

Inspección de tubos de acero por flujo magnético disperso: relevancia de las corrientes inducidas

Daniel Ziella, Javier Etcheverry, Gustavo Sánchez, Fernando Núñez, Esteban Sota,
Alberto Nicolini
Tenaris REDE AR
Campana, Buenos Aires, Argentina,
jetcheverry@tenaris.com

Resumen

La técnica de flujo magnético disperso (FMD) es ampliamente utilizada en el control no destructivo de tubos de acero y se basa en la naturaleza ferromagnética de los mismos.

La amplitud de la señal registrada depende de muchos factores, entre ellos las propiedades electromagnéticas del acero en cuestión, las dimensiones del tubo inspeccionado, el diseño del circuito magnético, el tipo y disposición de los sensores, la velocidad relativa entre el tubo y el equipo, etc. Por esta razón, las distintas normas que legislan sobre el tema exigen la utilización de patrones con características similares a las del material que se va a inspeccionar.

En este trabajo se estudia la dependencia del campo magnético en la zona de inspección con la corriente de magnetización, el espesor de pared y las velocidades de rotación y traslación.

1. Introducción

La calibración del instrumental para inspección por FMD se realiza habitualmente con un tubo patrón de características similares a las del material a inspeccionar, al cual se le realizan discontinuidades estandarizadas conforme al tipo de control requerido. Utilizar un tubo patrón de exactamente el mismo acero, dimensiones y tratamiento térmico que el lote de tubos a ser controlados garantiza que las condiciones de calibración se repiten luego en la inspección. Esto es una condición indispensable para la certificación de los controles realizados.

En el caso de inspección de material tubular en un fabricante de tubos a escala mundial, la gran cantidad de productos distintos (geometría, composición química y tratamiento térmico) hace que el parque total de tubos patrón necesarios sea tan grande que su gestión se hace completamente impráctica. Una comprensión más acabada del fenómeno de FMD y de sus parámetros rectores permitiría conocer cuáles son las tolerancias admisibles en las características (geométricas y electromagnéticas) de los patrones, de manera tal de asegurar la calidad de la inspección con un lote más reducido (y por lo tanto más fácilmente manejable) de tubos de calibración.

La técnica de FMD consiste en la detección de la perturbación en el campo magnético debida a la presencia de defectos. Históricamente se consideró que (además de la

geometría) el principal determinante de la amplitud de la señal observada eran las propiedades magnéticas del material. Sin embargo, pruebas tanto numéricas como experimentales sugieren una incidencia significativa del fenómeno de apantallamiento magnético por corrientes inducidas.

Si bien hay una vasta literatura en la que se analiza la señal expulsada por un defecto en condiciones estáticas ⁽¹⁻⁵⁾, esta es mucho más escasa en el caso de que el defecto se esté moviendo ⁽⁶⁻⁸⁾. Esto se debe a que normalmente el movimiento relativo requiere de una instrumentación experimental mucho más compleja, y en el caso de estudios numéricos, de una estrategia normalmente costosa para manejar el cambio de la geometría. En este trabajo se eligió simplificar conceptualmente el problema y considerar cuál sería el campo magnético tangencial presente en las superficies interior y exterior del tubo, teniendo en cuenta el movimiento del mismo, en ausencia de defecto. La intensidad de este campo (que a igual excitación depende del apantallamiento producido por las corrientes inducidas) determina la amplitud de la señal observada por los equipos de FMD.

En lo que sigue se describe el modelado numérico del campo magnético en los casos típicos de detección de defectos longitudinales y transversales utilizando el paquete de AC/DC de COMSOL Multiphysics ⁽⁹⁾ (sección 2) y se discuten los resultados obtenidos (sección 3).

2. Modelado de la técnica de flujo magnético disperso

2.1 Modelado del campo en los equipos de inspección longitudinal y transversal

Para estudiar el método de inspección por FMD se modelaron tubos de 177.8mm de diámetro exterior y espesores 10 mm y 13 mm, de un acero típico de conductividad de 5×10^6 S/m y cuya curva de magnetización se muestra en la figura 1. Se estudiaron modelos que representan equipos de detección de defectos transversales y longitudinales. El primero consiste en dos bobinas concéntricas con el tubo, de 1000 vueltas cada una, más un conjunto de piezas polares y yugo que sirven para conducir el campo, y se supone con simetría de rotación alrededor del eje del tubo. El segundo consiste de un yugo representado por un anillo circular con dos bobinas de 1000 vueltas cada una, con núcleo, dispuestas en oposición en su interior. El campo es conducido hasta el tubo por dos piezas polares, de radio de curvatura adaptado al del mismo.

