

Medición del fenómeno de magnetostricción del níquel, hierro y cobre por medio de interferometría

Juan C. Rojas V.* and Katherin A. Murcia S.**

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: 3 de octubre de 2024)

El experimento pretende caracterizar el fenómeno de magnetostricción sobre el cobre, hierro y níquel mediante el uso de un interferómetro de Michelson diseñado para este propósito por PHYWE. Siendo así, se empezó por caracterizar la relación entre la corriente incidente sobre una bobina cilíndrica y la intensidad del campo magnético en su componente axial, obteniéndose la relación lineal $B(I) = (26.64 \pm 0.01)I + (0.25 \pm 0.02)$, con B en militeslas. A continuación se calculó, por medio de interferometría, el cambio en la longitud de varillas de estos materiales al ser sometidas a campos magnéticos, $\Delta\ell$. Así pues, observando la relación entre el coeficiente de deformación elástica, $\frac{\Delta\ell}{\ell}$, y B para cada material, se determinó que: el cobre no es un metal ferromagnético, pues no presenta cambio alguno bajo magnetización; el hierro es un metal ferromagnético y empieza por expandirse antes de contraerse bajo un incremento en la intensidad de campos magnéticos; el níquel es un metal ferromagnético que se contrae bajo incrementos en la intensidad de campos magnéticos, presentando, además, histéresis de magnetización.

I. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

El fenómeno de magnetostricción fue reportado por primera vez por James Prescott Joule en 1842. Éste observó, al hacer pasarle un campo magnético, cómo una barra de hierro se expandía en la dirección del campo a medida que la fuerza del mismo se reducía. Joule pudo demostrar también que este efecto en el cambio de longitud del material también conllevaba un cambio en el volumen de la barra, siendo este muchísimo más bajo a comparación al de longitud [1][2]. Trabajos posteriores mostraron también la existencia de otros efectos provocados por la magnetostricción como el efecto Wiedemann, que consiste en la torsión del material al cual se le aplica el campo magnético; y el efecto Villari, también conocido como el efecto de magnetostricción inverso, es el cambio de susceptibilidad a la magnetización en función del estrés mecánico aplicado al material [3]. El efecto de magnetostricción es, entonces, el cambio en la longitud $\Delta\ell$ de un pieza metálica de longitud ℓ en la dirección en que se aplica un campo magnético externo, una ilustración puede verse en la figura 1. Un tratamiento termodinámico del fenómeno permite encontrar que hay una relación directa entre la fuerza del campo magnético y el coeficiente de deformación elástica ($\frac{\Delta\ell}{\ell}$) [4]. En la actualidad, este fenómeno es utilizado en la industria del sonido en la fabricación de transductores y en el campo de la medicina con el uso de actuadores [3]. Dada la diminuta escala en la que $\Delta\ell$ se presenta, es necesario utilizar la técnica de interferometría, la cual permitiría medir cambios de longitud en la escala de nanómetros [5] por el método de conteo de franjas, el

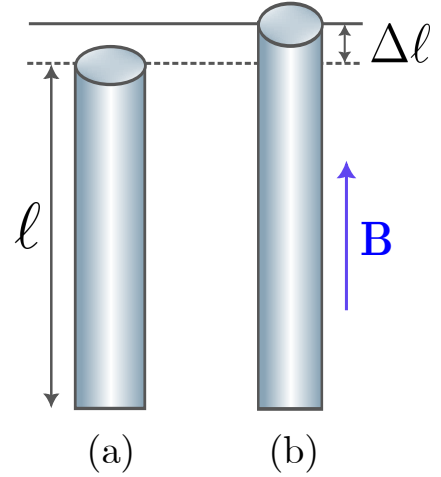


Figura 1. En la figura se muestra: (a) una barra de un metal ferromagnético con longitud inicial ℓ sin presencia de un campo magnético y (b) la misma barra metálica en un campo magnético \mathbf{B} . Esta última presenta un cambio en su longitud $\Delta\ell$ en la misma dirección del campo aplicado.

cual tiene en cuenta la relación

$$\Delta\ell = \frac{N\lambda}{2}. \quad (1)$$

Donde N es el número de franjas que pasan por un punto fijo a medida que $\Delta\ell$ cambia y λ es la longitud de onda del láser usado.

