

Levitación magnética

Cuenta Plinio el Viejo en su *Historia Natural* que Dinócrates, arquitecto de Alejandría, trazó para la reina Arsinoe un plano para la construcción de la bóveda de un templo en piedra imán, de suerte que una escultura labrada en hierro pareciese pender en el aire. San Agustín lo dio por cierto. Mediante el cálculo de la fuerza de los imanes, explica, los sacerdotes del templo consiguieron que la estatua de hierro se mantuviera en perfecto equilibrio, haciendo creer a los fieles que se trataba de un milagro perpetuo. Si bien la levitación magnética exige algo más que unos bloques de magnetita, el ejemplo muestra que los imanes vienen cautivando a las mentes inquietas desde la antigüedad.

La magnetita (Fe_3O_4) constituye un mineral de color negro, cristalino o masivo, que, de forma natural, atrae al hierro. Hasta el advenimiento de la electricidad, fue el único imán permanente con el que se podía experimentar. Sus propiedades permanecieron envueltas en el misterio durante siglos.

Hoy se acepta que un imán permanente corresponde a un cuerpo en donde los momentos magnéticos de los electrones están orientados en paralelo, es decir, los espines electrónicos están dirigidos en el mismo sentido. Ello determina la aparición, en el cuerpo imanado, de dos polos, norte y sur, a partir de los cuales se extiende un campo magnético.

Quizá Plinio desconocía que ni siquiera la magnetita de la mejor calidad podía ejercer la fuerza necesaria para hacer levitar una escultura de hierro. En cualquier caso, este material, manipulado de forma adecuada, aumenta notoriamente su fuerza magnética.

Siguiendo los métodos tradicionales, tomemos un trozo de magnetita que, de forma espontánea, atraiga clips de oficina. Tamicemos sobre ella finas virutas de hierro. Comprobaremos que presenta diversos polos. De ellos, escogeremos, mediante una brújula, dos de signo opuesto y situados aproximadamente uno en las antípodas del otro. Con cuidado e intentando que la pieza no se caliente, tallaremos, mediante una sierra de diamante, dos facetas paralelas orientadas perpendicularmente a un eje imaginario que une los dos polos seleccionados.

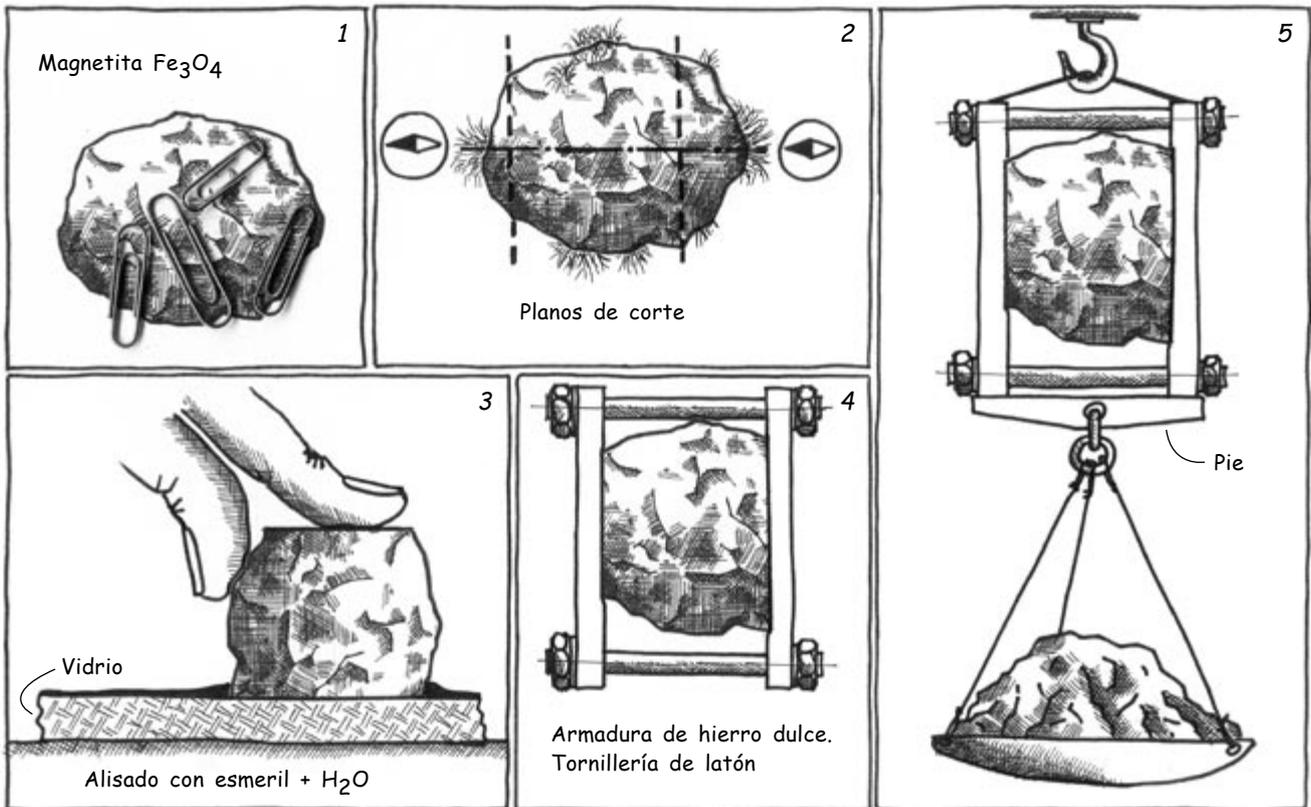
Alisaremos las facetas por abrasión sobre un cristal con la interposición de algún abrasivo en grano ligeramente húmedo. Construiremos luego un emparedado situando la magnetita entre dos placas de hierro dulce (libre de impurezas), que atornillaremos mediante espigas y tuercas de latón. Estas zapatas polares en contacto íntimo con la magnetita canalizan el campo magnético y lo concentran en sus extremos, donde instalaremos una tercera pieza, antiguamente llamada pie, que cerrará éste.

Estas manipulaciones se realizan con el fin de reforzar el campo magnético del mineral y observar así la aparición de un curioso fenómeno muy conocido. Si al pie que une las zapatas polares acoplamos un recipiente liviano y a éste añadimos peso de forma progresiva (mediante perdigones, por ejemplo), incrementaremos poco a poco el campo magnético de la magnetita hasta que ésta soportará masas equiparables a la suya. (Este fenómeno se observa en artefactos históricos de gran tamaño, como el expuesto en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid o el del Museo de Historia de la Ciencia de Florencia.)

La imanación no aumenta de forma gradual, sino a saltos. Ello se debe a que en los imanes naturales la



Levitador magnético construido con dos imanes de neodimio y frenos magnéticos de cobre.



estructura cristalina es muy heterogénea: presenta dominios magnéticos (o recintos de Weiss) que se alinean “de golpe” con el campo magnético principal. Este aumento brusco del campo se conoce como efecto Barkhausen. En la magnetita resulta notable precisamente por el considerable tamaño de los recintos de Weiss iniciales.

Como hemos dicho, el lento incremento de peso que soporta nuestro imán conduce a un aumento en la intensidad de su campo magnético, que, a su vez, induce una mejor orientación de los recintos. Esta realimentación prosigue hasta alcanzar un límite en que el peso del pie, junto con el de la masa que soporta, resulta excesivo; por ello, cae y destruye el campo magnético. Verificamos entonces que la magnetita no soporta tanto peso, por lo

que debemos reiniciar el proceso. En sus *Elementos de Física Experimental*, de 1841, Claude Pouillet lo advierte con claridad: “con tiempo y precaución se llegará a nutrirle de nuevo y a devolverle su primer vigor”.

¿A qué responde este comportamiento? En primer lugar, el aumento a saltos de la imanación puede deberse no sólo a un campo inductor de la orientación, sino también a tensiones internas del material (el acero se magnetiza débilmente martilleándolo en frío) y otros factores mecánicos, sino también a fluctuaciones graduales de la temperatura (el acero se magnetiza calentándolo al rojo cereza y dejándolo enfriar a ser posible en posición vertical). En segundo lugar, un imán que soporta un peso en aumento realiza un trabajo que

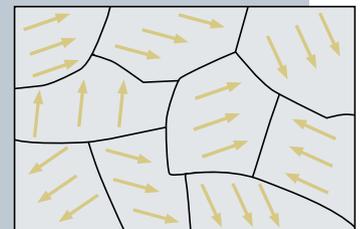
IMANES PERMANENTES

Los imanes permanentes se construyen con materiales ferromagnéticos en los que existen pequeños dominios con la misma orientación de los dipolos magnéticos elementales. Se denominan recintos de Weiss. Su tamaño oscila entre algunos centímetros y pocos milímetros. En su interior los espines de los electrones libres se disponen en paralelo, apuntando todos en el mismo sentido.

