

ATENE0 DE MADRID

CONFERENCIAS SOBRE ELECTRICIDAD POR EL SEÑOR MADARIAGA,
PROFESOR DE DICHA ASIGNATURA EN LA ESCUELA DE MINAS (1).

Expuestas las teorías de Weber y Maxwell acerca del magnetismo, expuso el Sr. Madariaga el modo de determinar con el *magnetómetro* el momento magnético de un imán y la componente horizontal del campo terrestre.

A este fin hagamos oscilar horizontalmente en el campo terrestre la barra cuyo momento magnético queremos determinar; la duración de una oscilación completa para una amplitud pequeña es

$$t = 2 \sqrt{\frac{\Omega}{AH}}, [1]$$

siendo:

Ω el momento de inercia de la barra.

A su momento magnético.

H la componente horizontal del campo terrestre.

Establezcamos otra relación entre A y H para poder determinar dichas magnitudes; esta relación se obtiene colocando la barra en cuestión sobre un plano horizontal normalmente al meridiano magnético y suspendiendo, á una cierta distancia en la prolongación de su eje, una aguja imanada de pequeñas dimensiones.

Llamemos:

$2l$ la longitud de la barra imanada.

$2l'$ la de la aguja.

d la distancia del centro del imán al de la aguja.

m y m' los valores absolutos de las masas magnéticas en los polos del imán y de la aguja.

Expresando que la aguja queda en equilibrio bajo la acción de la barra en estudio y del campo terrestre, se obtiene la ecuación aproximada

$$\frac{A}{H} \left(1 + 2 \frac{l^2}{d^2} \right) = \frac{d' \lg \alpha}{2},$$

siendo α el ángulo que forma la aguja con la dirección del campo.

Como generalmente no se conoce la longitud $2l$ del imán, se elimina este elemento repitiendo la experiencia para una nueva separación d' de la aguja; llamando α' el nuevo ángulo de desviación de la aguja y eliminando l entre esta ecuación y la anteriormente escrita, se obtiene:

$$\frac{A}{H} = \frac{d' \lg \alpha - d \lg \alpha'}{2(d^2 - d'^2)},$$

ecuación que, unida á la [1], nos permiten determinar A y H.

El aparato que lleva la aguja imanada móvil recibe el nombre de *magnetómetro*; permite comparar los momentos de dos imanes ó los efectos de un mismo imán colocado en diversas posiciones.

Trató luego el Sr. Madariaga de la imantación por influencia, fenómeno en virtud del cual las moléculas de una barra de hierro, colocada en un campo magnético, se orientan en dirección de las líneas de fuerza.

Además del hierro, poseen esta propiedad el acero, la

fundición, el níquel, cobalto, etc., designándose estos cuerpos con la denominación de *ferromagnéticos*, es decir, magnéticos á semejanza del hierro.

Hay otros cuerpos, tales como el bismuto, azufre, etcétera, que imanándose en un campo magnético se orientan en sentido ecuatorial, es decir, normalmente á las líneas de fuerza, recibiendo el nombre de *diamagnéticos*.

El problema de la imanación por influencia queda reducido á determinar el rendimiento que obtenemos en esta imanación, ó sea la relación entre la intensidad de imanación I del cuerpo y la H del campo en que está colocado

$$x = \frac{I}{H}.$$

Esta relación recibe el nombre de *coeficiente de imanación* ó *susceptibilidad magnética*.

Considerando un cuerpo isótropo, cuyo coeficiente de imantación es constante en todas direcciones, colocado en un campo magnético uniforme, evidentemente dicho cuerpo tenderá á tomar una intensidad de imanación constante. Ahora bien; los polos magnéticos inducidos en el cuerpo modifican dicho campo, de suerte que si era uniforme antes de colocado el cuerpo resultará heterogéneo después; de aquí que sea difícil determinar en la mayor parte de los casos el campo resultante, y por tanto la intensidad de imantación en un punto cualquiera del cuerpo. Sin embargo, hay algunas formas de los cuerpos que se prestan á un cálculo fácil.

