

Análisis de la variación del flujo magnético alrededor de defectos rectangulares y triangulares en placas ferromagnéticas

Analysis of the variation of the magnetic flux around rectangular and triangular defects in ferromagnetic plates

Oscar Luis Peña-Valerio^{1*}, J Jesús Villegas-Saucillo²,
Agustín Leobardo Herrera-May³, Carlos Eduardo Hermida-Blanco⁴

¹Instituto Tecnológico Superior de Alvarado, Escolleras Norte S/N, Col. La Trocha Alvarado, Veracruz, México, C.P. 95250. Correo electrónico: olpenav@itsav.edu.mx

²Instituto Tecnológico de Celaya, México.

³Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana, México.

⁴Instituto Tecnológico Superior de Alvarado, México.

*Autor de correspondencia

Resumen

El presente artículo, enmarcado en el contexto del proyecto *Desarrollo de un sistema experto para el modelado y monitoreo de grietas superficiales (tipo triangular y rectangular) en tuberías ferromagnéticas usando el método de memoria magnética*, presenta el análisis de la variación del flujo magnético alrededor de defectos rectangulares y triangulares en placas ferromagnéticas. Este análisis utiliza una metodología con un estudio exploratorio de modelos numéricos a partir de modelos analíticos existentes. Los modelos numéricos obtenidos servirán como base al compararlos con resultados experimentales para cuantificar la magnitud de los defectos. Los resultados determinaron, a través del análisis de datos, que es posible detectar y clasificar, con un alto grado de certidumbre y alto nivel de confiabilidad, el tamaño y la forma de los defectos superficiales tipo rectangular y triangular mediante los componentes tangencial y normal de esos defectos.

Palabras clave: Método de memoria magnética; defectos geométricos; intensidad del campo magnético

Abstract

This article, framed within the context of the project called *Development of an expert system for the modelling and monitoring of surface cracks (triangular and rectangular type) in ferromagnetic pipes using the magnetic memory method*, presents the analysis of the variation of the magnetic flux around rectangular and triangular defects in ferromagnetic plates. This analysis uses a methodology with an exploratory study of numerical models based on existing analytical models. The obtained numerical models will serve as a basis when comparing them with experimental results to quantify the magnitude of the defects. The results determined, through data analysis, that it is possible to detect and classify the size and shape of rectangular and triangular surface defects with a high degree of certainty and high levels of reliability using the tangential and normal components of these defects.

Keywords: Magnetic memory method; geometric defects; magnetic field strength.

Recibido: 13 de noviembre de 2018

Aceptado: 27 de mayo de 2019

Publicado: 19 de febrero de 2020

Como citar: Peña-Valerio, O. L., Villegas-Saucillo, J. J., Herrera-May, A. L., Hermida-Blanco, C. E. (2020). Análisis de la variación del flujo magnético alrededor de defectos rectangulares y triangulares en placas ferromagnéticas. *Acta Universitaria* 30, e2336. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2020.2336>

Introducción

El monitoreo de grietas superficiales en placas ferromagnéticas es necesario para supervisar el comportamiento de las estructuras y registrar información de los parámetros más representativos para controlar su seguridad y funcionamiento. Para ello se emplean diferentes tipos de sensores en combinación con sus sistemas de procesamiento y transmisión de señales; estos sensores pueden utilizar el método de memoria magnética para detectar grietas e imperfecciones geométricas en estructuras ferromagnéticas. Para esto, es clave el desarrollo de modelos analíticos y numéricos que relacionen la distorsión del campo magnético con el tipo de defecto geométrico en estructuras ferromagnéticas.

Una forma de atacar este problema es lo que propone el presente artículo: utilizar el método de memoria magnética (MMM), desarrollando modelos numéricos que permitan predecir la variación del campo magnético en función de los tipos y dimensiones de los defectos geométricos (rectangular y triangular).

En los últimos años, se han propuesto algunos modelos teóricos para explicar la relación entre los micro-defectos o esfuerzo de concentración y la señal de MMM en defectos geométricos. A continuación, se presenta una breve revisión de la literatura en la aplicación de la técnica de MMM y modelos analíticos de dipolo magnético con respecto a defectos rectangulares y triangulares. Wang, Yao, Deng & Ding (2010a; 2010b) crearon un modelo de línea de concentración de esfuerzos 1D (una dimensión) y un modelo de zona de concentración de esfuerzos (SCZ, por sus siglas en inglés) rectangular 2D (dos dimensiones) para estudiar la influencia de la gama de concentración de esfuerzos y elevadores de valor a la señal de MMM. Yao, Deng & Wang (2012) presentan un análisis de elementos finitos en 2D para el cálculo de las señales de campo magnético de ferromagnetos bajo la deformación plástica. Recientemente, el modelo dipolo-magnético de muesca rectangular fue revisado para ilustrar el impacto de la concentración de esfuerzos en las señales MMM (Huang, Jiang, Yang & Liu, 2014). Suresh & Abudhair (2016) proponen una expresión analítica basada en el modelo de dipolos para estimar la longitud y la profundidad del defecto rectangular en la tubería ferromagnética. Leng, Xing, Zhou & Gao (2013) propusieron un modelo de dipolo magnético lineal para representar la distribución del campo electromagnético de fuga debido a la concentración de tensiones en una placa con muesca en V. Así mismo, Jiancheng, Minqiang, Jianwei & Jianzhong (2010) determinan que las diferentes características de las señales magnéticas en la región elástica-plástica –esto fue explicado por referencia a la muesca en forma de V modelo de dipolo magnético– indican que la técnica de memoria magnética puede identificar el daño macro y el daño temprano, lo cual es de gran importancia para asegurar el funcionamiento seguro del equipo en servicio.

El contenido de este artículo es el siguiente. El concepto y la teoría del MMM se propone en la sección 2. En la sección 3 se presentan los materiales y métodos que corresponden a los fundamentos sobre la formulación del modelo analítico para defectos rectangulares y triangulares, así como el *software* para obtener los modelos numéricos. En la sección 4 se presentan los resultados de varias simulaciones de señales MMM de diferentes defectos geométricos (rectangulares y triangulares) variando las dimensiones de los parámetros geométricos. En la sección 5 se presenta la discusión de los resultados de la relación entre la variación de los parámetros geométricos con respecto a la variación del campo magnético. Por último, en la sección 5 se expresan las principales conclusiones de este trabajo de investigación.

Método de Memoria Magnética

En la actualidad existen varias tecnologías de pruebas no destructivas (NDT, por sus siglas en inglés) magnéticas, entre ellas se encuentran el método de fuga del flujo magnético (MFL, por sus siglas en inglés),

el método del ruido de Barkhausen magnético (MBN, por sus siglas en inglés) y el método de memoria magnética del metal. Las dos primeras técnicas pueden atribuirse a los métodos de prueba magnéticos activos en los que se aplica un fuerte campo magnético, mientras que la técnica de memoria magnética es un método de prueba de campo débil en el que el campo magnético de la tierra se utiliza como el estímulo en lugar de un campo artificial, lo que ha recibido un gran interés en los recientes años (Wang, Gu & Wang, 2012).

Fue a finales de 1990 cuando el ruso Dubov propuso la técnica MMM (Dubov, 2006), que tiene la ventaja potencial en la detección temprana del daño de los componentes ferromagnéticos. Es una técnica de prueba magnético pasivo de medición de la señal de MFL de ferromagnetos bajo el efecto del campo magnético de la tierra y la carga mecánica, que puede ser utilizado directamente en la determinación de zonas de concentración de esfuerzos o micro- y macro-defectos. Por lo tanto, en la vista de microestructuras en ferromagnetos, la señal MMM es causada por la orientación irreversible de dominios magnéticos producidos a partir de la concentración de tensión o zona de daño. Por otra parte, sus ventajas, tales como una fácil operación y ahorro de tiempo, también hacen que el MMM sea muy atractivo en la ingeniería (Pengpeng & Xiaojing, 2015).

