

Mediciones del parámetro de Rayleigh para la descripción de la histéresis ferromagnética en el rango de pequeñas excitaciones

Gustavo Sánchez, Javier Etcheverry, Alberto Nicolini
Tenaris REDE AR
Campana, Buenos Aires, Argentina,
jetcheverry@tenaris.com

Resumen

En el rango de pequeñas excitaciones, correspondiente al movimiento reversible de las paredes de los dominios magnéticos, el comportamiento histerético de los aceros se puede describir aproximadamente por el modelo de Rayleigh. La gran ventaja de este modelo es que tiene solamente dos parámetros: la permeabilidad inicial, y el coeficiente de alinealidad. En este trabajo se plantea una técnica experimental de medición de ambos basada en la bien conocida técnica de ACPD (Alternate Current Potential Drop). La técnica consiste en medir, utilizando una fuente de corriente sinusoidal de frecuencia ajustable y relativamente alta corriente la caída de potencial entre dos contactos a lo largo de una probeta cilíndrica. La configuración global es la correspondiente a la técnica de cuatro puntas: la corriente se inyecta por los extremos de la barra, y los contactos de medición se disponen en la sección central. Se realizan mediciones a baja corriente, para determinar la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética inicial, y luego mediciones a alta corriente para llegar a excitar el comportamiento histerético dentro del rango de validez de la aproximación de Rayleigh. Se utiliza un modelo matemático unidimensional para calcular la caída de tensión correspondiente a cada parámetro de Rayleigh, y se invierte numéricamente para obtener el correspondiente a cada muestra en particular.

1. Introducción

Dentro de la gran complejidad que caracteriza normalmente al comportamiento histerético de los aceros, existe un rango de excitación ‘moderada’ donde el comportamiento frente a excursiones simétricas se describe con relativa facilidad mediante el modelo de Rayleigh ⁽¹⁻³⁾. Si bien este modelo no está demasiado bien definido para excursiones de campo arbitrarias ⁽³⁾, parece apropiado para estudiar el régimen ligeramente no-lineal en problemas de corrientes inducidas con excitaciones sinusoidales. En este sentido, sería deseable disponer de una técnica experimental simple que permitiera determinar dichos parámetros para un acero dado.

En este trabajo se plantea un esquema experimental para ello, extendiendo la conocida técnica de ACPD y se muestran resultados preliminares que indican que la determinación de los parámetros es factible.

El modelo de Rayleigh, descrito a menudo mediante las ecuaciones que describen un ciclo simétrico alrededor del origen entre los puntos +/- (H_m, B_m) :

$$B_m = \mu_{ini} H_m + v H_m^2$$

El parámetro μ_{ini} describe la permeabilidad inicial, y v es el parámetro de Rayleigh. Esta relación expresa un vínculo entre los valores de B y H del vértice de este tipo de ciclos simétricos de pequeña amplitud, correspondiente a una permeabilidad $\mu_{ini} + v H_m$. De acuerdo al modelo de Rayleigh los arcos superior e inferior que conectan dichos vértices son parabólicos y pueden escribirse como:

$$B = (\mu_{ini} + v H_m) H_m \frac{v}{2} (H^2 - H_m^2)$$

En un trabajo previo se mostró cómo es posible medir adecuadamente la permeabilidad inicial y la conductividad eléctrica de una probeta de acero mediante la técnica de ACPD ⁽⁴⁾. El experimento consiste en aplicar corrientes sinusoidales de varias frecuencias y pequeña intensidad (para obtener una respuesta lineal) a una barra cilíndrica del acero de interés, y detectar la caída de tensión entre dos contactos intermedios (técnica de cuatro puntas). En lo que sigue se mostrará cómo esta técnica puede extenderse al rango ligeramente no lineal, y determinar también el coeficiente de Rayleigh.

2. Método experimental

El método consiste en aplicar una corriente alterna de frecuencia variable a una muestra cilíndrica de 3 mm de radio y 100 mm de largo, mientras se mide la caída de potencial entre dos puntos de la muestra ubicados a una separación conocida, tal como se hizo en un trabajo anterior ⁽⁴⁾. Los distintos armónicos de la caída de potencial se midieron con un amplificador lock-in SR820, y la corriente se obtuvo un amplificador de corriente Kepco ML20/20 controlado por el oscilador interno del lock-in. La intensidad del campo magnético en la superficie de una barra por la que circula una corriente total I es igual a $I/(2\pi r)$ donde r es el radio de la barra. Para cilindros de 3 mm de radio como los utilizados, y corrientes del orden de los 10 A, se obtienen valores de H superficial del orden de 500 A/m, posiblemente ya fuera del rango de Rayleigh para muchos aceros. Es importante medir la corriente aplicada para ver que tome los valores deseados, por un lado, y para verificar que no presente demasiadas distorsiones (introducidas por el amplificador de corriente, por ejemplo). En el experimento se midió utilizando un derivador de corriente (*shunt*).

En el caso del trabajo mencionado ⁽⁴⁾, la tensión medida resultaba una función armónica de la misma frecuencia que la excitación. En el caso histerético que nos ocupa esto ya no es cierto, y se tienen (a corrientes suficientemente altas) armónicos superiores de la frecuencia de excitación. El problema que resta analizar es cómo recuperar el parámetro de Rayleigh a partir de este tipo de datos. El camino propuesto es el siguiente. Primero se hace una medición a baja corriente, en el régimen lineal, y se determinan la permeabilidad inicial y la conductividad eléctrica por el método anterior ⁽⁴⁾. A continuación, se hace una medición a corriente suficientemente intensa, y se determina el parámetro de Rayleigh de modo que las amplitudes de la tercera armónica medida y la calculada sean iguales. Para una mayor robustez, se puede hacer el procedimiento simultáneamente para varias frecuencias. Para calcular los armónicos superiores correspondientes a la corriente aplicada para el modelo de Rayleigh se resuelven numéricamente las ecuaciones de Maxwell en la aproximación de corrientes inducidas

para un problema unidimensional (barra infinitamente larga). Se utiliza como corriente de excitación el valor medido para la misma, a las frecuencias correspondientes, y se minimiza la suma de las discrepancias cuadráticas entre los módulos del tercer armónico de Fourier calculado y experimental.

3. Resultados y discusión

Se aplicó la técnica aquí descrita a una probeta cilíndrica de 3mm de radio y 100 mm de longitud, para corrientes 1.4 A, 2.8 A, 5.6 A y 13.9 A (que corresponden aproximadamente a 75 A/m, 150 A/m, 300 A/m y 750 A/m), para 200 frecuencias entre 20 Hz y 3 kHz. Sin embargo, parece más apropiado utilizar frecuencias para las cuales el espesor de penetración sea del orden del radio, y por lo tanto limitaremos el análisis a frecuencias inferiores a aproximadamente 150 Hz. La Figura 1 muestra el crecimiento de la amplitud del tercer armónico de la señal registrada (separación entre electrodos 50 mm) con la corriente, para varias frecuencias. Es evidente el rápido crecimiento en el rango del centenar de A/m, así como una relativa independencia con la frecuencia. No fue posible medir con el set-up experimental a corrientes más bajas, porque la relación entre la primera armónica y la tercera se hace cada vez más desfavorable. El valor del campo coercitivo para este acero, medido mediante un histeresígrafo DC, es de aproximadamente 420 A/m. De este modo, se espera que el punto a 700 A/m en la figura 1 esté ya bien fuera del rango de validez del modelo de Rayleigh.

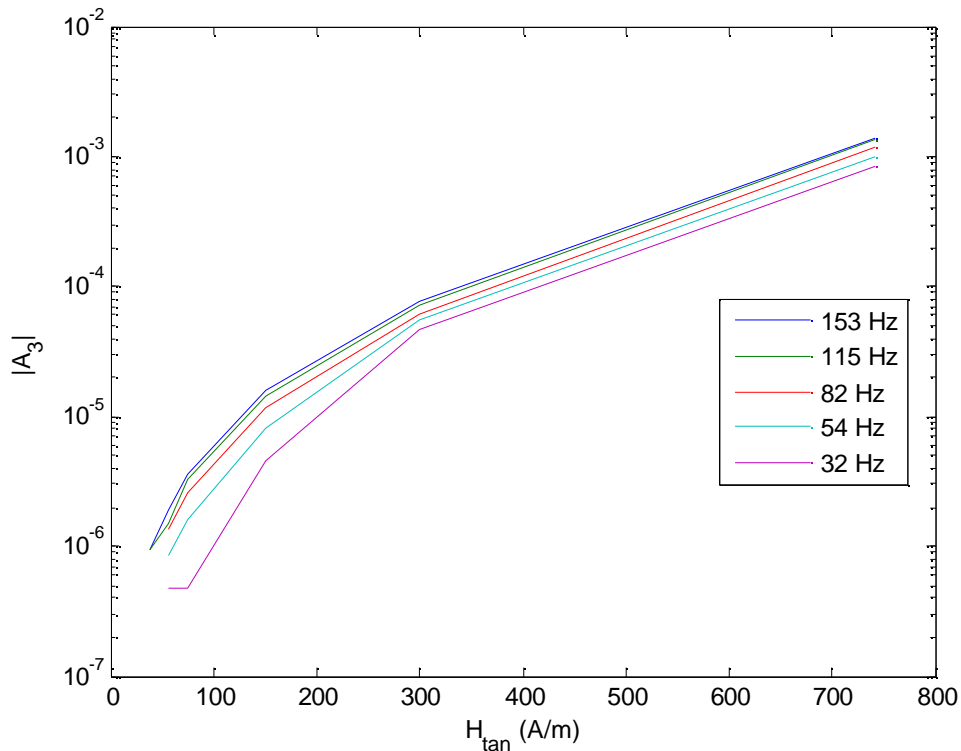


Figura 1: Amplitud del tercer armónico de la tensión medida vs. campo tangencial en la superficie (proporcional a la corriente). Probeta cilíndrica: acero templado y revenido, 100 mm largo, 3 mm radio, separación entre electrodos 50 mm.

Para cada valor de corriente, y utilizando los valores obtenidos en el rango lineal para la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética inicial (4.9 MS/m y $73 \mu_0$, respectivamente) se determinó el coeficiente de Rayleigh que mejor predice (en el sentido de la suma de los errores cuadráticos) el módulo observado de la tercer armónica para todas las frecuencias de interés. El ajuste en general es muy bueno, y los valores obtenidos en función de la corriente se exhiben en la Figura 2.

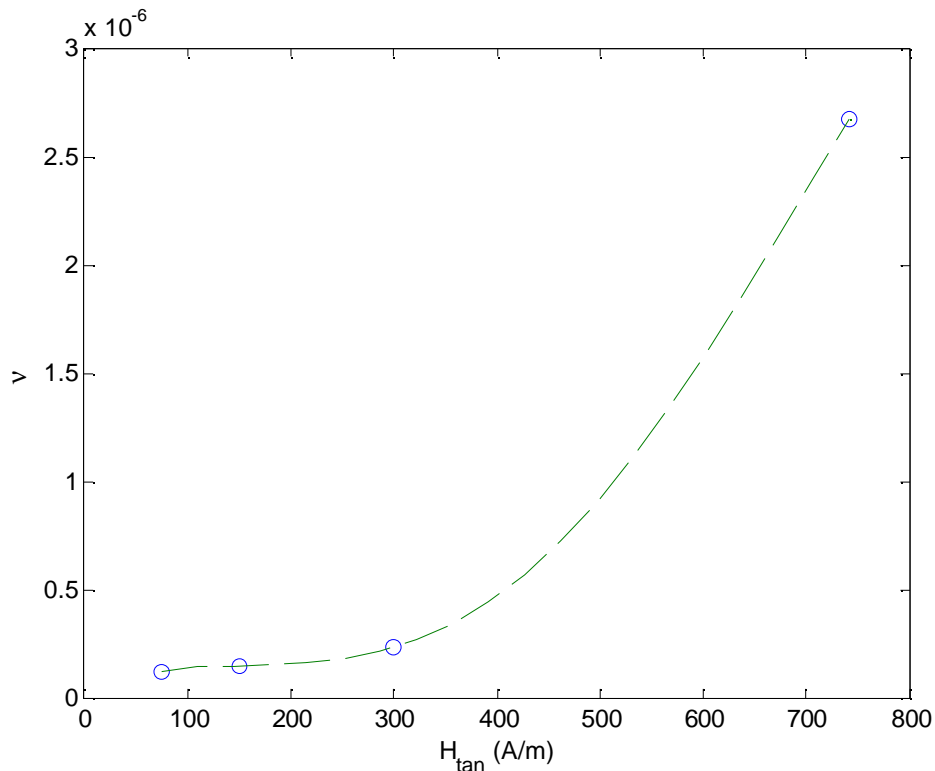


Figura 2. Coeficiente de Rayleigh obtenido ajustando el módulo del tercer armónico para todas las frecuencias de la Figura 1, y cada corriente. La línea de trazos no posee ningún significado, más allá de ayudar a guiar la mirada.

Se observa que hay un rango de intensidad de campo magnético aplicado donde el parámetro de Rayleigh determinado se mantiene aproximadamente constante, cercano a 0.15×10^{-6} . A medida que el campo tangencial se acerca al valor del campo coercitivo, el parámetro de Rayleigh determinado con este método crece rápidamente (señalando el fin de la validez de dicho modelo para excitaciones grandes). Una observación relevante es que no hay diferencias significativas en los valores obtenidos para el parámetro de Rayleigh cuando se utiliza una sola frecuencia.

4. Conclusiones

Se ha propuesto e implementado con éxito una técnica simple de medición del parámetro de Rayleigh, consistente en la medición de los armónicos superiores de la caída de tensión en una probeta cilíndrica al hacer pasar una corriente armónica de intensidad apropiada. Resta realizar una verificación cuantitativa comparando con otras técnicas de determinación.

Referencias

1. Lord Rayleigh, 'The behavior of Iron and Steel under the Operation of Feeble Magnetic Forces,' *Philos. Mag.*, **23**, 225–245, 1887.
2. W. B. Ellwood, 'Magnetic Hysteresis at Low Flux Densities,' *Physics* **6**, 215–226, 1935.
3. Yu. F. Ponomarev, 'On the Rayleigh law of Magnetization: A new mathematical model of hysteresis loops', *The Physics of Metals and Metallography*, Vol 104, No5, 469-477, 2007.
4. G. Sánchez, J. Etcheverry, N. Bonadeo. 'Experimental determination of the electric conductivity and magnetic permeability of different steels and its application to the prevention of steel mixings in a pipe mill'. *Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation*, Vol 28B, pág. 1291-1294.