En ambos casos se realizaron las siguientes simplificaciones:

- se utilizó la simetría aproximada para reducir la dimensión del problema
- se consideró para el tubo un acero no lineal pero sin histéresis,
- se consideró el problema estacionario (con velocidad),

En las figuras 2 y 3 se muestra la distribución de campo obtenida para los equipos de detección de defectos longitudinales y transversales, respectivamente, y una excitación y una velocidad relativa dadas. La información más importante, dentro del marco conceptual mencionado, es la componente del campo magnético tangencial a las paredes interior y exterior del tubo en la posición y dirección apropiadas en cada caso

(componente z en $z=0$ para defectos transversales, y componente angular en $x=0$ para inspección de defectos longitudinales).

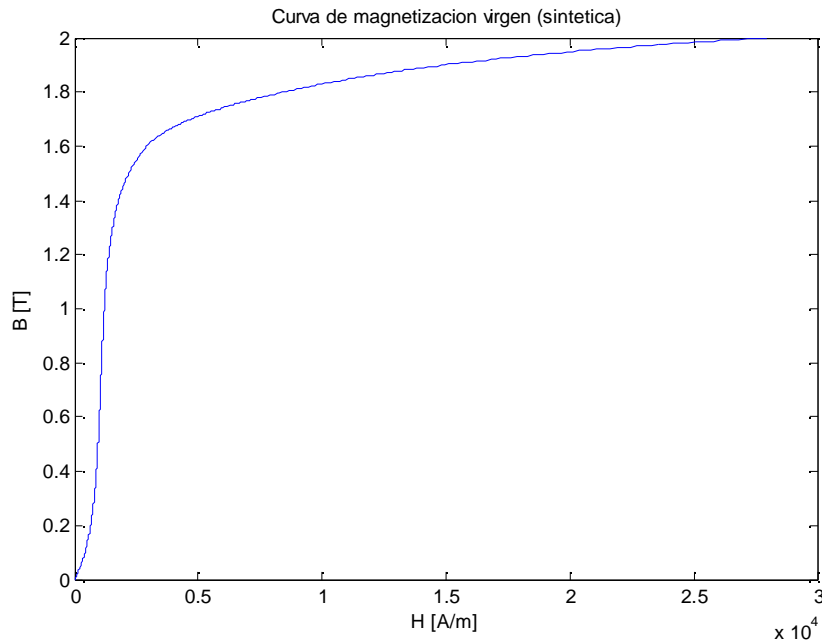


Figura 1. Curva de magnetización virgen para el acero considerado.