Materiales y Métodos

Se consideró una metodología con un estudio exploratorio de modelos numéricos a partir de modelos analíticos existentes. Para ello se analizaron dos artículos clásicos correspondientes a dos defectos, uno rectangular y otro con defecto en V (triangular). Dichos artículos presentan los fundamentos sobre la formulación de modelos analíticos de carga magnética para dichos defectos. A continuación, para el desarrollo de las mediciones del análisis de la variación del flujo magnético alrededor de defectos rectangulares y triangulares en placas ferromagnéticas se utilizaron los siguientes materiales y métodos para lograrlo:

Modelo Analítico para Defecto Geométrico Rectangular

El primer modelo analizado es reportado por Pengpeng & Xiaojing (2015). En este trabajo se considera un modelo de un cuerpo rectangular en 3D (tres dimensiones) con dimensiones de longitud $2a$, $2b$ de anchura y d en la profundidad, aunque para efectos de este artículo solo se considera el modelo B en 2D, como se muestra en la figura 1.

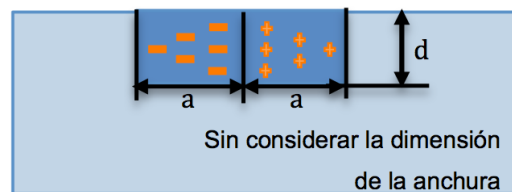


Figura 1. Modelo 2D de defecto rectangular para predicción de la variación del campo magnético.

Fuente: Reimpreso con permiso de Pengpeng & Xiaojing (2015), Copyright@2015, *Nondestructive Testing and Evaluation*.

Para un modelo de superficie de concentración de esfuerzos del modelo anterior, la densidad de carga puede ser expresada como:

$$\rho(m, n) = \begin{cases} (m + a)\rho_1/a + \rho_0, & m \in [-a, 0], n \in [-d, 0] \\ (m - a)\rho_1/a - \rho_0, & m \in (0, a], n \in [-d, 0] \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (1)$$

donde $\rho_1 + \rho_0$ es la densidad máxima de carga magnética de superficie (SMC, por sus siglas en inglés) y ρ_0 es la densidad mínima de SMC en la zona de concentración de esfuerzos, m denota el valor para el eje x en la zona interna de la región de concentración de esfuerzos, suponiendo que $\rho_{max} = \rho_1$ y $\rho_0 = 0$. La distribución general puede proporcionar más opciones. Por ejemplo, $\rho_0 = 0$ significa que la densidad máxima de SMC aparece en $m = 0$, $\rho_1 = 0$ significa que existe una distribución de SMC uniforme en el cuerpo de concentración de esfuerzos y $\rho_0 = -\rho_1$ corresponde al caso que la densidad máxima de SMC ocurre en los bordes $m = \pm a$.

La intensidad del campo magnético H_m se puede calcular como (Pengpeng & Xiaojing, 2015):

$$H_m(r) = \frac{\rho_1}{2\pi} \int_{-a}^0 \int_{-a}^0 \left(\frac{m+a}{a} + \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) \frac{r}{|r|^2} dm dn + \frac{\rho_1}{2\pi} \int_0^a \int_{-a}^0 \left(\frac{m-a}{a} - \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) \frac{r}{|r|^2} dm dn \quad (2)$$

donde $r = [x - m \quad y - n]'$

a = Anchura del defecto sobre el eje x 's,

b = Profundidad del defecto sobre el eje y 's,

m = Punto de ubicación del punto de referencia sobre el eje x 's,

n = Punto de ubicación del punto de referencia sobre el eje y 's,

ρ_0 = Densidad de carga mínima,

ρ_1 = Densidad de carga máxima,

H_m = Intensidad de campo magnético de la magnetización,

r = Vector de posición,

dm = Diferencial del punto de ubicación del punto de referencia sobre el eje x 's y

dn = Diferencial del punto de ubicación del punto de referencia sobre el eje y 's.

Modelo Analítico para Defecto Geométrico Triangular

El segundo modelo analizado es reportado por Leng *et al.* (2013). En este artículo se analiza un defecto de grieta tipo V. Los defectos pueden ser representados por la zona equivalente del modelo de dipolo magnético (Wang *et al.*, 2010a; 2010b), como se muestra en la figura 2.

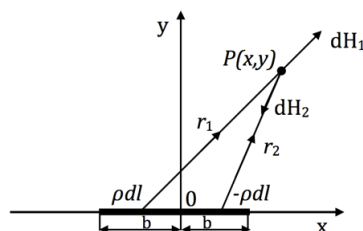


Figura 2. Modelo de dipolos magnéticos de la zona equivalente de concentración de tensiones.

Fuente: Reimpreso con permiso de Leng *et al.* (2013), Copyright@2013, The British Institute of Non-Destructive Testing.

La intensidad de campo magnético total en las direcciones x e y del punto P se puede obtener por (Leng *et al.*, 2013):

$$H_x = \frac{\rho}{2\pi\mu_0} \ln \frac{\sqrt{(x+b)^2 + y^2} \cdot \sqrt{(x-b)^2 + y^2}}{x^2 + y^2} \quad (3)$$

$$H_y = \frac{\rho}{2\pi\mu_0} \left(\arctan \frac{x+b}{y} + \arctan \frac{x-b}{y} - 2\arctan \frac{x}{y} \right) \quad (4)$$

donde:

H_y = Intensidad del campo magnético con componente en el eje y's,

H_x = Intensidad del campo magnético con componente en el eje x's

ρ = Densidad de carga lineal,

μ_0 = Permeabilidad del vacío,

x = Punto de ubicación del punto de referencia sobre el eje x's,

y = Punto de ubicación del punto de referencia sobre el eje y's y

b = Anchura del defecto.

Se puede suponer que la densidad de carga magnética en la zona de concentración de esfuerzos se distribuye linealmente a lo largo de la superficie de la muesca en V, como se muestra en la figura 3.

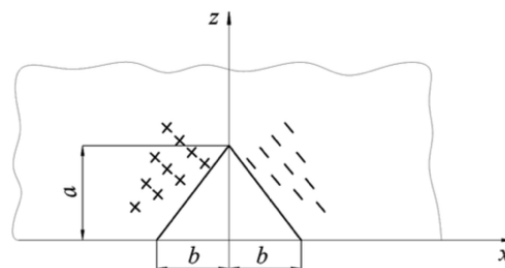


Figura 3. Gráfica del defecto tipo V.

Fuente: Reimpreso con permiso de Leng *et al.* (2013), Copyright@2013, The British Institute of Non-Destructive Testing.

Asumiendo que la anchura y la profundidad de la muesca en V son $2b$ y a , respectivamente, y las densidades de carga magnética aumentan linealmente desde el borde hasta la punta de la muesca en V, la distribución de densidad de carga magnética puede obtenerse de la siguiente manera:

Componente tangencial (H_x):

$$H_x = \int_{-b}^0 dH_{1x} + \int_0^b dH_{2x} \quad (5)$$

$$= \int_{-b}^0 \frac{\rho_{max} \sqrt{(b+x_1)^2 + \left(\frac{a}{b}x_1 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b \left[(x-x_1)^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{b}x_1 - a\right)^2 \right]} (x-x_1) dx_1$$

$$- \int_0^b \frac{\rho_{max} \sqrt{(x_2-b)^2 + \left(-\frac{a}{b}x_2 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b \left[(x-x_2)^2 + y^2 + \left(z + \frac{a}{b}x_2 - a\right)^2 \right]} (x-x_2) dx_2$$

donde:

H_x = Intensidad del campo magnético con componente en el eje x's,

dH_{1x} y dH_{2x} = Diferencial de la componente x del campo magnético,

dx_1 y dx_2 = Diferencial de la componente x's del sensor y

x_1 y x_2 = Posición del sensor.

Componente normal (H_y):

$$H_x = \int_{-b}^0 dH_{1y} + \int_0^b dH_{2y}$$

$$= \int_{-b}^0 \frac{\rho_{max} \sqrt{(b+x_1)^2 + \left(\frac{a}{b}x_1 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b \left[(x-x_1)^2 + y^2 + \left(z - \frac{a}{b}x_1 - a\right)^2 \right]} y dx_1$$

$$- \int_0^b \frac{\rho_{max} \sqrt{(x_2-b)^2 + \left(-\frac{a}{b}x_2 + a\right)^2}}{2\pi\mu_0 b \left[(x-x_2)^2 + y^2 + \left(z + \frac{a}{b}x_2 - a\right)^2 \right]} y dx_2$$

(6)

donde:

H_y = Intensidad del campo magnético con componente en el eje y's,

dH_{1y} y dH_{2y} = Diferencial de la componente y del campo magnético,

dx_1 y dx_2 = Diferencial de la componente x's del sensor,

ρ_{max} = Densidad de carga volumétrica,

a = Profundidad del defecto,

z = Punto de ubicación del punto de referencia sobre el eje z's y

x_1 y x_2 = Posición del sensor.