La forma usual con la que se inducen los campos magnético sobre las barras de metal es por medio de bobinas por las que se hace fluir corriente, la intensidad del campo está dada por la expresión

$$H_m = \frac{NI}{\sqrt{4r^2 + \ell_s^2}} \quad (2)$$

* Correo institucional: jc.rojasv1@uniandes.edu.co

** Correo institucional: k.murcia@uniandes.edu.co

donde N es el número de vueltas, I es la corriente que fluye en la bobina, r es el radio de la bobina y ℓ_s es el largo de la bobina.

En este documento se pretende observar el fenómeno de magnetostricción en los metales de níquel, hierro y cobre por medio de la técnica de interferometría con un interferómetro de Michelson y, además, observar el fenómeno de histéresis magnética en el níquel.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

El montaje utilizado para el desarrollo del experimento consiste de un interferómetro de Michelson montado sobre una mesa óptica, como se muestra en la figura 2. En esta configuración se emplea una varilla de hierro, cobre o níquel al interior de una bobina cilíndrica (C) en la que se hace circular corriente. De esta manera, se procuran las condiciones necesarias para la producción del fenómeno de magnetostricción, pues se aplica un campo magnético sobre las varillas, que puede resultar en su elongación o contracción. Así pues, es posible caracterizar este fenómeno en virtud de que sus efectos, a su vez, resultan en el cambio del camino de luz del láser, pues generan el desplazamiento de uno de los espejos del montaje (M_3), y, consecuentemente, pueden ser medidos al observar los cambios en el patrón de interferencia observado, siguiendo la ecuación (1).

En concreto, el procedimiento desarrollado con las barras de hierro y cobre consistió de variar el campo magnético al interior de la bobina haciendo un barrido de corriente entre 0.15 A y 3.5 A, contando, a su vez, el número de mínimos que pasan por un punto fijo en el patrón de interferencia original, N . Para la barra de níquel el barrido se realizó desde 0.15 A hasta 3.5 A y viceversa.

Adicionalmente, se empleó un teslámetro para medir la intensidad del campo magnético al interior de la bobina en su componente axial para valores de corriente entre -3.5 A y 3.5 A. Lo anterior se realizó con objetivo de caracterizar la relación entre ambas cantidades.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Caracterización del campo magnético en función de la corriente

El posible cambio de longitud de las barras es consecuencia de aplicar sobre ellas un campo magnético generado al hacer pasar corriente por la bobina. Siendo así, y teniendo en cuenta que los datos tomados corresponden a valores de corriente, es necesario, entonces, caracterizar la intensidad del campo magnético axial en

la bobina para cualquier valor de corriente. Con esto en mente, se midió la intensidad del campo magnético en el componente axial de la bobina para diferentes valores de corriente, y se realizó un ajuste lineal sobre estos datos, como se muestra en la figura 3.

Así pues, la expresión obtenida para la intensidad del campo magnético en el componente axial de la bobina, en [mT], en función de la corriente que circula por ella se calculó como

$$B(I) = (26.64 \pm 0.01)I + (0.25 \pm 0.02). \quad (3)$$

B. Caracterización del fenómeno de magnetostricción para el cobre, hierro y níquel

Con objetivo de caracterizar el fenómeno de magnetostricción para el cobre, hierro y níquel, se calculó, por medio de interferometría, el cambio de longitud de barras de estos materiales en función del campo magnético al que ellas fueron sometidas. A continuación, se graficó el coeficiente de deformación de cada material, $\frac{\Delta \ell}{\ell}$, en función de la intensidad del campo magnético ejercido sobre el mismo, como se muestra en la figura 4.

Así pues, se caracteriza el comportamiento del cobre, hierro y níquel bajo la acción de campos magnéticos siguiendo la figura 4: el coeficiente de deformación elástica del cobre permanece en cero a medida la intensidad del campo magnético incrementa, por lo que el cobre no presenta ningún efecto de magnetostricción, lo que es esperado dado que este material no es ferromagnético; el coeficiente de deformación elástica del hierro empieza siendo proporcional a la intensidad del campo magnético y termina siendo inversamente proporcional al mismo, lo que concuerda con el comportamiento reportado en la literatura; el coeficiente de deformación elástica del níquel es inversamente proporcional a la intensidad del campo magnético y al hacer un barrido cíclico en esta última cantidad, se obtiene una curva de histéresis, como es esperado siguiendo la literatura [1].

IV. CONCLUSIONES

En el experimento realizado sobre magnetostricción expuesto anteriormente, se pudieron medir los comportamientos del coeficiente de deformación elástica $\frac{\Delta \ell}{\ell}$ para los metales de cobre, hierro y níquel. Para el cobre se encontró que éste no presenta magnetostricción, lo cual es esperado pues no es un metal ferromagnético, i.e. no tiende a alinear sus momentos magnéticos con campos magnéticos externos; para el hierro se observó el fenómeno de magnetostricción, algo esperado a sus propiedades magnéticas, su coeficiente de deformación elástico aumentaba hasta cierto punto para luego decrecer a medida que el campo aumentaba, resultado

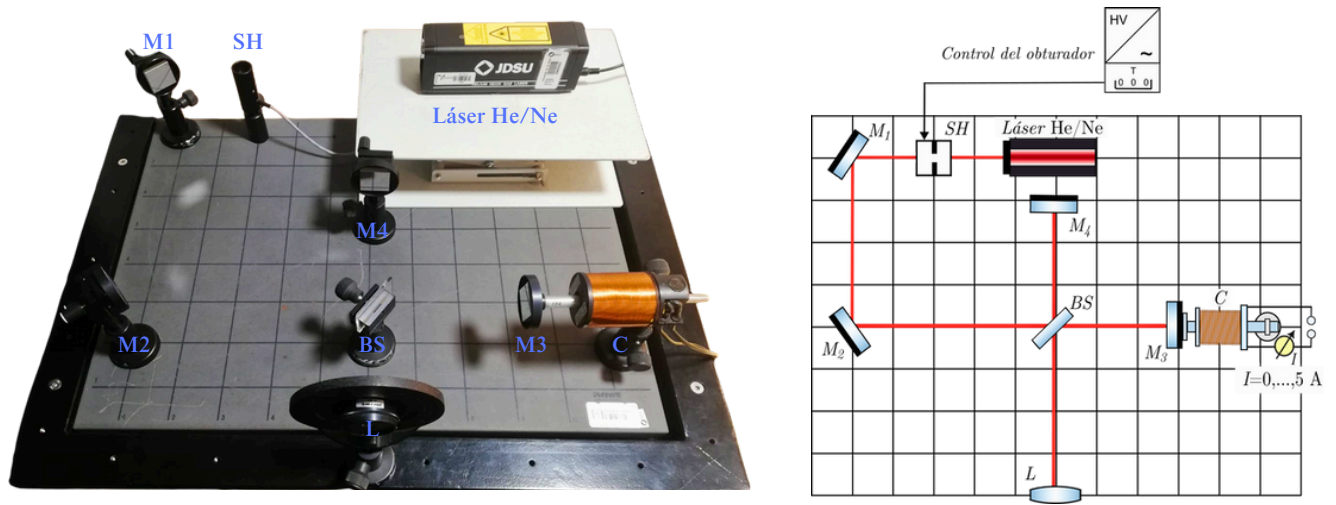


Figura 2. Interferómetro de Michelson montado sobre una mesa óptica, con C una bobina cilíndrica en la que se hace circular corriente, induciendo un campo magnético en su interior, en donde se encuentra una varilla de hierro, cobre o níquel que se puede expandir o contraer por el efecto de magnetostricción. La posible expansión y/o contracción de la varilla resultará en el desplazamiento del espejo M_3 , cambiando el camino del haz de luz y el patrón de interferencia observado. Se incluye una fotografía del montaje junto con el diagrama esquemático correspondiente.

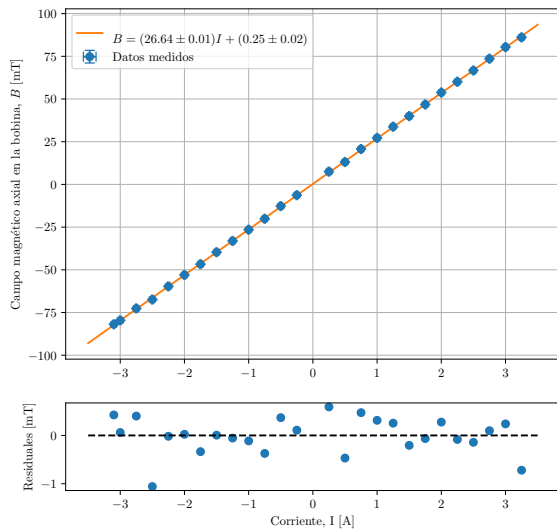


Figura 3. Gráfico de la intensidad del campo magnético en la componente axial de la bobina en función de la corriente que circula a través de ella. Se observa un comportamiento lineal entre ambas cantidades, como se espera siguiendo a la ecuación (2). La regresión lineal, calculada con el método de mínimos cuadrados ponderados, se ajusta bien a los datos, pues los residuales fluctúan de manera aleatoria alrededor del cero.

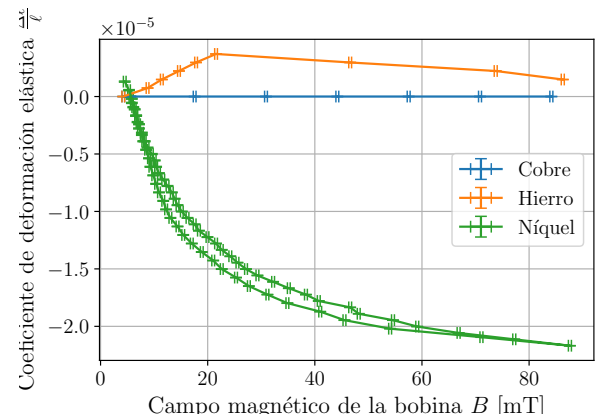


Figura 4. Gráfico de los datos obtenidos para el coeficientes de deformación elástica para barras de cobre, hierro y níquel en función de la intensidad del campo magnético al que son sometidas. Se puede ver que el cobre no presenta magnetostricción, a diferencia del hierro y el níquel. Lo anterior es esperado debido a que el cobre es el único de estos metales que no es ferromagnético. El hierro empieza a contraerse en vez de expandirse a partir de cierto punto a medida que incrementa la intensidad del campo magnético. El níquel se contrae a medida que la intensidad del campo magnético incrementa, y presenta una curva de histéresis al realizar un barrido cíclico en la intensidad del campo magnético.

de la saturación de magnetización en el hierro; y para el níquel, además de presentar magnetostricción, se encuentra este material se expande a medida que el campo magnético aumenta cuando su dirección es negativa, y

se contrae a medida que el campo magnético aumenta

cuando su dirección es positiva. La curva observada es consistente con una curva de histéresis.

-
- [1] E. W. Lee, Reports on progress in physics **18**, 184 (1955).
 - [2] R. d. A. Martins, Notes and Records **76**, 117 (2022).
 - [3] N. Ekreem, A. G. Olabi, T. Prescott, A. Rafferty, and M. Hashmi, Journal of Materials Processing Technology **191**, 96 (2007).
 - [4] U. de los Andes, *Magnetostricción* (2023).
 - [5] E. Hecht, A. Zajac, *et al.*, *Óptica* (Massachusetts: Fondo Educativo Interamericano,).

APÉNDICE DE CÁLCULO DE ERRORES

A. Incertidumbre de los instrumentos

La incertidumbre de la longitud de onda del láser se tomó como el último dígito reportado por el fabricante para esta cantidad, correspondiente a $\sigma_\lambda = 1$ nm. Para las longitudes medidas con el calibrador se empleó la incertidumbre como el valor reportado por el fabricante de $\sigma_L = 0.05$ mm. La incertidumbre de las corrientes medidas con el multímetro se tomó como el último dígito reportado por el instrumento, correspondiente a $\sigma_I = 0.01$ A. La incertidumbre en las magnitudes de campos magnéticos medidos con el teslámetro se tomó como el último dígito reportado por el instrumento, correspondiente a $\sigma_B = 0.1$ mT.

B. Propagación de error para ajustes

El ajuste lineal en la figura 3 se realizó implementado el método analítico de mínimos cuadrados ponderados

en phyton, y las incertidumbres en la pendiente y el intercepto se calcularon siguiendo el método.

C. Propagación de error para valores calculados

Se hicieron los cálculos de propagación de error siguiendo la ecuación

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (4)$$

donde las variables de la función $f(x_0, \dots, x_n)$ tienen incertidumbre σ_{x_i}

Así, para la ecuación (1) se tiene

$$\sigma_{\Delta\ell} = \sqrt{\left(\frac{N\sigma_\lambda}{2} \right)^2}.$$

Por otro lado, para los coeficientes de deformación elástica, se tiene

(1) se tiene

$$\sigma_{\frac{\Delta\ell}{\ell}} = \frac{1}{\ell} \sqrt{\sigma_{\Delta\ell}^2 + \frac{(\Delta\ell)^2 \sigma_\ell^2}{\ell^2}}.$$