Suponiendo un cilindro macizo colocado en la dirección del campo y un punto en el interior de este cilindro desde el cual se vean sus bases bajo los ángulos α y α' , la intensidad del campo resultante será:

$$H - 2\pi\sigma[2 - (\cos. \alpha + \cos. \alpha')]$$

y por tanto

$$I = x[H - 2\pi\sigma[2 - (\cos. \alpha + \cos. \alpha')]];$$

se ve, pues, que para obtener el mayor rendimiento posible conviene que α y α' sean pequeños, ó lo que es lo mismo, que el cilindro sea largo; de este modo los dos cosenos suman dos unidades y se anula el término sustractivo de la expresión anterior.

De modo análogo demostraríamos que no son convenientes para imanes las formas laminar ni esférica.

En el caso de un anillo circular ó *toro*, sometido á fuerzas magnetizantes constantes en magnitud y dirigidas en cada punto del toro tangencialmente al paralelo que por él pasa, éste adquiere una imanación constante *sin polos libres*, puesto que los filetes de moléculas magnéticas forman cadenas circulares cerradas. El campo primitivo no se habrá modificado por la presencia del toro bajo el punto de vista de su distribución y la intensidad de imanación se expresará por $I = xH$.

Vemos, pues, que esta es la forma mejor para los núcleos de los carretes, pues proporciona el mayor rendimiento.

La imantación por influencia puede estudiarse bajo otro punto de vista, para lo cual consideremos un campo uniforme cuya intensidad H sabemos representa el flujo de fuerza por unidad de superficie equipotencial.

Colocando en la dirección de este campo un cilindro

(1) Véase el número. 10.

indefinido variará la distribución de las líneas de fuerza en el interior de dicho cilindro y por unidad de superficie equipotencial, que son en este caso secciones rectas del cilindro, tendremos un flujo B distinto de H , flujo que se denomina *inducción magnética*.

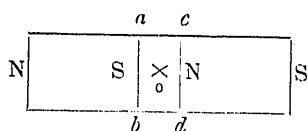
Se llama *coeficiente de permeabilidad magnética* del cilindro la relación

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Haciendo B igual á H resulta $\mu = 1$, lo que indica que el coeficiente de permeabilidad del medio en que se hallaba colocado el cuerpo (que generalmente es el aire) tiene por valor la unidad.

Este fenómeno de la permeabilidad magnética puede referirse al de la permeabilidad hidráulica, en virtud del cual los filetes de agua de una corriente se concentran para atravesar aquellos cuerpos, que ofrecen más facilidad á su paso. Análogamente si en un campo magnético colocamos un trozo de hierro dulce, se ve que las líneas de fuerza se reúnen para atravesar en el mayor número posible dicho fragmento. Esto se explica por la mayor facilidad que tienen sus moléculas sobre la de otros cuerpos para girar y orientarse rápidamente en sentido de las líneas de fuerza.

Los coeficientes μ y χ no son independientes, sino que están ligados por una relación que vamos á establecer.



Si en un cilindro imantado suponemos abierta normalmente á su eje una ventana, resulta que las dos caras ab y cd se cargan por inducción con densidades $-\sigma$ y $+\sigma$ respectivamente.

Sabemos que la intensidad del campo en un punto o del interior del cilindro es la resultante de las acciones que se ejercen sobre la unidad de masa positiva, supuesta concentrada en ese punto.

Las acciones de las caras ab y cd son iguales entre sí, teniendo por valor común $2\pi\sigma = 2\pi I$, pues sabemos que $\sigma = I$.