Software matemático Maple® versión 2015

Se utilizó este *software* para realizar los modelos numéricos a partir de los modelos analíticos presentados en esta sección, a través de los cuales se obtienen las diferentes variaciones de los parámetros geométricos

basados en esos modelos para una muestra con zona de concentración de tensión o un defecto rectangular y triangular. Las variaciones en sus dimensiones fueron de 0.5 mm a 5 mm (500 a 5000 micras) tanto en la anchura como en la profundidad.

Resultados

Primeramente, se muestran las gráficas del análisis que se obtuvieron de la distorsión del campo magnético en defectos rectangulares a través de la ecuación (2), reportada por Pengpeng & Xiaojing (2015).

La figura 4 muestra las distribuciones de $H_{m(x)}$ y $H_{m(y)}$ a lo largo de la dirección de la concentración de tensión, respectivamente, donde la anchura (a) de la zona de concentración de esfuerzos es de 5 mm, la profundidad (d) de 5 mm y el valor de elevación (y) es de 2 mm. Todos los resultados se normalizan con el valor de pico. En la figura 4(a) se observa que $H_{m(x)}$ muestra un pico en la posición máxima de concentración de la tensión denotada por $H_{m(x)-p}$ para la componente tangencial, mientras que en la figura 4(b) $H_{m(y)}$ cambia su polaridad en la posición máxima de concentración de tensión. La anchura entre la cresta de onda y el valle de la componente normal se denomina $\Delta x_{Hm(y)p}$.

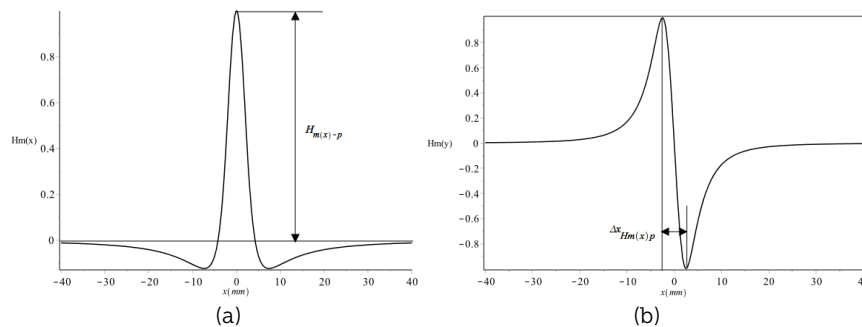


Figura 4. Gráfica de la componente tangencial (a) y componente normal (b) de la intensidad de campo magnético contra la distancia en el centro de la ranura con dimensiones de anchura de $a = 5$ mm, de profundidad de $d = 5$ mm y valor de elevación $y = 2$ mm a través de MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Las figura 5 a la 7 muestran la variación de la anchura, profundidad y elevación, respectivamente, de un defecto rectangular en donde la intensidad del campo magnético tangencial varía de $-0.021 a + 0.174 A/mm$, de $-0.021 a + 0.434 A/mm$ y de $-0.124 a + 0.583 A/mm$, mientras que la intensidad del campo magnético normal varía de $\pm 0.117 A/mm$, $\pm 0.227 A/mm$ y $-0.053 a + 0.475 A/mm$, respectivamente.

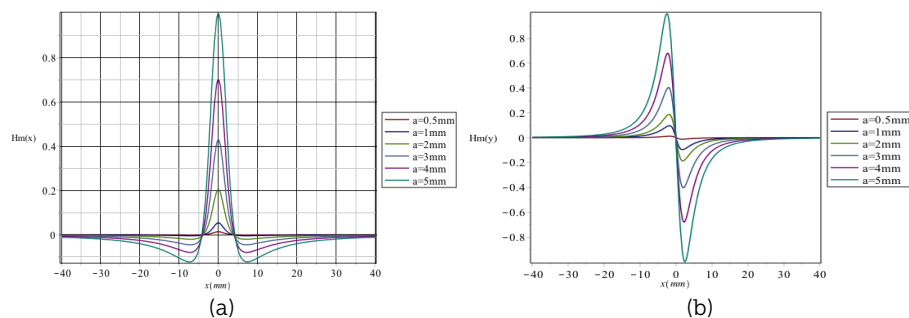


Figura 5. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de anchura de la muestra rectangular con profundidad $d = 5$ mm y valor de elevación $y = 2$ mm utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

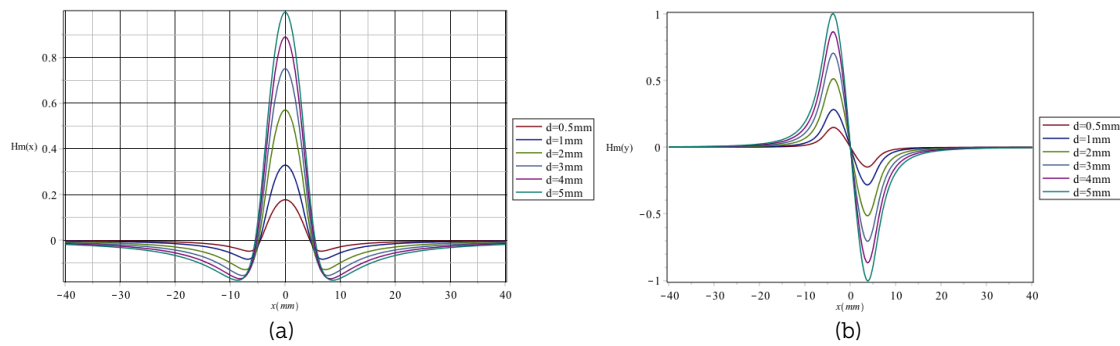


Figura 6. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de profundidad de la muesca rectangular con anchura $a = 5\text{mm}$ y valor de elevación $y = 2\text{mm}$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

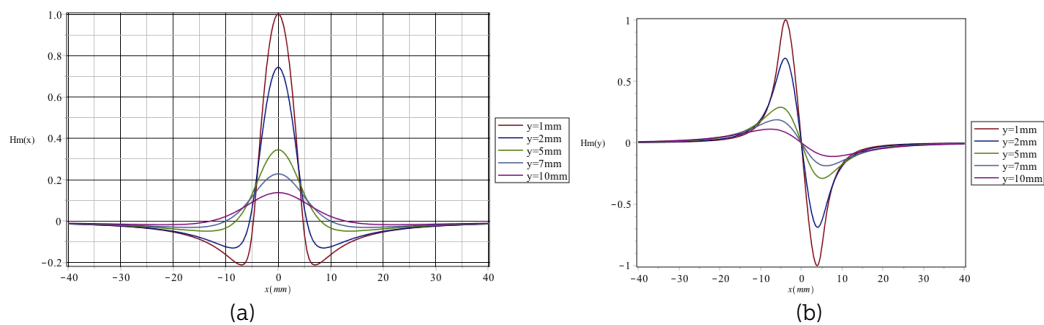


Figura 7. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes separaciones del sensor al elemento ferromagnético de la muesca rectangular con anchura $a = 5\text{mm}$ y profundidad $d = 5\text{mm}$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

A continuación, se muestran las gráficas del análisis que se obtuvieron de la distorsión del campo magnético en defectos triangulares a través de las ecuaciones (5) y (6), reportadas por Leng *et al.* (2013).

La figura 8 muestra los componentes tangenciales (a) y normales (b) del campo magnético de fuga automática para la distorsión del campo magnético en defectos tipo V (triangulares), donde $b = 3\text{mm}$ e $y = 2\text{mm}$. Cabe señalar que todas las coordenadas se normalizan para facilitar el posterior análisis cualitativo. Se ve claramente que las distribuciones de campo magnético en la zona de concentración de esfuerzos presentan características de señal de memoria magnética evidentes; es decir, los componentes tangenciales alcanzan su valor máximo denotado por H_{xp} y los componentes normales cambian su polaridad en la posición de concentración de tensión. La anchura entre la cresta de onda y el valle de la componente normal se denomina Δx_{Hyp} .