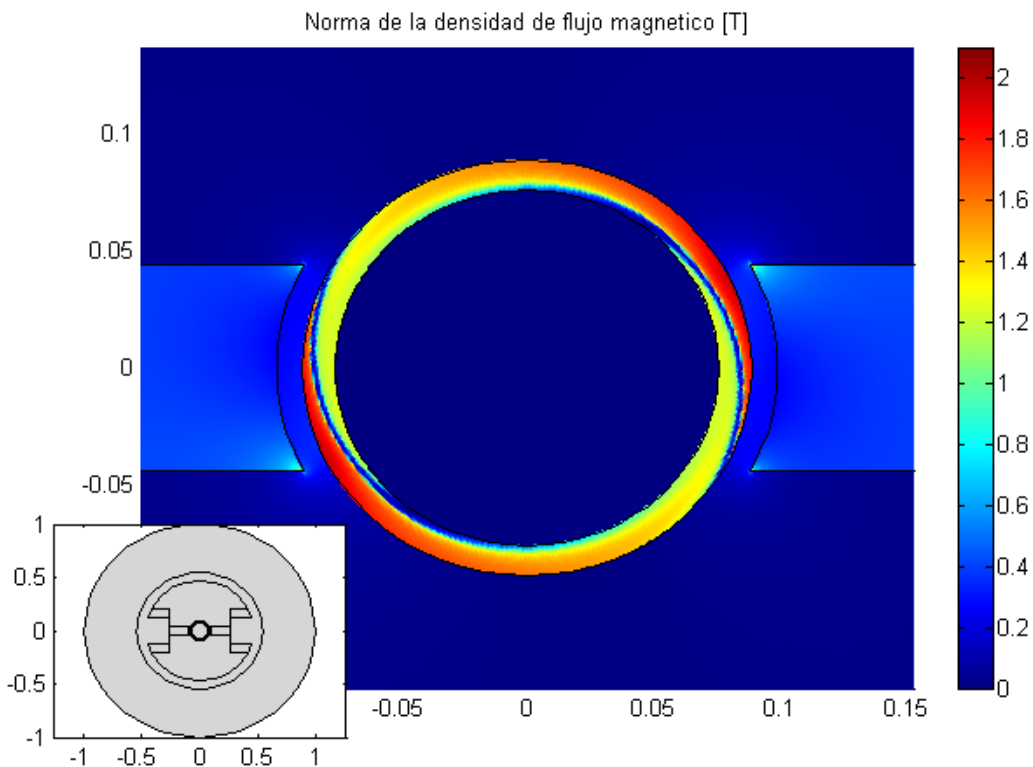


Figura 2: Detalle, cerca del tubo, de la norma de la densidad de flujo magnético para un tubo de acero de 177.8mm de diámetro exterior, 13mm de espesor de pared. Equipo de detección de defectos longitudinales, correspondiente a una rotación relativa a 190rpm en sentido anti-horario y 4 A de corriente por bobina. Inserto: esquema total, con yugo, núcleo, piezas polares, bobinas y tubo.

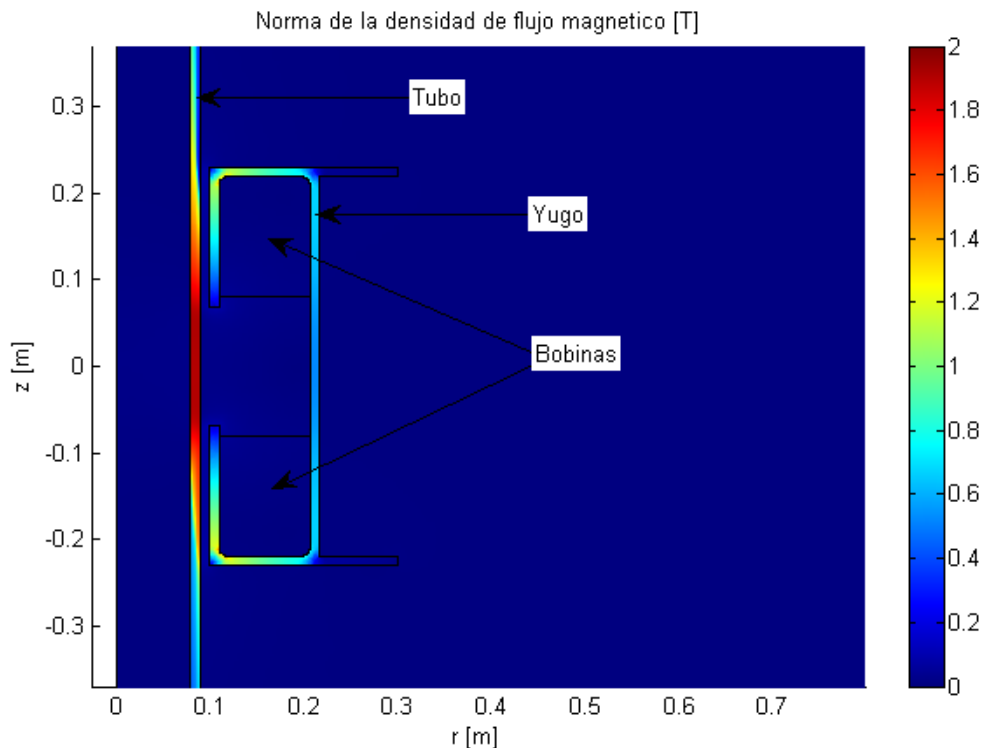


Figura 3: Norma de la densidad de flujo magnético para un tubo de 177.8mm de diámetro exterior y 10mm de espesor de pared, avanzando a 1m/s. Equipo de detección de defectos transversales, 3A por bobina.