Además hay que tener en cuenta la acción debida al campo en el interior del cilindro, acción que se suma á las anteriores por ir de Sur á Norte las líneas de fuerza; la resultante de todas estas acciones tendrá por expresión

$$B = H + 4\pi I = H(1 + 4\pi\chi),$$

de donde

$$\mu = 1 + 4\pi\chi.$$

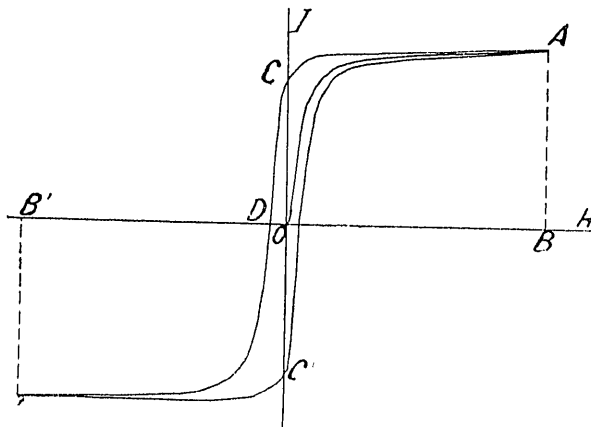
Este modo de tratar la imantación por influencia tiene la ventaja de que B ó μ se pueden determinar por medidas eléctricas y deducir de ellos I ó χ .

Pasemos á estudiar las variaciones de la intensidad de imantación I en función de H .

Imaginemos un carrete de gran longitud, en cuyo centro colocamos la barra objeto del estudio; haciendo que el carrete esté recorrido por una corriente i de intensidad variable, produciremos campos uniformes de intensidades

H variables también; estos valores H veremos más adelante que vienen dados por la expresión $H = 4\pi n i$, siendo n , el número de espiras que por unidad de longitud tiene el carrete.

Por los procedimientos de medida que forman parte de esta asignatura se determinan los valores de B correspondientes á los de H , pudiendo deducir de las fórmulas anteriores los de I que corresponden á éstos; en resumen, para cada valor de H tenemos uno de I y podremos dibujar una curva que tenga por ejes coordenados los H ó I .



Partamos del estado neutro de la barra y demos á H valores menores que una unidad (CGS); la curva que arranca del origen presenta su concavidad hacia el eje de las I , creciendo lentamente los valores de la intensidad de imantación.

A partir de $H = 1$ la curva, después de presentar una inflexión, se eleva rápidamente, aproximándose á una línea recta hasta llegar á valores de H comprendidos entre 5 y 10, para los cuales la curva presenta un codo.

Desde este instante el aumento de la ordenada es cada vez más débil y se llega á un punto en el cual la curva es tangente á una horizontal, que nos representa la continuación de la curva para valores crecientes de H ; la imantación correspondiente á este punto (representada por la ordenada de la horizontal) es la máxima que podemos obtener en la barra y nos representa el estado de *saturación* de la misma.

Esta curva nos demuestra que la susceptibilidad

$$\chi = \frac{I}{H}$$

es muy pequeña al principio; después crece rápidamente con H y alcanza para el hierro valores que oscilan entre 9 y 200, pudiendo tomarse 100 como término medio; para valores mayores de H decrece progresivamente hasta anularse, pues hemos dicho que la curva es tangente á la horizontal. Supongamos que la barra una vez alcanzado el punto A que corresponde á la saturación, se somete á fuerzas magnetizantes que decrecen desde oB á cero. La imantación no vuelve á pasar por los estados intermedios anteriores, sino que la curva que la representa queda por encima de la obtenida anteriormente, cortando al eje I en un punto C tal que oC nos representa el *magnetismo remanente*.

Si ahora hacemos que H cambie de sentido, tomando valores negativos hasta llegar al $oB' = oB$, la I pasará por los valores sucesivos que indica la curva CA' .

Por último; si H vuelve á pasar por los valores com-

prendidos entre B' y B el magnetismo de la barra alcanzará el valor AB, siguiendo la curva A'C'A.

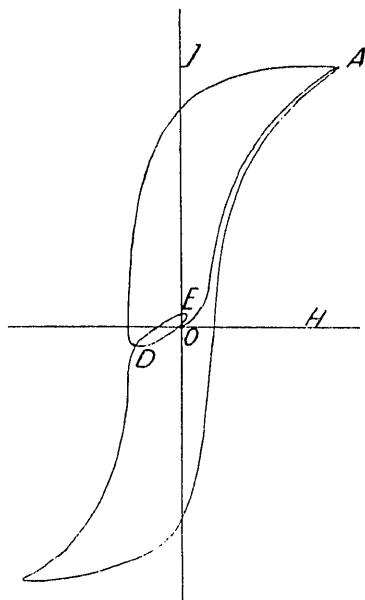
Este ciclo no es el definitivo, pues éste no se alcanza sino después de un cierto número de oscilaciones entre los mismos valores de H.