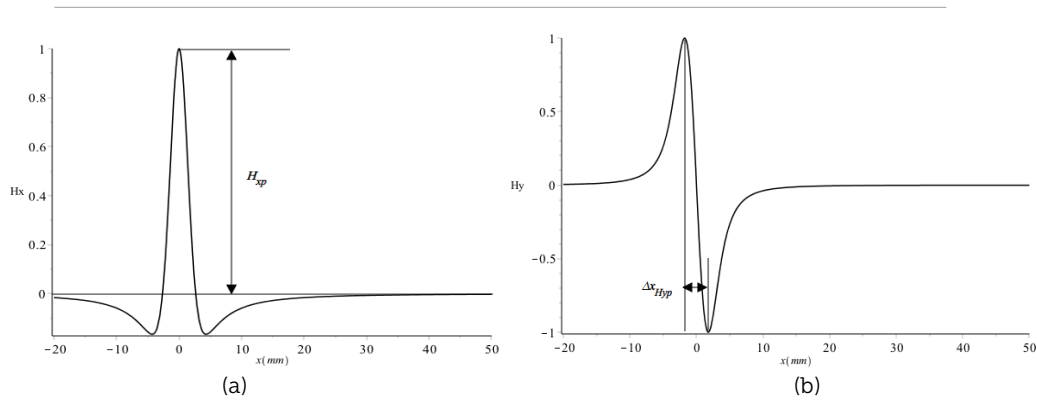


Figura 8. Distribución de fugas de flujo magnético en la zona de concentración de esfuerzos: (a) componente tangencial; (b) componente normal.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Las figuras 9 a la 11 muestran la componente tangencial H_x (a) y componente normal H_y (b) con variación de la anchura, profundidad y elevación, respectivamente, en un defecto triangular tipo V en donde la intensidad del campo magnético tangencial varía de -1.618 a $+7.993$ A/mm, de -1.618 a $+7.993$ A/mm y de -2.48 a $+9.555$ A/mm, mientras que la intensidad del campo magnético normal varía de -0.539 a $+4.103$ A/mm, de -4.103 a $+7.905$ A/mm y de -4.103 a $+7.905$ A/mm, respectivamente.

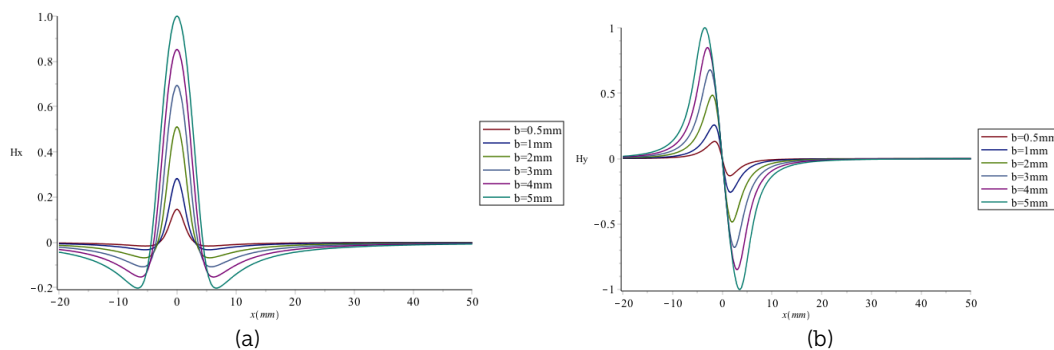


Figura 9. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de anchura de la muesca triangular tipo V con profundidad $a = 5$ mm y valor de elevación $y = 2$ mm utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

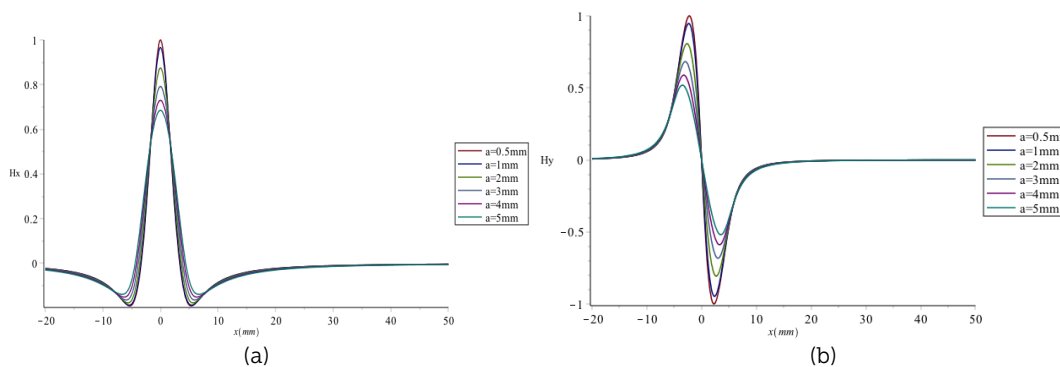


Figura 10. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de profundidad de la muesca triangular tipo V con anchura $b = 5$ mm y valor de elevación $y = 2$ mm utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

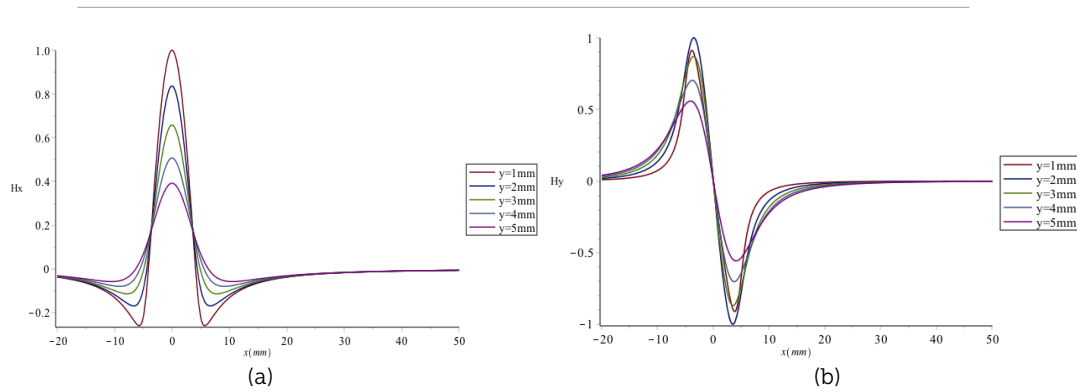


Figura 11. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de elevación de la muesca triangular tipo V con anchura $b = 5\text{mm}$ y profundidad $a = 5\text{mm}$ utilizando el *software* MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Discusión

En la sección anterior, se analizó la representación gráfica de los modelos analíticos tratados con la cual se pudo obtener la distorsión del campo magnético en defectos rectangulares y triangulares de placas ferromagnéticas. En esta sección se discuten los resultados obtenidos entre la variación de los parámetros geométricos (anchura, profundidad y elevación), respecto de la variación del campo magnético.

En el caso de defectos rectangulares, de las figuras 5a y 5b se obtiene la tabla 1 que describe la influencia cuantitativa de la variación de la anchura de la zona de concentración de esfuerzos en los parámetros característicos de la señal magnética respecto de la componente tangencial $H_{m(x)}$ y la componente normal $H_{m(y)}$.

Tabla 1. Variación de las dimensiones de la anchura e intensidad de campo magnético para el defecto rectangular.

Anchura a (mm)	$H_{m(x)}$ (A/mm)	$H_{m(y)}$ (A/mm)
0.5	0.002	0.001
1	0.009	0.011
2	0.036	0.022
3	0.075	0.047
4	0.122	0.080
5	0.174	0.117

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

En la figura 12 se realizó la variación de la anchura con los datos indicados en la tabla 1, donde se grafica la variación de la anchura contra el cambio de la intensidad de campo magnético. Como se observa, se consideraron los valores máximos de cada una de las intensidades del campo magnético, con ello se menciona que la anchura tiene un comportamiento prácticamente no lineal creciente.