2.2 Dependencia de la señal de FMD con el campo aplicado

El campo expulsado hacia el exterior del tubo depende esencialmente de las propiedades del material, de la geometría del defecto, y del campo magnético transversal al mismo que habría en ausencia de defecto. Para modelar esta dependencia de la señal expulsada se realizaron simulaciones 2D de una placa plana de acero de las mismas propiedades electromagnéticas utilizadas anteriormente, 12.09mm de espesor, y una ranura del 10%. La distribución típica de la inducción magnética B se representa en la figura 4, mientras que la señal obtenida para distintos valores de campo magnético transversal se muestra en la figura 5. La principal conclusión es un incremento aproximadamente lineal (en el rango de excitaciones considerado) de la señal con el campo tangencial en la pared de interés del tubo en ausencia de defecto.

3. Resultados y discusión

Se modelaron distintos espesores, corrientes en las bobinas de inducción y velocidades dentro de los rangos de interés para los equipos considerados. En el caso de la inspección de defectos longitudinales, a corriente de excitación fija, se observa que hay un rango de espesores para el cual la intensidad del campo en el interior del tubo disminuye drásticamente conforme se aumenta la velocidad de rotación (figuras 6 y 7), mientras que el campo en el exterior presenta una dependencia mucho más suave o aún inversa. Equivalentemente, a un espesor de pared fijo y una determinada velocidad de

rotación, hay una corriente mínima para la cual el campo penetra hasta el interior del tubo, debajo de la cual la inspección de defectos internos es imposible.

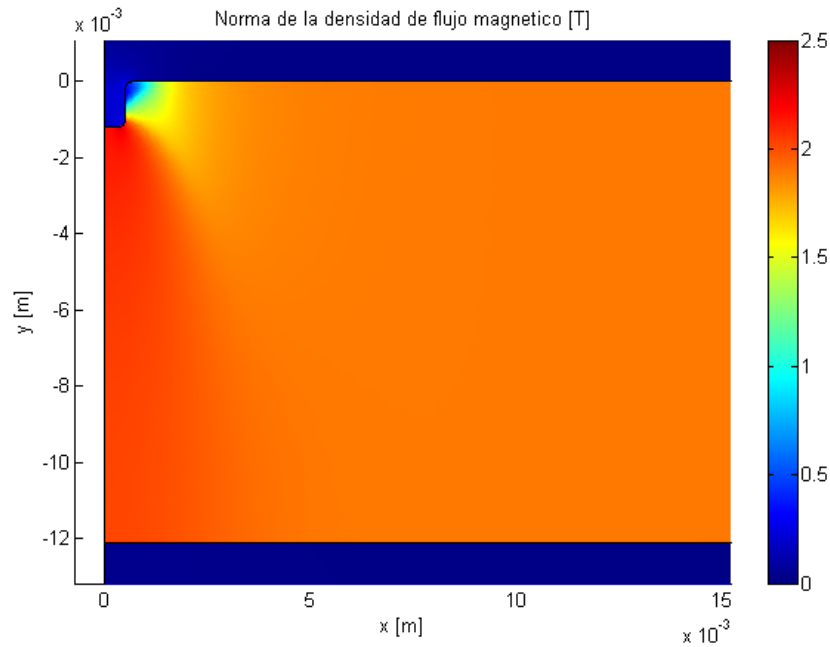


Figura 4: Modelo de placa plana de 12.09mm de espesor con una ranura del 10%. Norma de la densidad de flujo magnético.