Vemos, pues, que la imanación de una barra depende no tan sólo de H, sino también de las veces que la hayamos sometido á un campo variable ó sea de su estado magnético anterior de ella.

Durante el período decreciente del campo, los valores de la intensidad de imantación son constantemente mayores que los dados por la curva oA para los mismos valores de H, mientras que durante el período creciente son menores; resulta, por lo tanto, que en esta segunda fase creciente, necesitamos para obtener una cierta intensidad de imantación, un campo más intenso que si partiéramos del estado neutro siguiendo la curva oA; la segunda curva creciente queda, pues, *retrasada* respecto de la oA y este fenómeno, debido á la fuerza coercitiva, ha sido designado por Ewing con el nombre de *histéresis*, palabra derivada del griego y que significa *quedar en retraso*.

Para el hierro dulce la saturación se obtiene para $H = 25$, variando entre 1.200 y 1.300 el valor correspondiente de I. El área encerrada por la curva cíclica representa el trabajo absorbido en la imantación, trabajo que se ha de tratar de disminuir, empleando hierros de buena calidad.

No debe confundirse la *imanación nula* con el *estado neutro* de la barra. Para ver la diferencia entre ambos estados, consideremos la curva cíclica de imantación representada en la figura 2, ó imaginemos un punto tal como el



D, al llegar al cual, si hacemos decrecer el campo hasta cero, la curva de imantación pase por el origen; si ahora damos á H valores positivos, la curva correspondiente queda por encima de la descrita al partir del estado neutro de la barra, y es tal como la oE, resultando para dichas curvas dos tangentes distintas en el punto O, y como sus coeficientes angulares nos representan la susceptibilidad que para imantarse tiene la barra en uno y otro caso, se ve que en el estado nulo de imantación, dicha susceptibilidad es mayor que en el neutro, siendo, por tanto, distintos estos dos estados magnéticos.

En las figuras anteriores se ve que al llegar el campo

en su fase decreciente, al valor cero, la barra conserva una imanación oC que hemos designado con el nombre de magnetismo remanente; siendo necesario para desimantarla, dar al campo valores negativos hasta llegar al oD, representándonos este valor lo que Hopkinson llama *fuerza coercitiva* de la barra.

El área cíclica que nos representa la pérdida por el fenómeno de la histéresis, disminuye con la fuerza coercitiva; de aquí que se deban emplear barras en que esta fuerza esté muy disminuída, lo que se alcanza golpeando ó calentando estas barras.

Recordando la teoría de Weber sobre el magnetismo, expuesta en artículos anteriores, vemos que la fuerza coercitiva mide la resistencia que presentan las moléculas para desorientarse, una vez alcanzada, lo que pudiéramos llamar orientación remanente. Como esta resistencia es debida á los rozamientos de las moléculas en su desorientación, se puede asimilar este fenómeno al análogo entre las moléculas líquidas y designar la fuerza coercitiva con el nombre de *viscosidad magnética*.

El conocimiento del coeficiente de permeabilidad, tiene gran importancia práctica en el cálculo de las máquinas eléctricas con objeto de averiguar el *flujo útil* que atraviesa los inducidos; de aquí que se hayan construido tablas en las que figuran estos valores de μ (coeficiente de permeabilidad) correspondientes á los distintos de B (flujo que atraviesa un cuerpo por unidad de superficie equipotencial).

Hemos visto que la elevación de la temperatura de un cuerpo es una de las causas que hacen se pueda imantar más rápidamente; ahora bien, esta propiedad no es absoluta, pues si elevamos mucho la temperatura de un cilindro de hierro resulta que al llegar próximamente á la del rojo vivo se desimanta completamente, siendo imposible imantarla para temperaturas superiores.