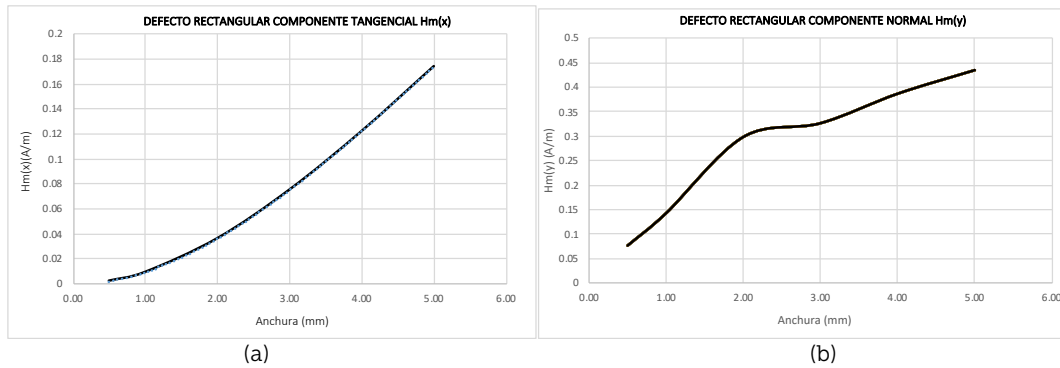


Figura 12. Muestra la gráfica de la anchura contra la intensidad del campo magnético para un defecto rectangular (a) componente tangencial $H_m(x)$ y (b) componente normal $H_m(y)$.
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

De las figuras 6a y 6b, se obtienen los datos para la tabla 2, la cual describe la influencia cuantitativa de la variación de la profundidad de la zona de concentración de esfuerzos en los parámetros característicos de la señal magnética con respecto a la componente tangencial $H_m(x)$ y la componente normal $H_m(y)$.

Tabla 2. Variación de las dimensiones de la profundidad e intensidad de campo magnético para el defecto rectangular.

Profundidad d (mm)	$H_{m(x)}$ (A/mm)	$H_{m(y)}$ (A/mm)
0.5	0.002	0.001
1	0.009	0.011
2	0.036	0.022
3	0.075	0.047
4	0.122	0.080
5	0.174	0.117

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

En la figura 13, se realizó la variación de la profundidad con los datos indicados en la tabla 2, donde se grafica la variación de la profundidad contra el cambio de la intensidad de campo magnético. Como se observa, se consideraron los valores máximos de cada una de las intensidades del campo magnético, con ello se menciona que la profundidad tiene un comportamiento prácticamente no lineal creciente.

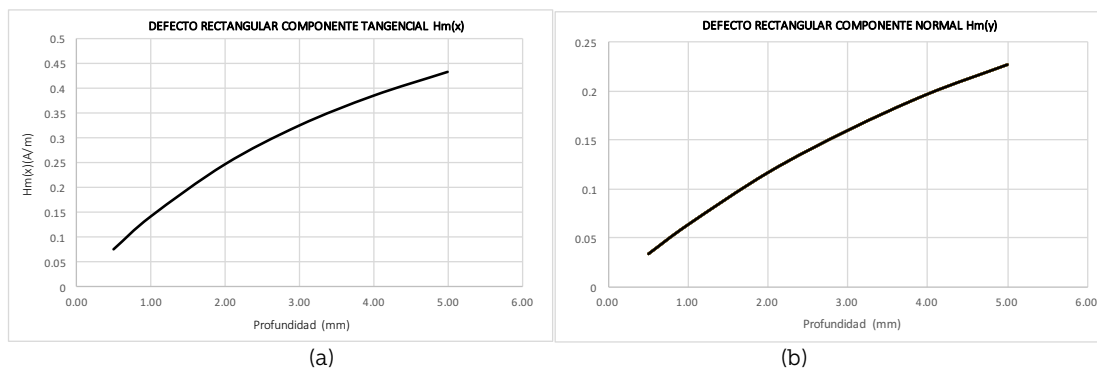


Figura 13. Muestra la gráfica de la profundidad contra la intensidad del campo magnético para un defecto rectangular (a) componente tangencial $H_m(x)$ y (b) componente normal $H_m(y)$.
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

De las figuras 7a y 7b se obtienen los datos para la tabla 3, que describe la influencia cuantitativa de la variación de la elevación con respecto a la zona de concentración de esfuerzos en los parámetros característicos de la señal magnética, con respecto a la componente tangencial $H_{m(x)}$ y la componente normal $H_{m(y)}$.

Tabla 3. Variación de las dimensiones de la elevación e intensidad de campo magnético para el defecto rectangular.

Elevación y (mm)	$H_{m(x)}$ (A/mm)	$H_{m(y)}$ (A/mm)
1	0.583	0.475
2	0.434	0.327
5	0.201	0.138
7	0.133	0.089
10	0.080	0.053

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

En la figura 14 se realizó la variación de la elevación con los datos indicados en la tabla 3, donde se grafica la variación de la elevación contra el cambio de la intensidad de campo magnético. Como se observa, se consideraron los valores máximos de cada una de las intensidades del campo magnético, con ello se menciona que la elevación tiene un comportamiento prácticamente no lineal decreciente.

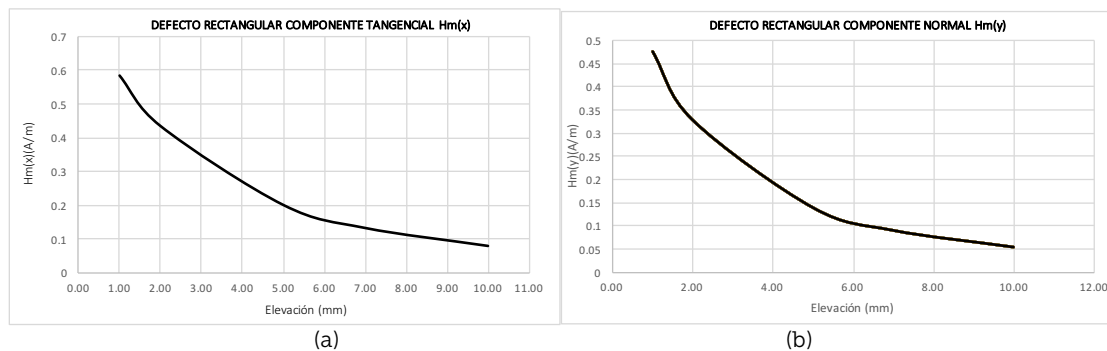


Figura 14. Muestra la gráfica de la elevación contra la intensidad del campo magnético para un defecto rectangular (a) componente tangencial $H_{m(x)}$ y (b) componente normal $H_{m(y)}$.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Se puede ver que la amplitud de la componente tangencial y normal de las señales incrementa con un aumento en la anchura o profundidad de SCZ, como se muestra en las figuras 12a, 12b, 13a y 13b. El valor de elevación es también un factor importante en las pruebas, y la amplitud disminuye rápidamente con el aumento del valor de elevación, como se muestra en la figura 14a y 14b.

Para el caso de defectos triangulares, de las figuras 9a y 9b se obtiene la tabla 4, que describe la influencia cuantitativa de la variación de la anchura de la zona de concentración de esfuerzos en los parámetros característicos de la señal magnética con respecto a la componente tangencial H_x y la componente normal H_y .

Tabla 4. Variación de las dimensiones de la anchura e intensidad de campo magnético para el defecto triangular.

Anchura b (mm)	Hx (A/mm)	Hy (A/mm)
0.5	1.167	0.534
1	2.255	1.057
2	4.082	1.988
3	5.545	2.785
4	6.816	3.482
5	7.993	4.103

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

En la figura 15, se realizó la variación de la anchura con los datos indicados en la tabla 4, donde se grafica la variación de la anchura contra el cambio de la intensidad de campo magnético. Como se observa, se consideraron los valores máximos de cada una de las intensidades del campo magnético, con ello se menciona que la anchura tiene un comportamiento prácticamente no lineal creciente.

