos que hacen las hormigas.

Veamos otro ejemplo muy instructivo que ilustra perfectamente la aparente colaboración entre las hormigas.

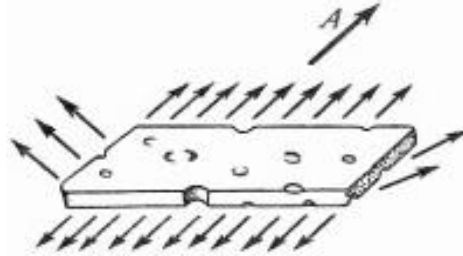


Fig. 16. Esquema de cómo las hormigas intentan arrastrar hasta el hormiguero (que se encuentra en la dirección A) un trocito de queso.

En la fig. 16 se representa un pedacito de queso de forma rectangular al que se agarran 25 hormigas. El queso se desliza despacito en la dirección que indica la flecha A y puede pensarse que la fila delantera de hormigas va tirando de él, la trasera va empujando y las hormigas laterales ayudan a las demás. Pero si cogemos un cuchillo y separamos con él la fila de hormigas trasera veremos que ... ¡el queso se mueve más de prisa! Está claro que las 11 hormigas traseras tiraban hacia atrás. Cada una de ellas procuraba volver la carga de manera que, andando hacia atrás, le fuera posible llevarla hasta el hormiguero. Es decir, las hormigas traseras no sólo no ayudaban a las delanteras, sino que les estorbaban celosamente y anulaban sus esfuerzos. Para arrastrar este pedacito de queso hubiera sido suficiente el esfuerzo de cuatro hormigas, pero el desacuerdo reinante entre ellas hace que sean 25 las que tiran de él.

Esta peculiaridad de las acciones mancomunadas de las hormigas fue observada hace mucho tiempo por el célebre escritor humorista norteamericano Mark Twain, quien cuenta cómo dos hormigas pretendían arrastrar a una pata de grillo: "Cada una coge la carga por uno de sus extremos y tira de ella con todas sus fuerzas en sentido contrario al de la otra. Ambas se dan cuenta de que ocurre algo anormal, pero no comprenden de qué se trata. Comienza un altercado entre ellas: la discusión se transforma en pelea ... Al fin hacen las paces y vuelven a empezar el absurdo trabajo común, con la Particularidad de que la hormiga que resultó herida en la lucha sigue siendo un estorbo. Pero la hormiga sana, haciendo un supremo esfuerzo, arrastra la carga y a su compañera, la cual, en lugar de soltar la presa, sigue colgada a ella". Twain dice en broma y con razón que "las hormigas trabajan bien cuando el naturalista que las observa es poco ducho y saca conclusiones falsas".

¿Es Fácil Romper el Cascaron de un Huevo?

Uno de los "problemas filosóficos" en que solía romperse la cabeza el pensador Kifa Mokiévich de "Almas Muertas"³ era el siguiente: "Si el elefante naciera de un huevo, el cascarón ya tendría que ser gordo; ni con un cañón se podría atravesar. Habría que inventar algún arma de fuego nueva".

Este "filósofo" de Gógol se quedaría asombrado si supiera que tampoco es cosa delicada el cascarón de un huevo ordinario, a pesar de su delgadez. Romper un huevo entre las palmas de las

³ Obra inmortal del escritor ruso Nicolái Vasilievich Gógol. (N. del T.)

manos, apretando sus extremos, no es cosa fácil; el esfuerzo que hay que hacer para romper el cascarón en estas condiciones no es pequeño⁴.

La extraordinaria fortaleza del cascarón del huevo se debe exclusivamente a su forma convexa y tiene la misma explicación que la resistencia de cualquier tipo de bóvedas y arcos.



Fig. 17. Para romper un huevo en estas condiciones hace falta un gran esfuerzo

⁴ Este experimento debe hacerse con precaución, ya que los fragmentos del cascarón pueden hincarse en las manos.

En la fig. 18 se representa un pequeño arco de piedra de una ventana. El peso S (es decir, el peso de la parte de pared que se encuentra más arriba), que presiona sobre la piedra en forma de cuña que hay en la parte central del arco, aprieta hacia abajo con la fuerza que se representa en la figura por medio de la flecha A . Pero esta piedra, como es cuneiforme, no puede desplazarse hacia abajo y lo único que hace es presionar sobre las piedras contiguas. La fuerza A se descompone, de acuerdo con la regla del paralelogramo, en dos fuerzas C y B que se equilibran con la resistencia de las piedras vecinas. Estas últimas quedan sujetas a su vez entre las otras contiguas. De esta forma, cuando una fuerza exterior actúa sobre el arco no puede destruirlo. Pero si la fuerza actúa por la parte interior del arco lo derrumba fácilmente. Esto es comprensible, puesto que la forma de cuña que impide que las piedras puedan descender no es obstáculo para que puedan ser levantadas.