Esta temperatura ha recibido de Hopkinson el nombre de *crítica* y su existencia ha sugerido á Faraday una teoría ingeniosa para explicar el por qué sólo se manifiesta la propiedad magnética en el hierro y sus derivados.

Según este célebre físico, el que no se manifieste el magnetismo en las demás sustancias depende de que su punto *crítico* está muy bajo, estableciendo el principio de que todas las sustancias se imanán á una temperatura conveniente.

En apoyo de esta teoría se pueden citar las experiencias de Hopkinson sobre las aleaciones, las cuales no se imanán á la temperatura ordinaria, pero si se enfrían estas aleaciones generalmente por bajo de 0°, se ha visto que se imanán enérgicamente, no perdiendo esta propiedad aunque después se eleve su temperatura.

Concluyó el Sr. Madariaga sus conferencias sobre el magnetismo enumerando los trabajos verificados en estos últimos años por Weber, Tyndall y otros físicos para explicar el fenómeno ya mencionado del diamagnetismo.

Hoy día se explica por la tendencia que tienen las líneas de fuerza á seguir el camino que les ofrece la menor resistencia; estas sustancias diamagnéticas son *menos* permeables que el aire; de aquí que si colocamos una de ellas, una barra de bismuto ó azufre, por ejemplo, en un campo producido en la atmósfera, se oriente dicha barra de modo á presentar la menor resistencia posible, ó sea de tal modo que su longitud sea perpendicular á dicho campo; de aquí que parezca que dichas sustancias son

repelidas en vez de atraídas por la fuerza magnetizante. Resulta, pues, que las sustancias magnéticas son más permeables que el aire y las diamagnéticas menos.

E. HORSTMANN. A. CASADESÚS.

Alumnos de la clase de electricidad de la Escuela de Caminos.

TUNEL DEL SIMPLÓN

DIVERSOS PROYECTOS PRESENTADOS DESDE 1853
PARA ATRAVESAR EL SIMPLÓN POR MEDIO DE UN FERROCARRIL

En Enero de 1853, unos cuantos capitalistas y constructores franceses obtuvieron del cantón del Vallés y de la Confederación Suiza la concesión de una línea férrea arrancando del lago Lemán, subiendo el valle del Ródano y atravesando los Alpes por el Simplón.

El primer anteproyecto para atravesar el Simplón data del año 1857. Se proponía un túnel de 12.200 m., la misma longitud que el de Mont-Cenis; la entrada se hacía con la altitud de 1.068 m., 200 m. más baja que en Mont-Cenis. El gasto, que se calculaba en 70 millones de francos, prescindiendo de los intereses durante el período de ejecución fijado en 10 años, era excesivo para los recursos de la empresa que se llamaba Compañía de Italia.

Para disminuir los gastos se estudiaron de 1860 á 1863 cuatro proyectos con túneles de 4 á 5 km. de longitud y rampas de 0,030 á 0,050 en las avenidas; pero estos proyectos despreciaban lo que constituye la ventaja principal del paso por el Simplón, ó sea la posibilidad de mantenerse para la entrada á una altitud mucho menor que en Mont-Cenis y en San Gotardo. Estos proyectos no fueron aceptados, y todos los estudios posteriores se refirieron á túneles largos atravesando la base de la montaña, no la cresta.

Desde 1860, Vauthier, Ingeniero de la línea de Italia, inició la idea, hoy aceptada por todos, de atravesar la montaña por su base, por debajo de la cota de 800 metros.

El éxito de la perforación del Mont-Cenis, el más satisfactorio de San Gotardo y los recursos proporcionados por las fuerzas motoras hidráulicas en los trabajos del Arlberg, habían demostrado que la ejecución de los subterráneos largos era prácticamente posible.

Pero al mismo tiempo las obras del Mont-Cenis y sobre todo las de San Gotardo, habían hecho surgir un problema temible. El calor subterráneo en relación con los macizos que insisten sobre el túnel y con la naturaleza de las rocas atravesadas.

En 1878 la Compañía del Simplón hizo estudiar un proyecto completo, teniendo en cuenta las exigencias de una explotación fácil y las condiciones térmicas.

El perfil longitudinal del terreno situado encima del túnel, se comparó con los de Mont-Cenis y San Gotardo, para los cuales se tenían numerosas observaciones y curvas geotérmicas, uniendo los puntos que en el interior del macizo tienen la misma temperatura.

Procediendo de una manera análoga, se construyeron las curvas en el Simplón, y para el trazado en línea recta se llegó á las temperaturas, inadmisibles, de 36° á 39° en el interior del túnel proyectado.

El autor del proyecto propuso quebrar el trazado para

separarlo de las cimas más elevadas de Monte-León; así se alcanzaban temperaturas de 32° á 35°, como en San Gotardo, pero en una longitud mucho mayor. No parece muy acertada esta solución, que para evitar dificultades problemáticas, cae en una real de tanta importancia como es la construcción de un túnel acodado de tanta longitud.

Se pidió, además, á geólogos de Francia, Italia y Suiza un estudio detallado de la naturaleza del terreno.

El resultado de todos estos trabajos, fué un proyecto de túnel acodado, de 19,796 km. de longitud, con cotas de 689 m. en la entrada, 708 en el punto culminante y 627 metros en la salida ya en territorio italiano.

El proyecto comprende el examen de las fuerzas motoras disponibles en las dos vertientes destinadas á mover las máquinas perforadoras y sobre todo á refrescar las paredes de las galerías. En la vertiente italiana se cuenta con una potencia de 8.000 caballos en aguas bajas ordinarias. En la parte Norte, el Ródano sólo puede proporcionar una de 6.000 caballos.

Disponiendo de medios tan poderosos en las dos bocas del túnel se puede emplear la perforadora Brandt, y se asegura la ventilación. El coste total de la obra asciende á 74 millones de francos.

En 1886, los cantones interesados pidieron un informe á los señores siguientes: Polonceau, Ingeniero de la Compañía de Orleans; Doppler, Ingeniero austriaco; W. Huber, Ingeniero de París, y J. Dumur, Ingeniero de Lausanne.

La Comisión adoptó un nuevo trazado, estudiado por Meyer, con el fin de evitar las temperaturas elevadas. La entrada del túnel se fijaba en la cota 820 metros, y la salida á 830 metros, en territorio suizo; la longitud era 16.070 metros.

Los ingenieros mencionados dijeron que se podía admitir un túnel de vía única, obteniéndose así una economía de 10 millones, estimaron el coste en unos 52 millones, é insistieron en las grandes ventajas que proporcionaría un túnel para doble vía, y, sobre todo, más bajo, con una longitud de 20 kilómetros.

Sobre estas bases se entablaron algunas negociaciones; el Consejo federal y los cantones prometieron subvencionar la línea, pero el Gobierno italiano no quiso aceptar un trazado que dejaba la salida del túnel en territorio suizo. Por otra parte, habiendo fracasado algunas combinaciones financieras, se abandonó el proyecto.

En 1893 la Compañía fusionada Jura-Simplón, celebró un contrato con la casa Brandt, Brandau y Compañía, de Hamburgo, para la construcción de un túnel de vía única, y 19.731 metros, que desemboca cerca de Isella, en plena Italia.

Examinado este proyecto por una Comisión formada por Colombo, Ingeniero de Milán; Fox, Ingeniero de Londres, constructor del túnel del Mersey, y Vagner, Ingeniero austriaco, Jefe de sección en el túnel del Arlberg, ha sido aceptado por los Gobiernos italiano y suizo en 1895, y es el que se va á llevar á cabo.

Con el empleo de las perforadoras Brandt, que han dado avances de 5^m,60 en Arlberg, y 7^m,38 en el Cáucaso, en veinticuatro horas de trabajo, se pretende acabar el túnel en menos de seis años. Los contratistas anuncian que, con los poderosos medios para ventilar y refrescar las galerías que van á emplear, la temperatura no pasará de 25°, mientras que llegó á 31° en San Gotardo.