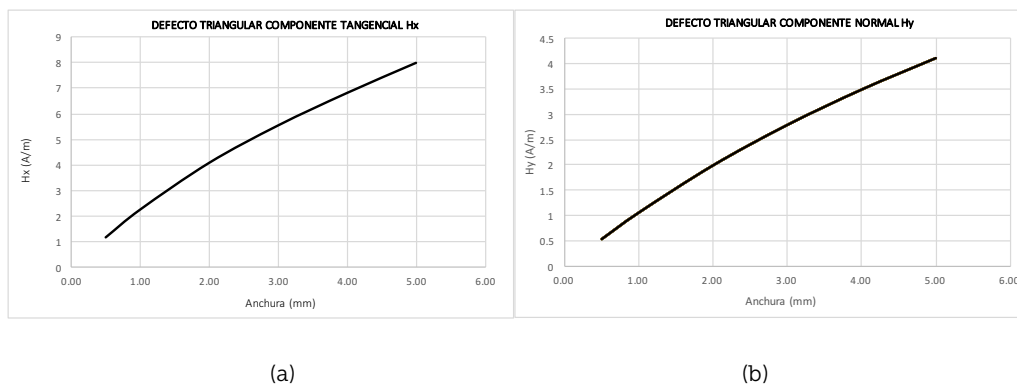


Figura 15. Muestra la gráfica de la anchura contra la intensidad del campo magnético para un defecto triangular (a) componente tangencial Hx y (b) componente normal Hy

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

De las figuras 10a y 10b se obtiene la tabla 5, que describe la influencia cuantitativa de la variación de la profundidad de la zona de concentración de esfuerzos en los parámetros característicos de la señal magnética con respecto a la componente tangencial H_x y la componente normal H_y.

Tabla 5. Variación de las dimensiones de la profundidad e intensidad de campo magnético para el defecto triangular.

Profundidad a (mm)	Hx (A/mm)	Hy (A/mm)
0.5	11.669	7.905
1	11.274	7.488
2	10.204	6.380
3	9.241	5.395
4	8.520	4.654
5	7.993	4.103

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

En la figura 16, se realizó la variación de la profundidad con los datos indicados en la tabla 5, donde se grafica la variación de la profundidad contra el cambio de la intensidad de campo magnético. Como se

observa, se consideraron los valores máximos de cada una de las intensidades del campo magnético, con ello se menciona que la profundidad tiene un comportamiento prácticamente no lineal decreciente.

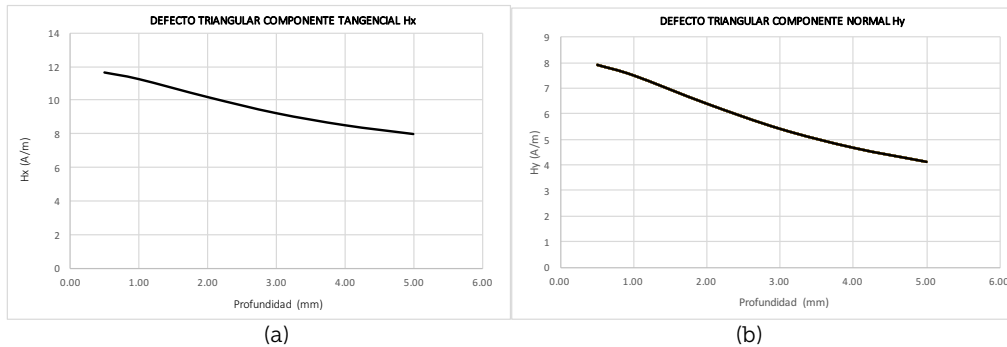


Figura 16. Muestra la gráfica de la profundidad contra la intensidad del campo magnético para un defecto triangular (a) componente tangencial H_x y (b) componente normal H_y .
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Por último, de las figuras 11a y 11b se obtiene la tabla 6, que describe la influencia cuantitativa de la variación de la elevación de la zona de concentración de esfuerzos en los parámetros característicos de la señal magnética con respecto a la componente tangencial H_x y la componente normal H_y .

Tabla 6. Variación de las dimensiones de la elevación e intensidad de campo magnético para el defecto triangular.

Elevación y (mm)	H_x (A/mm)	H_y (A/mm)
1	9.555	3.740
2	7.993	4.103
3	6.288	3.568
4	4.848	2.886
5	3.747	2.291

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

En la figura 17, se realizó la variación de la elevación con los datos indicados en la tabla 6, donde se gráfica la variación de la elevación contra el cambio de la intensidad de campo magnético. Como se observa, se consideraron los valores máximos de cada una de las intensidades del campo magnético, con ello se menciona que la elevación tiene un comportamiento prácticamente no lineal decreciente.

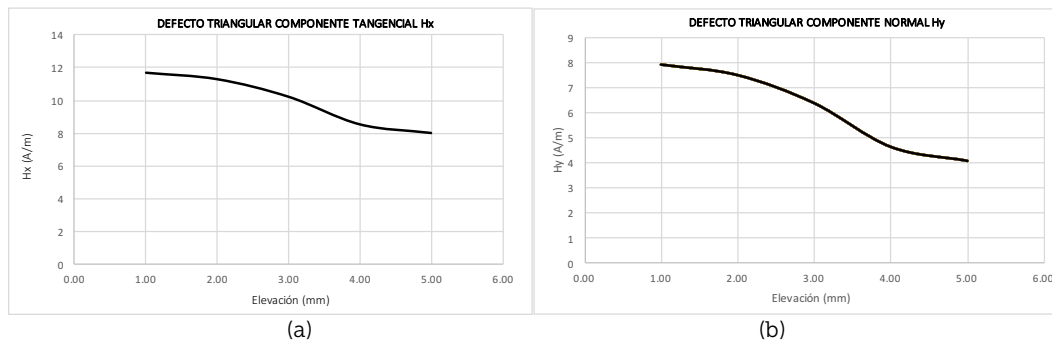


Figura 17. Muestra la gráfica de la elevación contra la intensidad del campo magnético para un defecto triangular (a) componente tangencial H_x y (b) componente normal H_y .
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Se puede apreciar en la figura 15 que los componentes tangencial y normal aumentan notablemente con el aumento de las anchuras de las SCZ en la posición de concentración de tensiones máximas. Mientras tanto, en la figura 16 los valores de las componentes tangencial y normal se hacen más anchos y corresponden con la profundidad de la SCZ, que puede utilizarse para caracterizar el rango local de daño temprano. Es evidente que el valor de elevación tiene un gran efecto sobre la señal de memoria magnética, por lo que se recomienda el valor de elevación más pequeño posible como opción para obtener información del campo magnético más fuerte en aplicaciones de ingeniería.

Conclusiones

En este artículo se presentó el concepto y la teoría del MMM, la revisión de modelos analíticos de la variación de campos magnéticos en defectos rectangulares y triangulares en placas ferromagnéticas, el análisis de los resultados de la distorsión del campo magnético en defectos rectangulares y triangulares en placas ferromagnéticas y se discutió los resultados de la relación entre la variación de los parámetros geométricos con respecto a la variación del campo magnético.

Con la obtención de los modelos numéricos a partir de modelos analíticos existentes sobre los defectos geométricos y SCZ (rectangulares y triangulares) en placas ferromagnéticas se podrá relacionar la distorsión del campo magnético con el tipo de defecto geométrico en estructuras ferromagnéticas.

En los defectos tipo rectangulares se puede observar que la amplitud del componente tangencial y normal de las señales se incrementa con un aumento en la longitud o profundidad de SCZ. El valor de elevación es también un factor importante en las pruebas, y la amplitud disminuye rápidamente con el aumento del valor de elevación.

En lo que respecta a los defectos geométricos triangulares (tipo V), los resultados muestran que el modelo numérico facilita las predicciones de daño temprano en virtud de la señal MMM y el valor pico de los componentes tangenciales y la anchura entre la cresta de onda anormal y el valle de componentes normales como dos parámetros clave para determinar el grado de daño y rango, respectivamente.

Existen ventajas del modelo numérico tratado en este artículo en relación con otras técnicas existentes en la literatura. Para tal efecto, se hizo una comparación con modelos analíticos de los autores Philip, Rao, Jayakumar & Raj (2000) para el defecto rectangular (Anexo 1) y Pengpeng (2015) para el defecto triangular (Anexo 2), en los que se puede observar un porcentaje mayor en la detección de la intensidad del campo magnético en los defectos tipo rectangular (85%) y un porcentaje mayor (90%) en relación con los defectos tipo triangular, dando una mejora del modelo numérico tratado en esta investigación.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Tecnológico Superior de Alvarado por el apoyo otorgado. Así mismo, este trabajo fue apoyado por los proyectos PRODEP *Sistema Electrónico de Medición de Campo Magnético Residual de Estructuras Ferromagnéticas* y Tecnológico Nacional de México en Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica 2017 *Desarrollo de un sistema experto para el modelado de grietas superficiales (tipo triangular y rectangular) en placas ferromagnéticas usando el método de memoria magnética*.