En estado no imanado, los recintos adoptan orientaciones desordenadas, de forma que su efecto global es nulo. Están separados por las paredes de Bloch, delgadas zonas de transición de pocas decenas de átomos de espesor. El comportamiento de éstas guarda semejanza con el de la superficie de un líquido, donde la tensión superficial tiende a reducir su área para llevarla a un estado de mayor estabilidad termodinámica.

Cuando se magnetiza un imán, los recintos que forman un ángulo obtuso con la dirección del campo exterior experimentan giros bruscos y de gran amplitud (efecto Barkhausen); en general, se trata de un proceso irreversible. Los recintos que forman un ángulo agudo con el campo exterior, en cambio, giran sólo unos pocos grados; cuando éste cesa, pueden volver a su posición inicial.

Dominios magnéticos en un material ferromagnético. En cada uno de ellos, los momentos magnéticos de los electrones se orientan en paralelo.



requiere cierta energía. Recordemos que un imán con todos los dominios alineados es termodinámicamente más estable que otro con una distribución contraria. A expensas de la diferencia de energía entre los estados desordenados de los recintos de Weiss se realiza el trabajo de sustentación del peso creciente.

Por fin, cuando el peso cae, la magnetita pierde gran parte de su magnetismo. Ello se debe a las dislocaciones del retículo cristalino: los recintos de Weiss que no se habían alineado ayudan a que otros vuelvan a su posición inicial, una vez ha cesado el trabajo de sustentación.

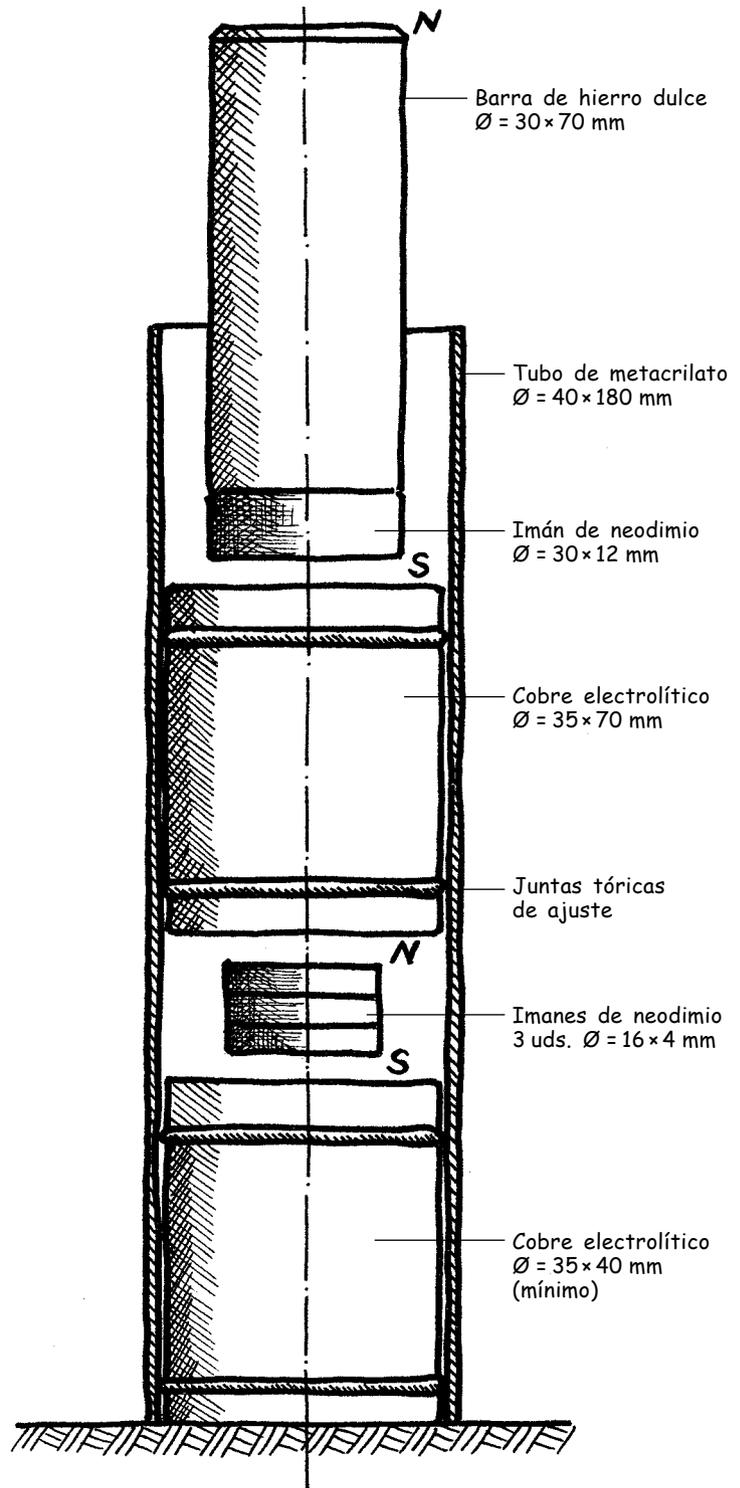
En la actualidad disponemos de imanes cerámicos con campos magnéticos de intensidad miles de veces superior al de la magnetita natural. La fabricación por sinterizado permite ajustar con precisión el tamaño de los dominios magnéticos y los tratamientos térmicos. Merced al conocimiento de los ciclos de imanación, se obtienen materiales que permiten hacer realidad, en parte, el sueño de Arsinoe.

Con mi colaborador Steve Gennrich, del Exploratorium de San Francisco, hemos construido un levitador magnético de gran simplicidad técnica donde es el propio experimentador quien aporta el control y la energía necesarios para el experimento. El prototipo forma parte del proyecto de museo del cobre *La Farga Lacambra*. Se ha desarrollado merced a la colaboración de Joaquim Pla, M.^a Àngels Crusellas y Miquel Caballeria, de la Universidad de Vich, y a la financiación de la entidad promotora de dicho museo, la Corporació Metal·lúrgica Catalana, S.L. En esencia, consiste en dos imanes de neodimio, uno superior ligeramente mayor que el inferior. Las fuerzas de atracción que operan entre polos opuestos se encargan de que el imán inferior sea atraído por el de arriba, ascienda y empiece a flotar en el aire.

Para facilitar la manipulación, utilizamos dos frenos magnéticos. Constan éstos de sendos discos de cobre, donde los imanes de neodimio, gracias a su potente campo magnético, inducen corrientes eléctricas con campos magnéticos asociados de sentido opuesto al del campo inductor. Se trata de las corrientes eléctricas de Foucault. Se perciben con facilidad cuando se mueve un imán cerámico sobre un conductor de espesor suficiente. Así, tomando el imán con sus dedos, el experimentador notará una fuerte resistencia al avance; un tacto viscoso. Ello se debe a que, según la regla de Lenz, el campo magnético propio de estas corrientes se halla orientado de tal forma, que se opone al movimiento del campo que las induce.

Las dimensiones de los discos de cobre deben determinarse empíricamente, sobre todo el que se encuentra entre los dos imanes. Se exige que sea delgado para que el imán superior atraiga al inferior. Al disco de la base se le da, como mínimo, el mismo espesor que al anterior.

Determinaremos luego el espacio entre los elementos de cobre donde el imán inferior levitará. Para ello introduciremos entre éstos pequeñas columnas de material no magnético (*no se muestran en la ilustración*) con una altura similar al diámetro del imán levitante. Por fin, añadiremos al imán superior una barra de hierro dulce, que alejará el polo superior de la zona de experimentación, facilitando además su asimiento.



Llegados a este punto, iniciaremos el experimento situando los imanes en su posición, con los polos opuestos enfrentados. Acercaremos desde arriba y lentamente el imán superior; observaremos que el inferior empieza a elevarse. La práctica permite mantenerlo durante tiempo casi estático entre los discos de cobre. Para ello debe moverse ligeramente el imán superior. En ausencia de movimiento las corrientes de Foucault desaparecen, quedando el sistema sin el freno magnético que, mediante la ralentización de los movimientos, facilita el control fino de la distancia entre los imanes.