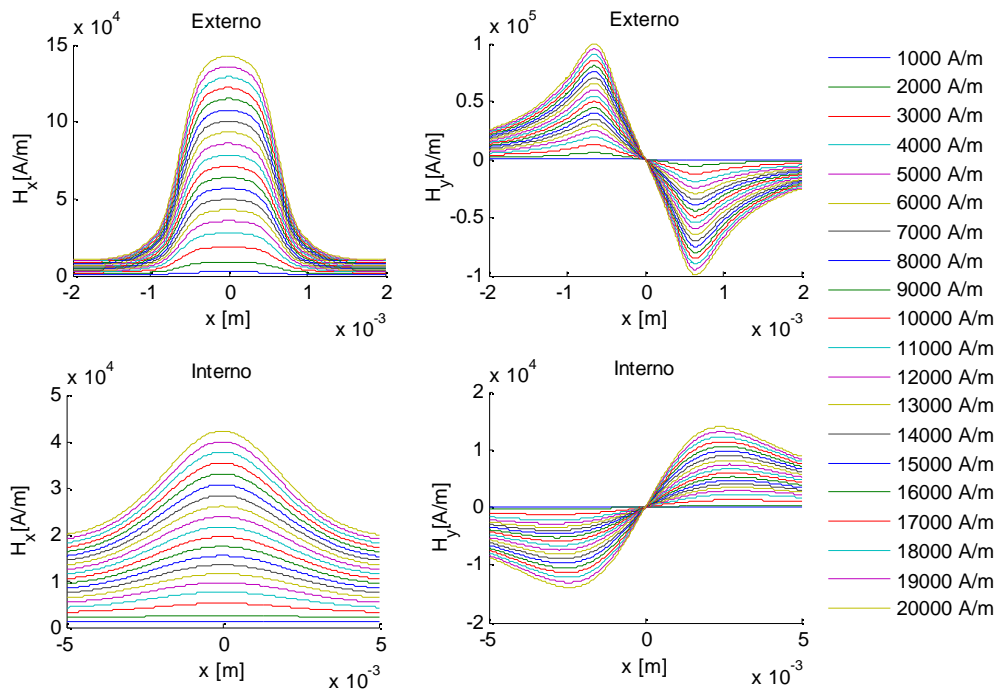


Figura 5: Campo expulsado a 0.2mm de la superficie por una ranura del 10% para distintos valores de campo magnético.

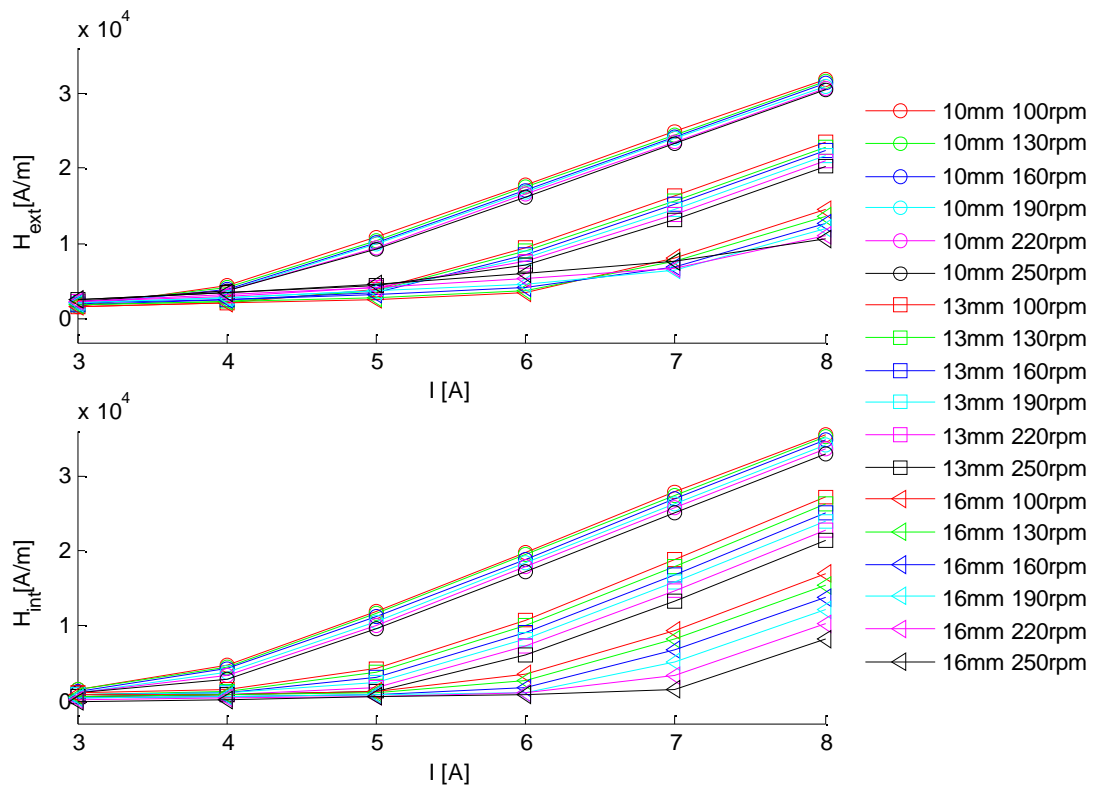


Figura 6: Campo magnético tangencial en las superficies interior y exterior del tubo en inspección longitudinal en función de la corriente suministrada al equipo, para distintos espesores de pared y velocidades de rotación.

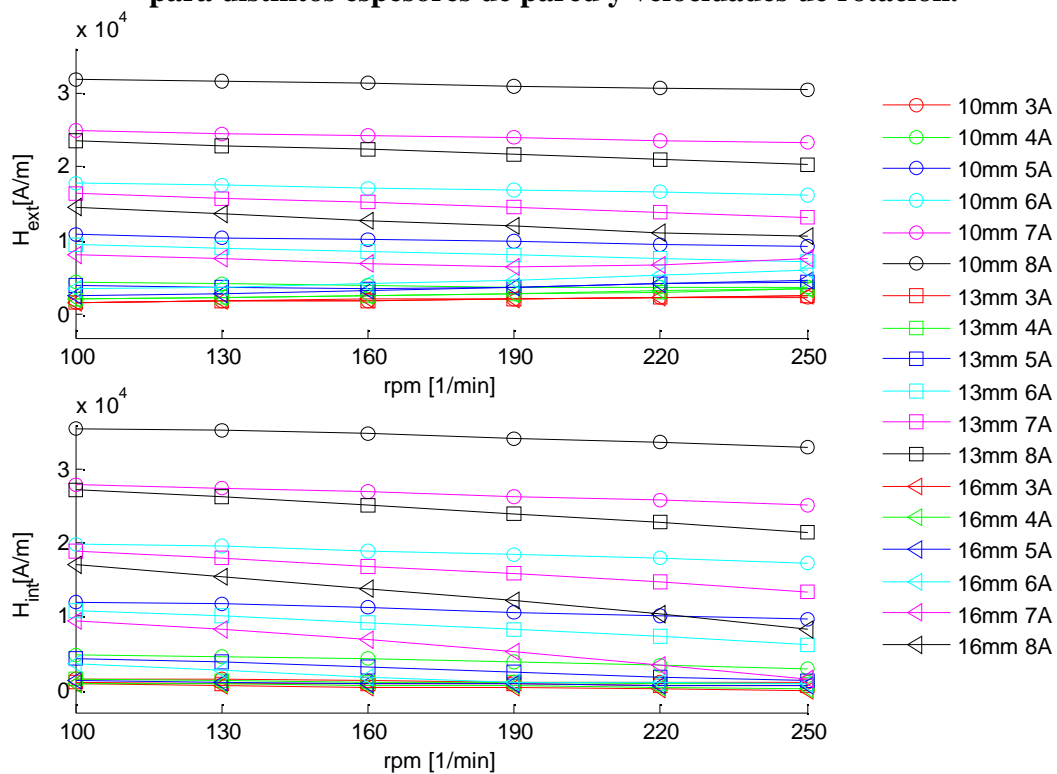


Figura 7: Campo magnético tangencial en las superficies interior y exterior del tubo en inspección longitudinal en función de la velocidad de rotación, para distintos espesores y valores de la corriente aplicada.

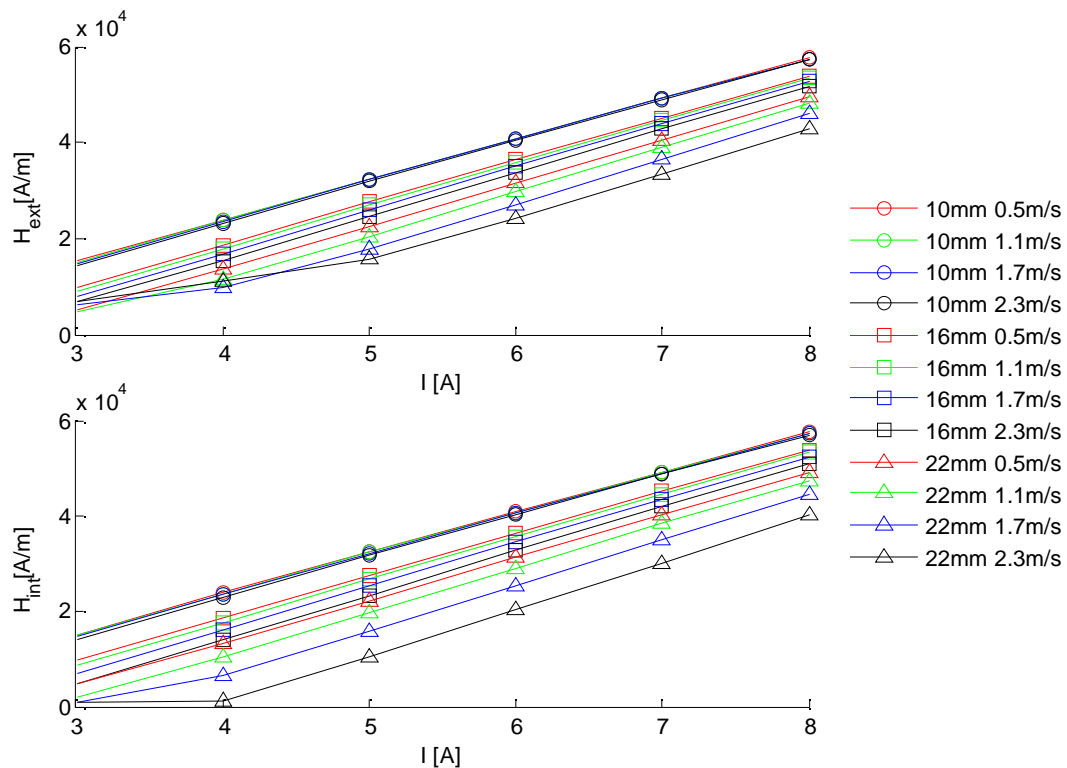


Figura 8: Campo magnético tangencial en las superficies interior y exterior del tubo en inspección longitudinal en función de la corriente suministrada al equipo, para distintos espesores de pared y velocidades de rotación.

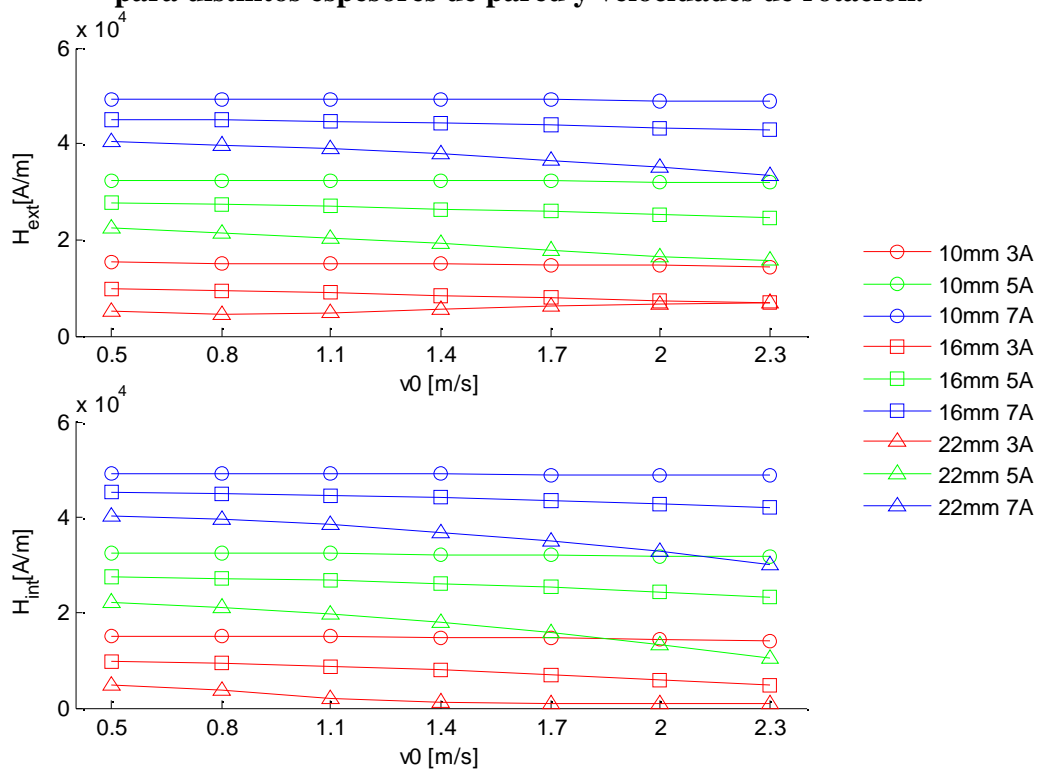


Figura 9: Campo magnético tangencial en las superficies interior y exterior del tubo en inspección longitudinal en función de la velocidad de rotación, para distintos espesores y valores de la corriente aplicada.

La interpretación de este efecto, que coincide con la experiencia de inspección en las líneas con los equipos reales, y que no es predicho por el análisis de FMD en condiciones estáticas, es que para que el campo penetre hasta el interior es indispensable saturar el acero de modo de disminuir su permeabilidad y de este modo disminuir el apantallamiento por las corrientes inducidas. Es, en este sentido, un efecto fuertemente no lineal.

En el caso de la inspección de defectos transversales, en cambio, el efecto es mucho menor, siendo apreciable recién para espesores de pared o velocidades muy superiores al caso anterior (figuras 8 y 9). Si bien los mecanismos básicos en juego son los mismos que en el caso anterior, las velocidades relativas son inferiores, y las dimensiones espaciales mayores (lo que conduce a una disminución de la *frecuencia efectiva* de la señal de excitación magnética, y por lo tanto a un aumento de la penetración del campo).

4. Conclusiones

Los resultados preliminares reportados en este trabajo tienden a resaltar la importancia de las corrientes inducidas en la señal obtenida en los equipos de FMD, en condiciones realistas de inspección. Se necesita un estudio más detallado para verificar cuantitativamente estas conclusiones con pruebas con el equipamiento real, y discernir la relevancia que tienen en cuanto a la selección de patrones.

Referencias

1. F. Martínez, S. Clavel, G. Sánchez, N. Bonadeo, J. I. Etcheverry, "Determinación experimental de las señales de flujo magnético disperso producidas por distintos aceros," en *Proceedings of the VII Congreso Regional de Ensayos no destructivos*, Rosario, Argentina, Nov. 2009.
2. J. I. Etcheverry, M. M. Rodríguez, G. A. Sánchez, "Validación de la simulación numérica de señales de flujo magnético disperso en base a datos experimentales", en *Proceedings of the VII Congreso Regional de Ensayos no destructivos*, Rosario, Argentina, Nov. 2009.
3. J. I. Etcheverry, G. Sánchez, N. Bonadeo, "Magnetic flux leakage: A benchmark problem," *Review of Progress in QNDE*. Volume 30B, editado por D. O. Thompson y D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings, Vol. 1335, pp. 1785-1791 (2011).
4. M. Ruch, J.P.A. Bastos, "Numerical simulation of a magnetic flux leakage benchmark problem", *Insight*, Vol. 46, N°12, Dic. 2004.
5. Fengzhu Ji, Changlong Wang, Shiyu Sun, Weiguo Wang, "Application of 3D FEM in the simulation analysis of MFL signals", *Insight*, Vol 51, N°1, Enero 2009.
6. Shin, Y. K., and Lord, W., "Numerical Modeling of Probe Velocity Effects for Eddy Current and Flux Leakage NDE," *Review of Progress in Quantitative NDE*, editado por D.O. Thompson y D. E. Chimenti, Plenum Press, Vol. 10, 1991, pp. 921-929.

7. J. Etcheverry, A. Pignotti, G. Sánchez y P. Stickar, “MFL Benchmark Problem 2: Laboratory Measurements,” in *Review of Progress in QNDE*, 22B, editado por D. O. Thompson y D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings vol. 615, American Institute of Physics, Melville, NY (2002), pp. 1824-1829.
8. A. Montgomery, P. Wild, P. L. Clapham, “Factors Affecting Magnetic Flux Leakage Inspection of Tailor-Welded Blanks”, *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 17, N° 2, pp. 85-99, Julio 2006.
9. COMSOL Multiphysics. www.comsol.com.