Referencias

- Dubov, A. (2006). Principle features of Metal Magnetic Memory Method and Inspection Tools As Compared To Known Magnetic NDT Methods. *Cinde Journal*, 27(3), 16. Recuperado de <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.6.5.pdf>
- Huang, H., Jiang, S., Yang, C., & Liu, Z. (2014). Stress concentration impact on the magnetic memory signal of ferromagnetic structural steel. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 29(4), 377–390. <https://doi.org/10.1080/10589759.2014.949710>
- Jiancheng, L., Minqiang, X., Jianwei, L., & Jianzhong, Z. (2010). Characterization of the Elastic-plastic Region Based on Magnetic Memory Effect. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 23(4), 532–536. <https://doi.org/10.3901/CJME.2010.04>
- Leng, J. C., Xing, H. Y., Zhou, G. Q., & Gao, Y. T. (2013). Dipole modelling of metal magnetic memory for V-notched plates. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(9), 498–503. <https://doi.org/10.1784/insi.2012.55.9.498>
- Pengpeng, S. (2015). Analytical Solutions of Magnetic Dipole Model for Defect Leakage Magnetic Fields. *NDT*, 91, 399–404. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/335060530_Analytical_Solutions_of_Magnetic_Dipole_Model_for_Defect_Leakage_Magnetic_Fields
- Pengpeng, S., & Xiaojing, Z. (2015). Magnetic charge model for 3D MMM signals. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 31(1), 45–60. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1064121>
- Philip, J., Rao, C. B., Jayakumar, T., & Raj, B. (2000). New optical technique for detection of defects in ferromagnetic materials and components. *NDT and E International*, 33(5), 289–295. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(99)00052-3)
- Suresh, V., & Abudhair, A. (2016). Dipole model to predict the rectangular defect on ferromagnetic pipe. *Journal of Magnetism*, 21(3), 437–441. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2016.21.3.437>
- Wang, Z. D., Gu, Y., & Wang, Y. S. (2012). A review of three magnetic NDT technologies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(4), 382–388. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.08.048>
- Wang, Z. D., Yao, K., Deng, B., & Ding, K. Q. (2010a). Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration. *NDT & E International*, 43(6), 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.05.007>
- Wang, Z. D., Yao, K., Deng, B., & Ding, K. Q. (2010b). Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals. *NDT & E International*, 43(4), 354–359. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.12.006>
- Yao, K., Deng, B., & Wang, Z. D. (2012). Numerical studies to signal characteristics with the metal magnetic memory-effect in plastically deformed samples. *NDT and E International*, 47, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.004>

Anexo 1

Modelo analítico del defecto rectangular (otra técnica)

El modelado analítico del defecto rectangular utilizando el método de prueba no destructiva Método de Fuga Magnética (MFL) se hizo referencia al siguiente artículo: Philip, J., Rao, C. B., Jayakumar, T., Raj, B. (2000). A new optical technique for detection of defects in ferromagnetic materials and components. *NDT & E international*, 33, 289-295, doi: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(99)00052-3)

Del artículo nombrado anteriormente se consideraron las siguientes ecuaciones:

Componente tangencial (H_x):

$$H_x = \frac{Hg}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\left(x + \frac{l_g}{2}\right) Y_o}{\left(x + \frac{l_g}{2}\right)^2 + y(y + Y_o)} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\left(x - \frac{l_g}{2}\right) Y_o}{\left(x - \frac{l_g}{2}\right)^2 + y(y + Y_o)} \right) \right] \quad (7)$$

Componente normal (H_y):

$$H_y = \frac{Hg}{2\pi} \text{Ln} \left\{ \frac{\left(\left(x + \frac{l_g}{2}\right)^2 + (y + Y_o)^2 \right)}{\left(\left(x - \frac{l_g}{2}\right)^2 + (y + Y_o)^2 \right)} \right\} \left\{ \frac{\left(x - \frac{l_g}{2}\right) + y^2}{\left(x + \frac{l_g}{2}\right) + y^2} \right\} \quad (8)$$

donde Hg es el campo magnético aplicado dentro del defecto que se obtiene de la ecuación (9), Ha es el campo magnético residual uniforme aplicado a la estructura ferromagnética y μ es la permeabilidad del material.

$$Hg = \frac{2 \frac{Y_o}{l_g} + 1}{\left(\frac{1}{\mu}\right) \left(\frac{2Y_o}{l_g}\right) + 1} Ha \quad (9)$$

Las figuras 18 a la 20 muestran la variación de la anchura, profundidad y elevación, respectivamente, de un defecto rectangular en donde la intensidad del campo magnético tangencial varía de $-0.029 a + 0.147 A/mm$, $-0.2948 a + 0.1473 A/mm$ y $-0.036 a + 0.2119 A/mm$; mientras que la intensidad del campo magnético normal varía de $\pm 0.2148 A/mm$, $\pm 0.2148 A/mm$ y $\pm 0.3653 A/mm$, respectivamente.

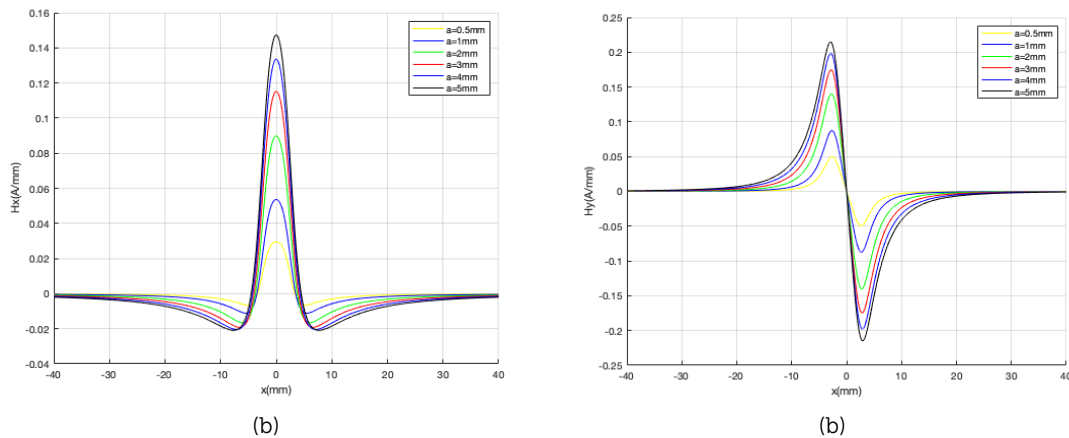


Figura 18. (Color en línea) Defecto rectangular propuesto por Phillip *et al.* (2000); perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de anchura de la muesca rectangular con profundidad $d = 5mm$ y valor de elevación $y = 2mm$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

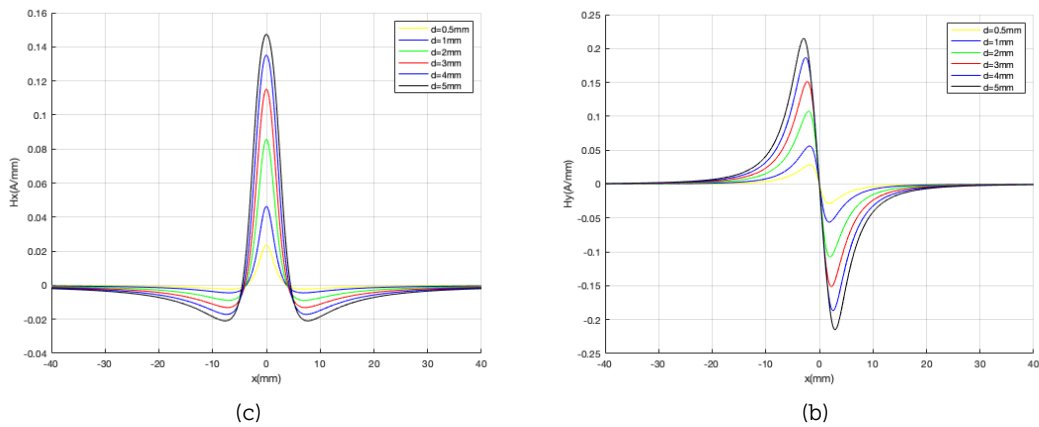


Figura 19. (Color en línea) Defecto rectangular propuesto por Phillip *et al.* (2000); perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de profundidad de la muesca rectangular con anchura $a = 5\text{mm}$ y valor de elevación $y = 2\text{mm}$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