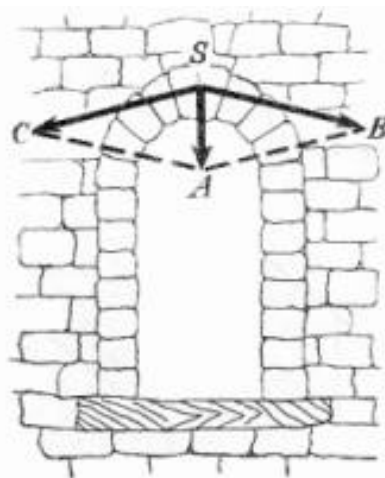


Fig. 18. Explicación de por qué son tan resistentes los arcos.

El cascarón del huevo también es un arco, pero continuo, es decir, una bóveda cerrada. Cuando sobre él actúa una presión exterior no se rompe tan fácilmente como sería de esperar teniendo en cuenta la fragilidad del material. 'Sobre cuatro huevos crudos se puede poner una mesa bastante pesada sin que sus patas los aplasten (para que los huevos se mantengan de pie hay que ensanchar sus extremos con un poco de escayolar esta última se pega muy bien al cascarón).

Ahora comprenderá el lector por qué la clueca no teme aplastar los huevos cuando se echa sobre ellos. No obstante, cuando el débil pollito necesita salir de su prisión natural, rompe desde dentro el cascarón con su pico, sin que esto le cueste gran trabajo.

Al romper el cascarón de un huevo, golpeándolo lateralmente con una cucharilla, no sospechamos lo fuerte que es cuando la presión actúa sobre él en condiciones naturales, ni lo seguro que es el blindaje con que la naturaleza ha protegido al ser que se desarrolla en su interior. El secreto de que sean tan resistentes los globos de las lámparas eléctricas, que parecen tan frágiles y delicados, se explica de la misma manera que la resistencia del cascarón del huevo. Su fortaleza se hace más digna de admiración si recordamos que muchas de ellas (las de vacío, es decir, las que no están llenas de gas) están casi totalmente vacías y, por consiguiente, no tienen nada dentro que pueda ofrecer reacción a la presión del aire exterior. Sin embargo esta presión del aire exterior sobre la lámpara eléctrica no es pequeña. Suponiendo que el diámetro de dicha lámpara mida 10 cm, la presión que soporta por ambos lados será mayor de 75 kg (¡el peso de un hombre!). La experiencia demuestra que las lámparas eléctricas de vacío pueden soportar presiones dos veces y media mayores que ésta.

A Vela Contra el Viento

Una cosa difícil de comprender es cómo pueden los barcos de vela navegar "contra el viento", o como dicen los marineros navegar "ciñendo o de bolina". Es verdad que cualquier marino puede decir que directamente contra el viento no se puede navegar a vela, pero sí se puede avanzar formando un ángulo agudo con su dirección. Este ángulo puede ser pequeño (de cerca de la cuarta parte de un ángulo recto) y, por consiguiente, parece igual de incomprensible navegar directamente contra el viento o hacerlo formando un ángulo de 229 con su dirección.

No obstante, en realidad no es lo mismo. Ahora veremos cómo la fuerza del viento se puede aprovechar para navegar a su encuentro formando un ángulo pequeño. Comencemos por analizar cómo el viento, en general, ejerce su acción sobre la vela, es decir, hacia donde empuja el viento a la vela cuando sopla sobre ella. El lector pensara probablemente que el viento siempre empuja a la vela en el mismo sentido que él sopla. Pero esto no es así; cualquiera que sea la dirección en que sople el viento siempre le empujará a la vela perpendicularmente a su superficie.

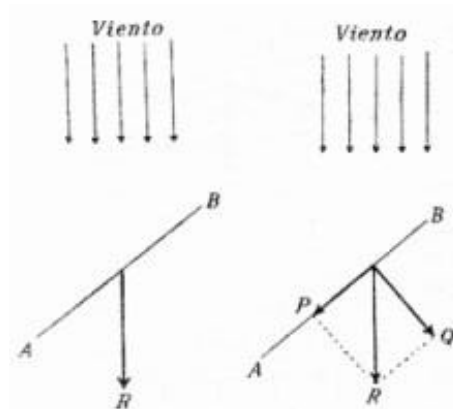


Fig. 19. El viento siempre le empuja a la vela formando un ángulo recto con su plano.

En efecto, supongamos que la dirección del viento es la que indican las flechas de la fig. 19 y que la recta AB representa la vela. Como el viento presiona por igual sobre toda la superficie de esta última, podemos sustituir esta presión por la fuerza R, aplicada al centro de la vela. Esta fuerza se puede descomponer en dos: una, la fuerza Q, perpendicular a la vela, y otra, la fuerza P, dirigida a lo largo de ella (fig. 18, a la derecha).

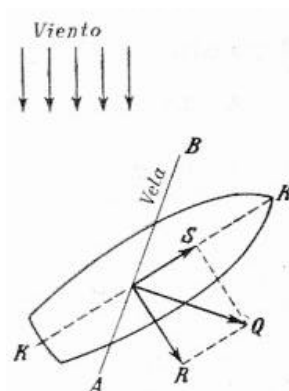


Fig. 20. Así se puede navegar a vela en contra del viento.

Esta última fuerza no le empuja a la vela, puesto que el rozamiento del aire con el lienzo es insignificante. Por lo tanto, queda solamente la fuerza Q, que empuja a la vela formando un ángulo recto con ella.

Una vez sabido esto, podemos comprender sin dificultad cómo puede un barco de vela navegar formando con la dirección del viento en contra un ángulo agudo. Supongamos que la recta KK' (fig. 20) representa la línea de la quilla del barco. El viento sopla, formando un ángulo agudo con esta línea, en la dirección

que indica la serie de flechas. La recta AB representa la vela, que se coloca de manera que su superficie divida por la mitad al ángulo que forma la dirección de la quilla con la del viento.



Fig. 21. Voltaje de un barco a vela

Veamos cómo se descomponen las fuerzas en estas condiciones (fig. 19). La presión del viento sobre la vela la representamos por medio de la fuerza Q , que como sabemos tiene que ser perpendicular a dicha vela. Esta fuerza se puede dividir en dos: una, la fuerza R , perpendicular a la quilla, y otra, la fuerza S , dirigida hacia adelante a lo largo de la línea de la quilla del barco. Como el barco no se puede mover en la dirección R , puesto que encuentra una gran resistencia en el agua (la quilla de los barcos de vela suele ser muy profunda), la fuerza R se equilibra casi totalmente con esta resistencia. Queda, pues, una sola fuerza, la S , que como puede verse está dirigida hacia adelante y, por consiguiente, hace que el barco avance formando un ángulo agudo con la dirección del viento, como si fuera en contra de él⁵. Este movimiento se realiza generalmente en forma de zigzag, como se muestra en la fig. 21. En lenguaje marinerío este movimiento se llama "voltajear".

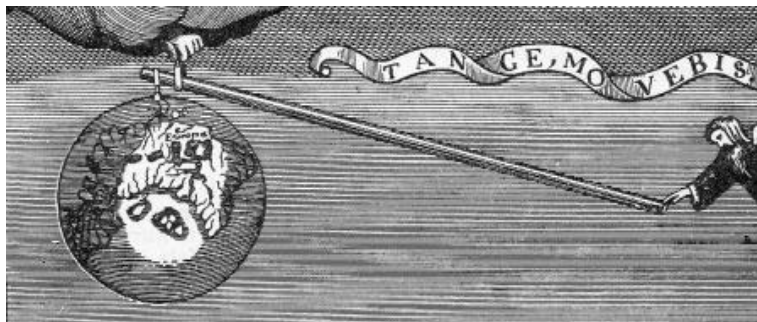


Fig. 22. "Arquímedes levantando la Tierra con la palanca".
Grabado del libro de Varignon (1787) sobre Mecánica.

⁵ Se puede demostrar que la fuerza S tiene su valor máximo cuando la superficie de la vela divide por la mitad el ángulo que forma la dirección de la quilla con la del viento

¿Hubiera Podido Arquímedes Levantar la Tierra?

¡Dadme un punto de apoyo y levantaré la Tierra!, dice la leyenda que exclamó Arquímedes, el genial mecánico de la antigüedad, descubridor de las leyes de la palanca. "En una ocasión Arquímedes - leemos en un libro de Plutarco - escribió a Hierón, tirano de Siracusa, de quien era pariente y amigo, que con una fuerza dada se puede mover cualquier peso. Arrastrado por la fuerza de sus argumentos añadió, que si existiera otra Tierra, y él pudiera trasladarse a ella, haría que la nuestra se moviera de su sitio".

Arquímedes sabía que no existe peso imposible de levantar con la fuerza más débil, si para ello se utiliza una palanca. No hay más que aplicar esta fuerza a un brazo de palanca muy largo, mientras que sobre el peso se hace que actúe el brazo más corto. Por esto pensaba que presionando sobre un brazo de palanca extraordinariamente largo la fuerza de sus manos bastaría para levantar un peso cuya masa fuera igual a la de nuestro planeta⁶.

Pero si este gran mecánico de la antigüedad hubiera sabido lo grandiosa que es la masa de la Tierra, lo más probable es que se hubiera abstenido de hacer su presuntuosa exclamación.

Para convencernos de esto, supongamos por un momento que Arquímedes consiguió la "otra Tierra", es decir, el punto de apoyo que buscaba; supongamos también que logró hacer una palanca de suficiente longitud. Cuánto tiempo tardaría en levantar un peso de masa igual a la de la Tierra un solo centímetro? Por lo menos ... ¡treinta billones de años!

En efecto, los astrónomos saben hoy la masa que tiene la Tierra⁷; un cuerpo que tuviera esta misma masa pesaría en la superficie de nuestro planeta (en números redondos),

6 000 000 000 000 000 000 000 t.

Si un hombre puede levantar directamente 60 kg, para "levantar la Tierra" tendría que aplicar sus manos a un brazo de palanca que fuera...

¡100 000 000 000 000 000 000 000 veces mayor que el brazo menor!

Un cálculo sencillo basta para demostrar que mientras el extremo del brazo corto suba 1 cm, el otro extremo describirá en el espacio interplanetario un enorme arco de

1 000 000 000 000 000 000 km.

Este camino, cuya longitud es casi inconcebible, es el que hubiera tenido que recorrer la mano de Arquímedes que accionara la palanca para poder "levantar la Tierra" un solo centímetro. ¿Cuánto tiempo necesitaría la mano para recorrer este camino? Si suponemos que Arquímedes era capaz de levantar un peso de 60 kg a 1 m de altura en un segundo (es decir, si suponemos que tenía la capacidad de trabajo de un caballo de vapor), para "levantar la Tierra" 1 cm hubiera necesitado 1 000 000 000 000 000 000 000 segundos, es decir, ¡treinta billones de años! Si Arquímedes hubiera empujado la palanca durante toda su larga vida no habría podido "levantar la Tierra" ni siquiera el espesor del más delgado de sus cabellos.

Ningún ardid del genial inventor le hubiera servido para reducir sensiblemente este plazo. Porque la "ley de oro de la Mecánica" dice que, en cualquier máquina, lo que se gana en fuerza se pierde en camino recorrido, es decir, en tiempo. Por eso, aunque Arquímedes hubiera conseguido que su mano alcanzara la máxima velocidad posible en la naturaleza, es decir, la de 300.000 km por

⁶ Para concretar el problema entenderemos que la expresión "levantar la Tierra" quiere decir levantar sobre la superficie de la Tierra un peso cuya masa sea igual a la de nuestro planeta

⁷ En la obra del mismo autor 'Astronomía recreativa' se explica cómo fue determinada la masa de la Tierra. (N. de la R.)

segundo (igual a la de la luz), habría "levantado la Tierra" un centímetro al cabo de diez millones de años de trabajo.

El Atleta de Julio Verne y la Fórmula de Euler

Julio Verne describe, en su novela "Mathias Sandorf", al atleta Matifou de la siguiente manera: "...su cabeza es hermosa, los hombros proporcionados, el pecho como un fuelle de fragua, las piernas como dos vástagos de doce años, los brazos como dos bielas de una máquina, las manos como cizallas." Entre las hazañas que el autor le atribuye a este atleta, la más asombrosa quizá sea la ocurrida con el "Trabacolo", barco cuya botadura fue frenada por las poderosas manos de nuestro gigante.

He aquí como relata el novelista este episodio:

«El "Trabacolo", libre ya de las escoras que le sostenían por los flancos, estaba listo para ser botado ... con el talón de su quilla apoyado sobre la corredera enjabonada, no estaba sujeto más que por el tope. Bastaba levantar este tope para que comenzara el deslizamiento ... Media docena de carpinteros armados de mazos golpeaban unas cuñas introducidas delante de la quilla del "Trabacolo" con el fin de levantarlo un poco y de esta manera producir la sacudida que le hiciera arrastrarse hacia el mar.

Todos los presentes seguían esta operación con el más vivo interés, en medio de, un silencio general.

En este momento, de detrás del cabo apareció un yate de recreo ... La goleta se dirigía al puerto y tenía que pasar por delante de los astilleros en que se preparaba la botadura del "Trabacolo", por eso, en cuanto dio la señal, hubo que suspender la operación para de esta forma evitar cualquier accidente. Los trabajos debían reanudarse cuando el yate hubiera pasado el canal. Un abordaje entre los dos navíos, el uno de costado y el otro avanzando a gran velocidad, hubiera causado sin duda una gran catástrofe a bordo de la goleta.

Los obreros dejaron de golpear las cuñas con sus mazos ... Todas las miradas se concentraron en la graciosa embarcación cuyas blancas velas estaban doradas por los oblicuos rayos del Sol.;

Pronto la goleta ... se encontraba enfrente de los astilleros.

De repente se oye un grito de terror. El "Trabacolo" empieza a moverse, en el preciso momento en que el yate comienza a presentarle su borda de estribor.

Los navíos parecían prontos a chocar. No había tiempo ni 44 posibilidad de evitar el encuentro. El "Trabacolo" se deslizaba rápidamente por la corredera. Una nubecilla de humo blanco, producido por el rozamiento, se arremolinó ante su proa, mientras que la popa se hundía en las aguas de la bahía (la botadura se hacía de popa. Y. P.).

En este momento apareció un hombre. Cogió una de las amarras, que pendían del "Trabacolo".

Pero en vano intentó retenerla encorvándose contra el suelo, con riesgo de ser arrastrado. Hay, un tubo de hierro que como puntal de amarre está hincado en la tierra. En un instante la amarra está enrollada a él y se va desenrollando poco a poco, mientras que el hombre, exponiéndose a ser apresado por ella y estrujado, la sujeta, haciendo un esfuerzo sobrehumano, durante 10 segundos. Al fin se suelta la amarra. Pero estos diez segundos han sido suficientes. El "Trabacolo" se sumerge en las aguas de la bahía y es levantado por ellas como por un golpe de cabeceo. Después enfila en dirección al canal, pasa rasante a menos de un pie de la popa de la goleta.

La goleta está salvada. En cuanto al hombre, en cuya ayuda nadie tuvo tiempo de acudir, por lo inesperada y rápidamente que ocurrió todo, era Cap Matifou.»

Cómo se sorprendería el autor de esta novela si le dijese que para realizar semejante hazaña no hacía falta ser un gigante ni tener, como Matifou, la "fuerza 'de un tigre". ¡Cualquier persona ingeniosa y decidida podría haber hecho lo mismo!

La Mecánica nos enseña que cuando una maroma está enrollada a un amarradero o noray la fuerza de rozamiento alcanza valores grandes. Cuanto mayor sea el número de vueltas que da la maroma en torno al amarradero tanto mayor será el rozamiento. La regla del aumento de este rozamiento dice que cuando el número de vueltas aumenta en proporción aritmética, el rozamiento crece en proporción geométrica. Por esto, incluso un débil niño puede equilibrar una fuerza enorme sujetando el extremo libre de una maroma arrollada 3 ó 4 vueltas en un eje fijo. En los puertos fluviales muchachos jóvenes sujetan por este procedimiento los barcos que atracan, que a veces llevan centenares de pasajeros. Consiguen hacerlo no porque son muy fuertes, sino gracias al rozamiento de la maroma con el noray.

Euler, el insigne matemático del siglo XVIII, estableció el valor de la fuerza de rozamiento en función del número de vueltas con que se arrolla la cuerda al amarradero. A continuación ofrecemos la fórmula de Euler a aquellos que no se asustan del lenguaje concreto de las expresiones matemáticas:

$$F = fe^{k\alpha}$$

F es la fuerza contra la cual oponemos nuestro esfuerzo f. La letra e representa el número 2,728 ... (base de los logaritmos naturales), k es el coeficiente de rozamiento entre la maroma y el amarradero. La letra α designa el "ángulo de arrollamiento", es decir, la relación que existe entre la longitud del arco abarcado por la maroma y el radio de este arco.

Si aplicamos esta fórmula al caso descrito por Julio Verne obtendremos un resultado sorprendente. En este caso la fuerza F será la tracción del barco que resbala por la grada. El peso del barco nos lo dice la novela: 50 t. Supongamos que la grada tiene una inclinación del 1/10. En este caso sobre la maroma no actúa todo el peso del barco, sino una décima parte de él, es decir, 5 t ó 5.000 kg.

Consideremos que el valor de k - coeficiente de rozamiento entre la maroma y el amarradero de hierro - es igual a 1/3. La magnitud α es fácil de hallar suponiendo que Matifou arrolló tres veces solamente la maroma al amarradero. En estas condiciones

$$a = \frac{3 \cdot 2 \cdot p}{r} = 6$$

poniendo todos estos valores en la fórmula de Euler; obtenemos la ecuación

$$5.000 = f \cdot 2.72^{6p \cdot \frac{1}{3}} = f \cdot 2.72^{2p}$$

La incógnita f (es decir, la magnitud del esfuerzo que hay que realizar) se puede hallar por esta misma ecuación tomando logaritmos:

$$\lg(5.000) = \lg(f) + 2p \lg(2.72)$$

$$f = 9.3kg$$

Por lo tanto, el esfuerzo que tuvo que hacer el gigante para realizar su proeza y aguantar la amarra fue de 10 kg (!).

Podría pensarse que esta cifra (10 kg) es simplemente teórica, pero que en realidad se necesita un esfuerzo mucho mayor. Nada de eso, nuestro resultado peca por exceso. Si la amarra es una maroma de cáñamo y el amarradero es de madera, el coeficiente k es aún mayor y el esfuerzo necesario es irrisoriamente insignificante. Lo que hace falta es que la cuerda sea suficientemente resistente para aguantar la tensión; si esto es así, hasta un niño débil (arrollando 3 ó 4 veces la cuerda) no sólo puede repetir la hazaña del atleta de Julio Verne, sino superarla.

¿De qué Depende la Solidez de los Nudos?

En nuestra vida ordinaria, sin darnos cuenta de ello, utilizamos con frecuencia las ventajas que nos da la fórmula de Euler. Un nudo no es otra cosa que una cuerda arrollada a un eje, con la particularidad de que en este caso las veces de este último las hace otra parte de la misma cuerda. La solidez de cualquier clase de nudos (ordinarios, de ballestrinque, marineros, de tejedor, de lazada, etc.) depende exclusivamente del rozamiento, que en este caso aumenta mucho debido a que la cuerda se enrolla sobre sí misma, lo mismo que la maroma alrededor del amarradero. Esto es fácil de comprobar observando las vueltas que da la cuerda al formar el nudo. Cuanto más vueltas y cuanto mayor número de veces se enrolle la cuerda alrededor de sí misma, tanto mayor será el "ángulo de arrollamiento" y, por consiguiente, el nudo será más sólido.

Los sastres utilizan inconscientemente este mismo fenómeno cuando cosen los botones. Por eso hacen pasar el hilo multitud de veces entre los agujeros del botón y la tela y después lo cortan. Si el hilo es fuerte, el botón no se cae. En este caso se aplica la regla mencionada anteriormente: cuando el número de vueltas que da el hilo aumenta en proporción aritmética, la solidez de la costura (o pegadura del botón) crece en proporción geométrica.

Si no existiera rozamiento no podríamos utilizar botones, puesto que los hilos se desenrollarían por la acción de su peso y los botones se caerían.

Si no Existiera Rozamiento

Ya hemos visto lo diversas e inesperadas que son las formas en que se manifiesta el rozamiento a nuestro alrededor. El rozamiento toma parte muy importante incluso allí donde nosotros ni lo sospechamos. Si el rozamiento desapareciera repentinamente, muchos de los fenómenos ordinarios se desarrollarían de formas completamente distintas.

El papel del rozamiento fue descrito de una manera muy pintoresca por el físico francés Guillaume:

"Todos hemos tenido ocasión de salir a la calle cuando ha helado. ¡Cuánto trabajo nos ha costado evitar las caídas! ¡Cuántos movimientos cómicos tuvimos que hacer para poder seguir en pie! Esto nos obliga a reconocer que, de ordinario, la tierra por que andamos posee una propiedad muy estimable, gracias a la cual podemos conservar el equilibrio sin gran esfuerzo. Esta misma idea se nos ocurre cuando vamos en bicicleta por un pavimento resbaladizo o cuando un caballo se escurre en el asfalto y se cae. Estudiando estos fenómenos llegamos a descubrir las consecuencias a que nos conduce el rozamiento. Los ingenieros procuran evitar el rozamiento en las máquinas, y hacen bien. En la Mecánica aplicada se habla del rozamiento como de un fenómeno muy pernicioso, y esto es cierto, pero solamente dentro de los límites de un estrecho

campo especial. En todos los demás casos debemos estar agradecidos al rozamiento. El nos da la posibilidad de andar, de estar sentados y de trabajar sin temor a que los libros o el tintero se caigan al suelo o de que la mesa resbale hasta toparse con algún rincón o la pluma se nos escurra de entre los dedos.

El rozamiento es un fenómeno tan difundido que, salvo raras excepciones, no hay que pedirle ayuda; él mismo nos la ofrece.

El rozamiento da estabilidad. Los albañiles nivelan el suelo de manera que las mesas y las sillas se quedan allí donde las ponemos. Si sobre una mesa colocamos platos, vasos, etc., podemos estar tranquilos de que no se moverán de sus sitios, a no ser que esto ocurra en un barco cuando hay oleaje.

Imaginémonos que el rozamiento se puede eliminar por completo. En estas condiciones, los cuerpos, tengan las dimensiones de una peña o las de un pequeño granito de arena, no podrán apoyarse unos en otros: todos empezarán a resbalar o rodar y así continuarán hasta que se encuentren a un mismo nivel. Si no hubiera rozamiento, la Tierra sería una esfera sin rugosidades, lo mismo que una gota de agua."

A esto podemos añadir, que si no existiera el rozamiento los clavos y los tornillos se saldrían de las paredes, no podríamos sujetar nada con las manos, los torbellinos no cesarían nunca, los sonidos no dejarían de oírse jamás y producirían ecos sin fin, que se reflejarían en las paredes sin debilitarse.

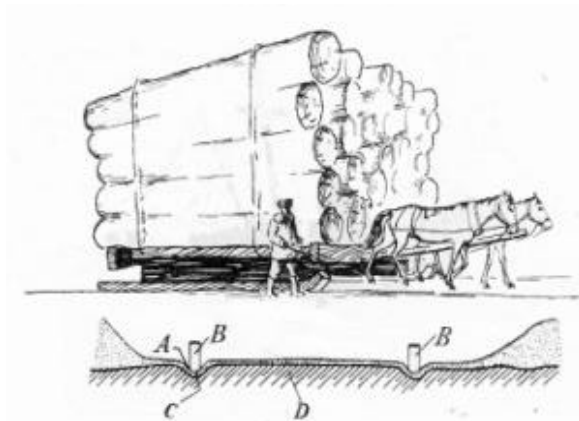


Fig. 23. Arriba, un trineo cargado sobre un camino de hielo; dos caballos arrastran una carga de 70 toneladas. Abajo, el camino de hielo; A, carril; B, deslizaderas del trineo; C, nieve apisonada; D, fundamento de tierra de la carretera.

Las heladas nos dan siempre buenas lecciones de la gran importancia que tiene el rozamiento. En cuanto nos sorprenden en la calle nos sentimos incapaces de dar un paso sin temor a caernos. Como muestra instructiva reproducimos las noticias que publicaba un periódico en una ocasión (en diciembre de 1927):

"Londres, 21. Debido a la fuerte helada, el tráfico urbano y tranviario se ha hecho muy difícil en Londres. Cerca de 1 400 personas han ingresado en los hospitales con fracturas de brazos y piernas".

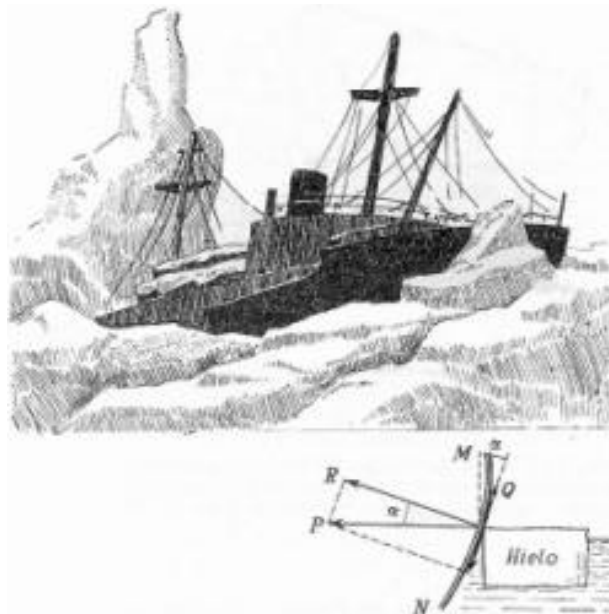
"Cerca del Hyde Park chocaron tres automóviles y dos vagones del tranvía. Los automóviles resultaron totalmente destruidos por la explosión de la gasolina ..."

"París, 21. La helada ha ocasionado en París y sus alrededores numerosos accidentes ..."

Y sin embargo, el hecho de que el hielo ofrezca poco rozamiento puede ser útil para fines técnicos. Un ejemplo son los trineos ordinarios. Otra demostración aun más convincente son los llamados caminos de hielo, que se hacían para transportar los leños desde el lugar de la tala hasta el ferrocarril o hasta el punto de lanzamiento a un río para su transporte por flotación. Por estos caminos (fig. 23), que tienen una especie de raíles lisos helados, un par de caballos puede arrastrar un trineo cargado con 70 toneladas de troncos.

Causa Física de la Catástrofe del "Cheliuskin"

De lo que acabamos de decir no debe sacarse la ligera conclusión de que el rozamiento que produce el hielo es siempre insignificante. Incluso cuando la temperatura está próxima a cero grados, el rozamiento suele ser bastante considerable. El funcionamiento de los rompehielos hizo necesario un estudio del rozamiento que se produce entre los hielos polares y las planchas de acero que revisten los barcos. Este estudio puso de manifiesto que dicho rozamiento es mayor de lo que se esperaba y no menor que el del acero con el acero, es decir, el coeficiente de rozamiento entre chapas de acero de revestimiento nuevas y el hielo es igual a 0,2.



*Fig. 24. El "Cheliuskin" aprisionado en los hielos.
Abajo: fuerzas que actúan sobre el costado MN del
buque cuando presiona el hielo.*

Para comprender lo que representa esta cifra para los barcos que navegan por los mares helados examinemos la fig. 24. En ella se representan las direcciones de las fuerzas que actúan sobre la borda MN del casco cuando presiona el hielo. La fuerza P, de la presión del hielo, se descompone

en dos: una, la fuerza R , perpendicular a la superficie de la borda, y otra, la F , tangente a dicha borda. El ángulo comprendido entre P y R es igual al ángulo α de inclinación de la borda con respecto a la vertical.

La fuerza Q , del rozamiento del hielo con la borda, es igual a R multiplicada por el coeficiente de rozamiento, es decir, por $0,2$. Tenemos, pues, que $Q=0,2R$. Si la fuerza Q , del rozamiento, es menor que F , esta última hunde al hielo en el agua y éste se desliza a lo largo del casco sin causarle daño alguno. Pero si Q es mayor que F , el rozamiento impide que se hunda el hielo y éste, si la presión dura mucho, puede abollar y aplastar el casco.

¿Cuándo es $Q < F$?

Como puede verse, $F = R \cdot \text{tg}(\alpha)$, por consiguiente, deberá existir la desigualdad $Q < R \cdot \text{tg}(\alpha)$ pero como $Q = 0,2R$, la desigualdad $Q < F$ nos lleva a la siguiente:

$$0,2R > R \cdot \text{tg}(\alpha)$$

$$\text{o sea } \text{tg}(\alpha) > 0,2.$$

Buscando en las tablas encontramos que el ángulo cuya tangente es $0,2$ es igual a 11° . Por lo tanto, $Q < F$ cuando $\alpha > 11^\circ$. De esta forma se determina la inclinación que deben tener las bordas del barco, con respecto a la vertical, para que la navegación entre los hielos sea segura, es decir, esta inclinación deberá ser de 11° por lo menos.

Veamos ahora lo que ocurrió con el "Cheliuskin". Este barco, que no era rompehielos, recorrió felizmente toda la ruta del norte, pero en el estrecho de Bering fue apresado por los hielos. Estos arrastraron al "Cheliuskin" bastante hacia el norte y finalmente lo aplastaron (en febrero del año 1934). Los dos meses heroicos que permanecieron los tripulantes del "Cheliuskin" en el campo de hielo y su salvamento por los aviadores soviéticos son episodios que no pueden olvidarse. Estos aviadores fueron precisamente los primeros que recibieron el título de Héroes de la Unión Soviética.

La catástrofe ocurrió como sigue:

"El fuerte acero del casco resistió al principio comunicó por radio el jefe de la expedición O. Y. Schmidt -. Se veía cómo el hielo iba abollando las bordas con su presión y cómo sobre él las chapas del revestimiento del casco empezaban a hincharse encorvándose hacia afuera. La ofensiva del hielo era lenta pero irrechazable. Las chapas de hierro del revestimiento del casco, después del hincharse, se desgarraron por la costura. Los remaches saltaron produciendo chasquidos. En un instante quedó arrancada la borda del barco desde la bodega de proa hasta el extremo de popa del puente ..."

Después de lo expuesto en este artículo, el lector deberá comprender cuál fue la causa física de esta catástrofe.

De aquí se deduce la conclusión práctica siguiente: cuando se construyen barcos que deben navegar entre hielos hay que dar a sus bordas una inclinación determinada, es decir, la inclinación mínima de 11°

Un Palo que se Autoequilibra

Sobre los dedos índices de ambas manos, separadas, coloquemos un palo liso de la manera que indica la fig. 25.



*Fig. 25. Experimento con la regla.
Arriba, fin del experimento.*

Hecho esto, vayamos acercando entre sí dichos dedos hasta que se junten. ¡Qué cosa más rara! En esta posición el palo conserva el equilibrio y no se cae. Si repetimos este experimento muchas veces variando la posición inicial de los dedos, veremos que el resultado es siempre el mismo: cuando se juntan los dedos el palo está en equilibrio.

Si en lugar del palo empleamos una regla de dibujo, un bastón, un taco de billar o un cepillo de barrer, observaremos que ocurre lo mismo.

¿En qué consiste el secreto de este resultado tan inesperado?

En primer lugar está claro lo siguiente: como quiera que el palo se encuentra en equilibrio cuando los dedos están juntos, quiere decir que éstos se juntan debajo del centro de gravedad del palo (puesto que un cuerpo permanece en equilibrio si la vertical trazada por su centro de gravedad no se sale de los límites de la base en que se apoya).

Cuando los dedos están separados, soporta mayor carga el dedo que se encuentra más próximo al centro de gravedad del palo. Pero al aumentar la presión aumenta también el rozamiento; por lo tanto, el dedo que está más cerca del centro de gravedad experimenta mayor rozamiento que el que está más alejado. En estas condiciones el dedo más cercano al centro de gravedad no se deslizará por debajo del palo; el único que se mueve es el dedo que está más lejos de este punto. En cuanto este último dedo resulta más próximo al centro de gravedad que el otro, los dedos cambian de papel. Estos cambios se suceden hasta que los dedos se juntan. Y como cada vez se mueve un solo dedo (el que está más lejos del centro de gravedad) es natural que al final ambos dedos se encuentren debajo de dicho centro. Antes de dar por terminado este experimento repitémoslo con un cepillo de barrer (fig. 26, arriba) y planteémonos la siguiente pregunta: si cortamos el palo del cepillo por el sitio en que se apoya en los dedos y ponemos las dos partes así obtenidas en los platillos de una balanza (fig. 26, abajo), ¿cuál de los dos platillos bajará más, el del palo o el del cepillo?

Parece natural que, como las dos partes del cepillo se equilibran entre sí cuando descansan sobre los dedos, se encuentren en equilibrio los platillos de la balanza. Pero en realidad baja más el platillo en que se encuentra el cepillo.

La causa de que esto ocurra no es difícil de comprender, si se tiene en cuenta que cuando el cepillo estaba en equilibrio sobre los dedos las fuerzas (pesos) correspondientes a sus dos partes

estaban aplicadas a brazos de palanca diferentes, mientras que en la balanza estas mismas fuerzas (pesos) están aplicadas a 'los extremos de una palanca de brazos iguales.

Por encargo mío se fabricó, para el pabellón de ciencia recreativa del parque de Leningrado, un juego de palos cuyos centros de gravedad se encontraban en diferentes sitios.

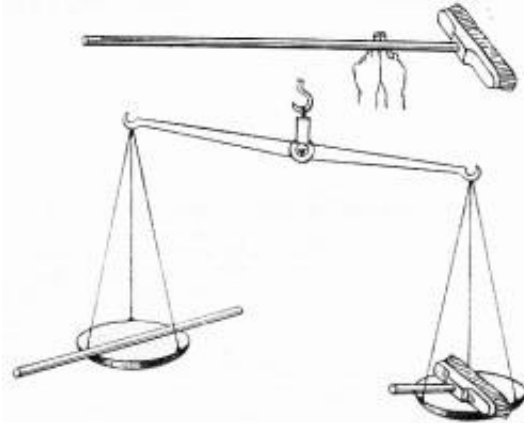


Fig. 26. El mismo experimento con un cepillo de barrer. ¿Por qué no está en equilibrio la balanza?

Estos palos podían dividirse en dos partes (por lo general desiguales) precisamente por el lugar en que estaba el centro de gravedad. Los visitantes se asombraban al ver que la parte más corta pesaba más que la larga.