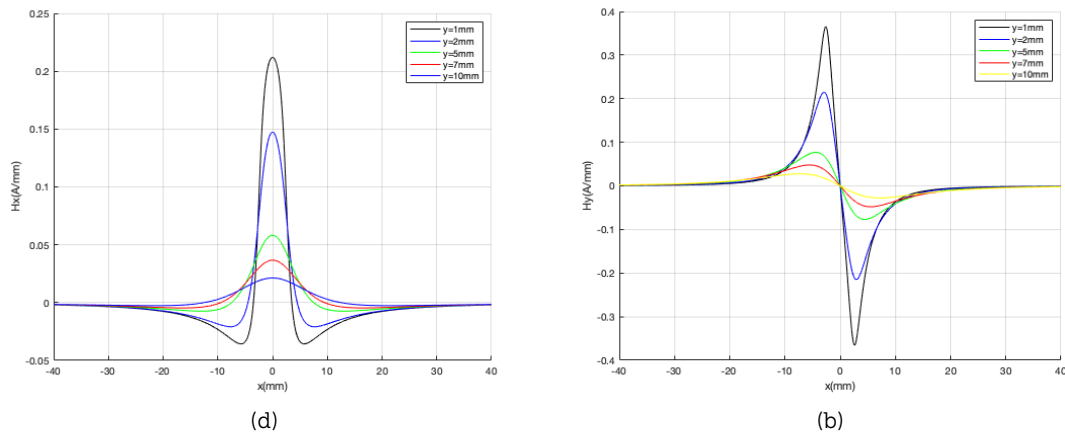


Figura 20. (Color en línea) Defecto rectangular propuesto por Phillip *et al.* (2000); perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes separaciones del sensor al elemento ferromagnético de la muesca rectangular con anchura $a = 5\text{mm}$ y profundidad $d = 5\text{mm}$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

Anexo 2

Modelo analítico del defecto triangular (V)

Para realizar el modelado analítico del defecto triangular (V) usando el método de prueba no destructiva MFL, se consideró la siguiente referencia: Pengpeng (2015).

Del artículo citado anteriormente, se llevaron a cabo las siguientes ecuaciones correspondientes a la componente tangencial H_x (Ecuación 10) y normal H_y (Ecuación 11):

$$H_x = \frac{\rho_s}{2\pi\mu_0} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{b^2}{h^2}}} \times \left\{ \begin{aligned} &\arctan \frac{b(b+x)-hy}{h(b+x)+by} + \arctan \frac{b(b-x)-hy}{h(b-x)+by} \\ &+ \arctan \frac{h(h+y)-bx}{h(b+x)+by} + \arctan \frac{h(h+y)+by}{h(b-x)+by} \\ &+ \frac{b}{2h} \log \frac{(b-x)^2+y^2}{x^2+(h+y)^2} \frac{(b+x)^2+y^2}{x^2+(h+y)^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$H_y = \frac{\rho_s}{2\pi\mu_0} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{b^2}{h^2}}} \times \left\{ \begin{aligned} &\frac{b}{h} \left[\arctan \frac{b(b+x)-hy}{h(b+x)+by} - \arctan \frac{b(b-x)-hy}{h(b-x)+by} \right] \\ &+ \frac{b}{h} \left[\arctan \frac{h(h+y)-bx}{h(b+x)+by} - \arctan \frac{h(h+y)+by}{h(b-x)+by} \right] \\ &+ \frac{1}{2} \log \frac{(b-x)^2+y^2}{(b+x)^2+y^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Las figuras 21 a la 23 muestran la variación de la anchura, profundidad y elevación, respectivamente, de un defecto triangular en donde la intensidad del campo magnético tangencial varía de $-0.094 a + 0.3983 A/mm$, -0.02319 a $+0.09374 A/mm$ y -0.045 a $+0.13 A/mm$; mientras que la intensidad del campo magnético normal varía de $\pm 0.3983 A/mm$, y $\pm 0.1306 A/mm$, respectivamente.

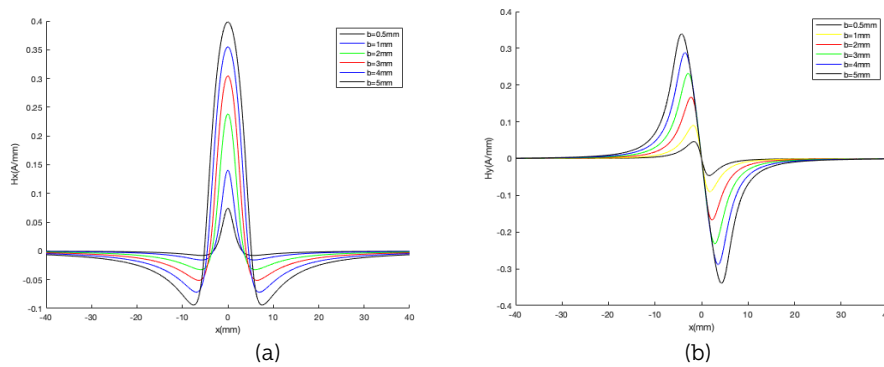


Figura 21. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de anchura de la muesca triangular tipo V (Pengpeng *et al.*, 2015) con profundidad $h = 5\text{mm}$ y valor de elevación $y = 2\text{mm}$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

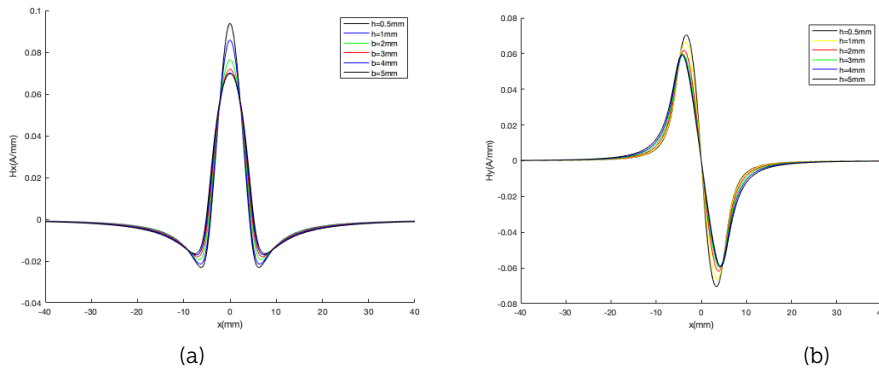


Figura 22. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de profundidad de la muesca triangular tipo V (Pengpeng *et al.*, 2015) con anchura $b = 5\text{mm}$ y valor de elevación $y = 2\text{mm}$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.

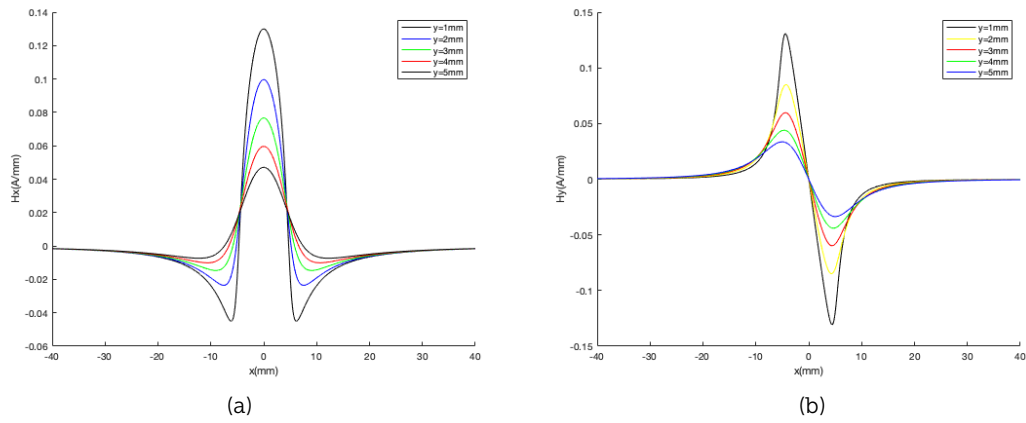


Figura 23. (Color en línea) perfil de fuga tangencial (a) y normal (b) para diferentes dimensiones de elevación de la muesca triangular tipo V (Pengpeng *et al.*, 2015) con anchura $b = 5\text{mm}$ y profundidad $h = 5\text{mm}$ utilizando el software MAPLE.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados.