

Metodología para la Evaluación de Sensibilidad en la Detección de Discontinuidades
Planares Subsuperficiales con la Técnica de Partículas Magnéticas
utilizando el Yugo Electromagnético Y7

Viviana Vargas Alzate y Andrés Felipe Mantilla Mantilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla

Magister en Ingeniería de Materiales

Codirector

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por ser la guía en cada uno de mis proyectos y darme las habilidades, el conocimiento y la perseverancia para llegar a esta meta en mi vida.

A mis padres, Nelson Mantilla y Milena Mantilla por brindarme siempre lo mejor, por su cariño, comprensión, esfuerzo y apoyo, han hecho que en este momento de mi vida sea un Ingeniero Metalúrgico.

A mi hermana Paula Mantilla que me ha acompañado, apoyado en todo momento y con quien espero compartir muchos más éxitos.

A mi novia y compañera de tesis Viviana Vargas quien ha permanecido a mi lado desde el inicio de mi recorrido por la universidad, por siempre creer en mis capacidades y motivarme aun en los momentos más difíciles.

Este proyecto se lo dedico a ustedes por su constante apoyo y compañía durante todo este proceso.

Andrés Felipe Mantilla Mantilla

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía quien me brinda fortaleza, amor y salud. Con todo mi amor y cariño a mi hermana Johana Vargas por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera pensando en mi futuro y bienestar, por creer en mis capacidades y brindarme siempre lo mejor, por su compañía y comprensión en cada una de mis decisiones, con quien espero compartir muchos más éxitos. A mi mamá Carmenza Alzate por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más, porque con sus palabras de aliento nunca me dejo caer para seguir siempre adelante, su apoyo incondicional y amor de madre. A mi sobrino Santiago Vargas por sacarme esas sonrisas en tiempos difíciles, por estar siempre a mi lado y apoyarme.

A mi novio, amigo y compañero de tesis Andrés Mantilla quien ha permanecido a mi lado desde el inicio de mi recorrido por la universidad, por siempre creer en mis capacidades y motivarme aun en los momentos más difíciles, por brindarme todo su amor y cariño.

A mis compañeros y amigos quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas durante estos 5 años muchas gracias.

Ustedes son el pilar de mi vida, mi razón para seguir adelante, alcanzar mis metas y lograr que este sueño se haga realidad.

Viviana Vargas Alzate

Agradecimientos

Agradecemos todo su empeño y dedicación al profesor Carlos Andrés Galán, quien más que nuestro director de proyecto fue nuestro padre académico, guía mentor y amigo. Por estar siempre dispuesto a creer en nuestras capacidades, por todas sus enseñanzas y continuo acompañamiento, por que la influencia de un buen profesor nunca podrá ser borrada.

A la Universidad Industrial de Santander particularmente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales con todos sus maestros por enseñarnos todo lo que sabemos y más que eso, guiarnos para ser una mejor persona y profesional.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Resultados	13
2.1 Inspección mediante Partículas Magnéticas utilizando el yugo electromagnético	13
2.1.2 Tipos de discontinuidades detectables	13
2.2 Magnetización de la pieza a inspeccionar.....	15
2.2.1 Magnetización longitudinal	15
2.2.2 Magnetización circular.....	15
2.2.3 Fuga de flujo magnético.....	15
2.3 Técnica de magnetización con el yugo	17
2.3.1 Yugo de imanes permanentes	17
2.3.2 Yugo Electromagnético	18
2.4 Partículas Magnéticas	19
2.5 Densidad del Campo Magnético y Curva de Histéresis.....	21
2.6 Tipos de corrientes de magnetización.....	24
2.7 Funcionamiento y requisitos de la fuerza del yugo electromagnético	25
2.7.1 Sistemas de verificación de intensidad de campo.....	26
2.8 Identificación de los parámetros y los requisitos de la técnica	27
2.8.1 Requisitos de la técnica.....	27

2.8.2 Parámetros de la técnica.....	28
3. Procedimiento de inspección para evaluar la sensibilidad de detección de la técnica.....	33
Etapa 1. Definición de las configuraciones en las que se realizarán las mediciones.....	33
Etapa 2. Procedimiento para realizar las mediciones.....	35
Etapa 3. Análisis estadístico de los datos.....	36
4. Diseño del Bloque de Verificación.	37
6. Conclusiones	41
Referencias Bibliográficas	42

Lista de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 1</i> Fuerza mínima de elevación del yugo	26
<i>Tabla 2</i> Sistemas de verificación de intensidad de campo	26
<i>Tabla 3</i> Circuitos reales con variaciones en sus parámetros.....	32
<i>Tabla 4</i> Medidas óptimas para la inspección con yugo Y7	33
<i>Tabla 5</i> Configuraciones para las mediciones	34
<i>Tabla 6</i> Profundidad de los barrenos posición 1.....	40
<i>Tabla 7</i> Profundidad de los barrenos posición 2.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1</i> Agrietamiento en frío del metal base (a) y en caliente (b), falta de fusión entre pases (c).	14
<i>Figura 2</i> Campo de fuga y generación del flujo magnético en el yugo electromagnético	16
<i>Figura 3</i> (a) Magnetización directa puntas de contacto, (b) magnetización entre cabezales.	17
<i>Figura 4</i> Yugo electromagnético Y7	19
<i>Figura 5</i> Sensibilidad de la corriente alterna y continua para detectar discontinuidades subsuperficiales.....	21
<i>Figura 6</i> Componentes de la Curva de Histéresis	23
<i>Figura 7</i> Sensibilidad de la corriente alterna y continúa evaluada en el anillo de ketos con discontinuidades tipo barreno.	25
<i>Figura 8</i> Campo de fuga y generación del flujo magnético en el yugo electromagnético	30
<i>Figura 9</i> (a) Densidad de Campo Magnético (T). (b) Intensidad de Campo Magnético (A/m)...	31
<i>Figura 10</i> Comportamiento de la fuga de campo magnético del circuito optimizado evaluado en condiciones reales comparado con el circuito optimizado FEM 2D	32
<i>Figura 11</i> Flujograma del procedimiento de inspección	35
<i>Figura 12</i> Diseño del bloque de calibración (a) 3D (b) 2D con dimensiones	39
<i>Figura 13</i> Posiciones del bloque.....	39

Resumen

Título: Metodología para la Evaluación de Sensibilidad en la Detección de Discontinuidades Planares Subsuperficiales con la Técnica de Partículas Magnéticas utilizando el Yugo Electromagnético Y7*

Autor: Viviana Vargas Alzate y Andrés Felipe Mantilla Mantilla**

Palabras Clave: Inspección, Yugo electromagnético, Discontinuidades, Bloque de Referencia.

Descripción:

En la presente monografía se realizó un estudio de la técnica de magnetización con Yugo electromagnético tipo Y7, el cuál es uno de los Ensayos No Destructivos empleado para la detección de grietas y discontinuidades planares (bidimensionales). Dentro de las ventajas de esta técnica está la buena sensibilidad, portabilidad, adaptabilidad y rapidez de inspección, sin embargo, hay un vacío respecto a la posibilidad de cuantificar y evaluar la sensibilidad y la máxima profundidad de detección de ésta, ya que no existen, a nivel comercial ni científico, suficientes investigaciones enfocadas en determinar esta información, para todos los métodos de magnetización. Por lo anterior, en el presente proyecto de grado se hizo énfasis en el estudio de yugos electromagnéticos tipo Y7, con el objetivo de definir las variables que se deben controlar al momento de realizar una inspección y con base en éstas se propuso un procedimiento y el diseño de un bloque de verificación que permita evaluar cuantitativamente la sensibilidad máxima de detección de discontinuidades artificiales planares subsuperficiales. El desarrollo del presente proyecto de grado será la base para la capacitación del personal y la ejecución de futuros trabajos de investigación aplicada, relacionados con las mediciones en laboratorio a nivel experimental.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. MSc. en Ingeniería de Materiales. Codirector: Ana María Pérez Ceballos. Dra. En Ingeniería.

Abstract

Title: Methodology for the Evaluation of Sensitivity in the Detection of Subsurface Planar Discontinuities with the Magnetic Particle Technique using the Electromagnetic Yoke Y7*

Author: Viviana Vargas Alzate and Andrés Felipe Mantilla Mantilla**

Keywords: Inspection, Electromagnetic Yoke, Discontinuities, Reference Block.

Description

In this monograph, a study of the magnetization technique with electromagnetic yoke type Y7 was carried out, which is one of the Non-Destructive Tests used for the detection of cracks and planar discontinuities (two-dimensional). Among the advantages of this technique is the good sensitivity, portability, adaptability and speed of inspection, however, there is a gap regarding the possibility of quantifying and evaluating the sensitivity and maximum depth of detection of it, since there are not, at a commercial or scientific level, enough research focused on determining this information, for all magnetization methods. Therefore, in the present degree project emphasis was placed on the study of electromagnetic yokes type Y7, with the aim of defining the variables that must be controlled at the time of an inspection and based on these a procedure was proposed and the design of a verification block that allows to quantitatively evaluate the maximum sensitivity of detection of subsurface planar artificial discontinuities. The development of this degree project will be the basis for the training of staff and the execution of future applied research work, related to laboratory measurements at the experimental level.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. MSc. in Materials Engineering. Co-director: Ana María Pérez Ceballos. PhD in Engineering.

Introducción

La inspección de materiales metálicos emplea múltiples Ensayos No Destructivos (END) para analizar el estado de las piezas; sin alterar su forma ni propiedades, debido a que durante su fabricación y servicio se pueden inducir discontinuidades, dentro de las que se encuentran las de morfología planar como las grietas, delaminaciones, fusiones incompletas, fracturas, entre otras, las cuales son de gran severidad para la operación y pueden causar la falla prematura y catastrófica del componente (Kulchytsky, 2016) (Bunge & Magallanes, 2010). En este sentido, la inspección con el método de Partículas Magnéticas es una opción por su rapidez, sobresaliente sensibilidad y adaptabilidad con múltiples técnicas de magnetización (René Edmundo Chicas Robles & Roberto Alejandro Aguilar Rivas, 2013). Sin embargo, en la actualidad, es difícil conocer cuantitativamente el alcance del Yugo electromagnético en cuanto a dos características: la primera es la profundidad máxima de detección de discontinuidades planares subsuperficiales y la segunda es la influencia de los parámetros de inspección sobre la sensibilidad de detección de discontinuidades subsuperficiales (Sanjaya & Srinivas, 2021). Esta información es incluida parcialmente en las normas y no existe a nivel comercial ni científico investigaciones que reporten un procedimiento para medir dichas características. Con base en lo anterior surge la pregunta de investigación: ¿Es posible implementar una metodología que permita cuantificar la capacidad de detección de discontinuidades planares subsuperficiales con el uso de un bloque patrón? Con el fin de resolver esta pregunta, se planteó un procedimiento de evaluación de la sensibilidad de la técnica basado en un diseño de experimentos a partir de un análisis teórico y el diseño de un bloque con discontinuidades artificiales de dimensiones controladas, que permita determinar la máxima profundidad de detección del equipo y su sensibilidad.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Plantear una metodología para evaluar la sensibilidad en la detección de discontinuidades planares subsuperficiales con la técnica de partículas magnéticas utilizando el yugo electromagnético Y7.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión bibliográfica relacionada con las Partículas Magnéticas para definir las variables que se deben controlar al momento de realizar una inspección, por el método de magnetización de yugo electromagnético tipo Y7.

Proponer un procedimiento para evaluar cuantitativamente la sensibilidad de detección de discontinuidades planares subsuperficiales con el yugo electromagnético teniendo en cuenta la bibliografía consultada.

Diseñar un bloque de referencia con discontinuidades planares subsuperficiales artificiales con diferentes profundidades y de fácil fabricación que permita realizar la evaluación de sensibilidad.

2. Resultados

2.1 Inspección mediante Partículas Magnéticas utilizando el yugo electromagnético

El Ensayo No Destructivo de Partículas Magnéticas permite evaluar e identificar discontinuidades superficiales y subsuperficiales con morfología planar; presentando como una ventaja sobresaliente, que no existe una restricción respecto a la forma y el tamaño de la pieza, sin embargo, esto si influye directamente en la selección del método de magnetización, siendo aplicado solo a materiales ferromagnéticos (Moore & Patrick, 2020). Esta inspección se basa en tres pasos esenciales: magnetizar la pieza proporcionando un flujo magnético adecuado, localizado a lo largo de toda la pieza, según la técnica de magnetización empleada, seguidamente aplicar las partículas magnéticas ya sean secas visibles o húmedas fluorescentes manteniendo el flujo magnético activo conocido como el método de magnetización continuo y finalmente realizar un análisis e interpretación de las indicaciones reveladas (E709-American Society for Testing and Materials, 2015) (Mehta, 2015).

2.1.2 Tipos de discontinuidades detectables

Con el método de inspección, y en particular con el yugo electromagnético se pueden inspeccionar discontinuidades de tipo planar abiertas a la superficie (superficiales) y ubicadas a ciertas profundidades, no conectadas con la superficie (subsuperficiales), las cuales pueden generarse durante los procesos de fabricación primarios como desgarros en calientes y juntas frías, de igual forma las generadas por conformado en frio o en caliente como las costuras, laminaciones, pliegues de forja y delaminaciones (Kaletsch, 2021). También se pueden inspeccionar discontinuidades generadas durante los procesos de soldadura como: grietas en frio y en caliente, falta de penetración, algunas inclusiones y falta de fusión (Barter, 2012), así como

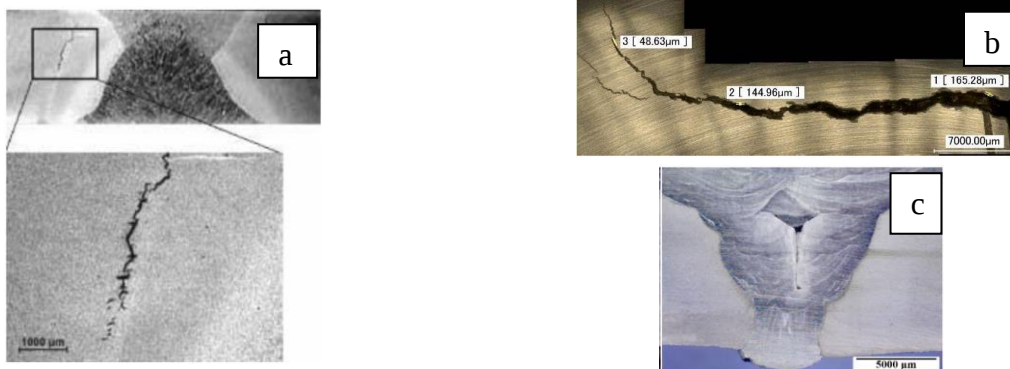
las generadas en procesos secundarios como: grietas y fluencia producidos durante los tratamientos térmicos y el mecanizado (René Edmundo Chicas Robles & Roberto Alejandro Aguilar Rivas, 2013) (Prejean, 2018).

A continuación, se presentan dos ejemplos de agrietamiento ubicados internamente, uno que conecta la superficie (ver Figura 1a y 1b) y una discontinuidad por falta de fusión entre pases de cordones de soldadura como se puede observar en la Figura 1c. Ejemplos que son de gran interés en la detección por partículas magnéticas debido a que es una técnica rápida y económica.

El primer caso corresponde al agrietamiento en frío presentado en la Figura 1a, el cual se da principalmente por 3 causas: la falta de compatibilidad en el material de aporte y el material base, enfriamientos bruscos y no realizar un precalentamiento de la pieza (Murillo Sigero, 2010). Las grietas de la Figura 1b se produjeron en la unión soldada de una tubería de vapor de una central eléctrica, causadas por un defecto en la raíz de la soldadura, generando una alta fragilidad en el material, facilitando la propagación de la grieta, finalmente la Figura 1c presenta una falta de fusión entre los pases de una soldadura (Pérez & Álvarez, 2017).

Figura 1

Agrietamiento en frío del metal base (a) y en caliente (b), falta de fusión entre pases (c)



Nota. Tomado de *Manual básico - Control de la ejecución en obra de las uniones soldadas. Ingeniería de Materiales y Fabricación.* p. 27. (Yin & Wei, 2017).

2.2 Magnetización de la pieza a inspeccionar

La magnetización es la aplicación de un campo magnético a una pieza ferromagnética, con el fin de generar un flujo magnético ya sea longitudinal o circular, los cuales pueden ser aplicados con el método continuo o residual dependiendo de las propiedades magnéticas del material a inspeccionar.

2.2.1 Magnetización longitudinal

Este tipo de magnetización se presenta cuando una corriente eléctrica pasa a través de una bobina, generando un campo magnético longitudinal dentro de ésta. Al colocar un material ferromagnético en el interior de la bobina, la mayor parte del flujo magnético creado por la corriente eléctrica se concentra en el objeto, generando polos magnéticos en los extremos de la pieza donde el flujo viaja del polo norte al polo sur como en los imanes. En el caso del yugo electromagnético el campo magnético longitudinal se genera en el cuerpo de este, ya que en su interior presenta una bobina como se puede observar en la Figura 2b (Ángel & Pozueta, 2014).

2.2.2 Magnetización circular

Se genera cuando la corriente eléctrica pasa a través de un conductor ya sea un alambre o una barra, creando un campo magnético alrededor de este; donde el flujo magnético está de forma circular en ángulo recto con la dirección de la corriente; para determinar su dirección se utiliza la regla de la mano derecha de Fleming (Waldrop et al., 2008).

2.2.3 Fuga de flujo magnético

Cuando el material presenta una discontinuidad, se induce un polo norte y un polo sur en los bordes de ésta, interrumpiendo el flujo magnético uniforme de las líneas de campo, donde cierta cantidad se ve forzada a salir, dando como resultado, fugas de flujo (Agustin, 2010). Cuando se esparcen las partículas magnéticas, se genera una atracción por parte de las fugas de

flujo localizadas, proporcionando una indicación por la acumulación de las partículas en esta zona, como se puede observar en la Figura 2a donde a mayor interrupción del flujo magnético mayor será la intensidad del campo de fuga y la atracción de las partículas (Bunge & Magallanes, 2010).

Figura 2

Campo de fuga y generación del flujo magnético en el yugo electromagnético

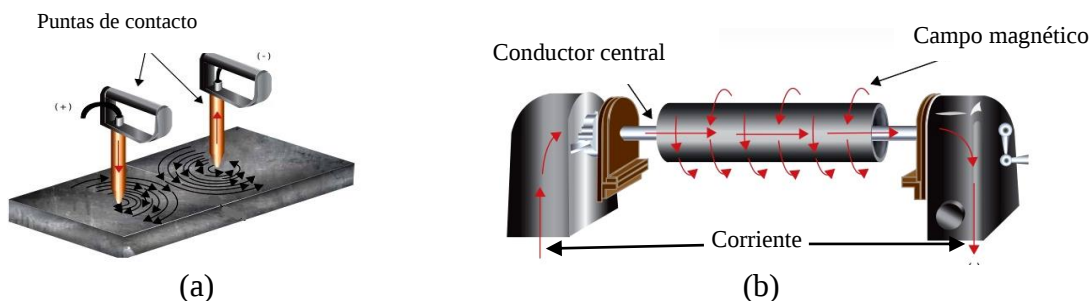


Nota. Tomado de Bunge,(Bunge & Magallanes, 2010).

Las piezas ferromagnéticas se pueden magnetizar de forma directa o indirecta. En la magnetización directa la corriente fluye por la pieza generando así un campo magnético circular alrededor de ella, ésta se efectúa por conducción de la corriente controlando su intensidad, con el fin de garantizar la intensidad del campo magnético y evitar calentamientos en la pieza (Panchano, 2011). Algunas técnicas que utilizan este tipo de magnetización son las puntas de contacto (ver Figura 3a), disparo entre cabezales y pinzas o mordazas (Infobrother, 2017). En la magnetización indirecta, la pieza está dentro de un campo magnético generado por una fuente externa, por lo que el flujo magnético es inducido a la pieza por técnicas como la bobina, el conductor central (ver Figura 3b) y el yugo electromagnético (ver Figura 2b) (InfoBrother, 2017).

Figura 3

(a) Magnetización directa puntas de contacto, (b) magnetización entre cabezales



Nota. Tomado de (ILOG S.A, 2013).

2.3 Técnica de magnetización con el yugo

Es un equipo portátil en forma de U, el cual por lo general se fabrica de hierro dulce de baja retentividad. Existen diferentes modelos de yugo los cuales dependen del tipo de corriente a utilizar ya sea alterna o continua. Algunos yugos disponen de baterías facilitando su portabilidad al eliminar la necesidad de una fuente de alimentación de corriente alterna (Basili & Burrato, 2021). Los yugos producen solo magnetización longitudinal, son ergonómicos, convenientes para inspecciones *in situ* o en espacios confinados. Además, genera un método de magnetización localizado el cual requiere de un reposicionamiento para lograr la orientación de la línea de flujo en al menos dos direcciones opuestas de 90°, debido a que esta técnica, al igual que las demás, detecta discontinuidades superficiales y subsuperficiales que estén perpendiculares al flujo magnético (Moore & Patrick, 2020).

A continuación, se presenta en detalle dos tipos de yugos.

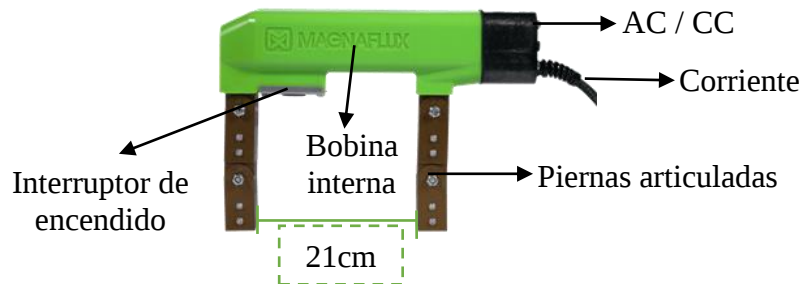
2.3.1 Yugo de imanes permanentes

Este yugo tiene la propiedad de retener el campo magnético aplicado sobre él por largos periodos de tiempo y es utilizado para generar campos magnéticos donde no se acepta el uso de

corriente o no hay disponibilidad de ésta. El yugo al ser de imanes no permite desactivar su campo, por este motivo es difícil despegar el yugo de las piezas inspeccionadas, al igual que retirar las partículas que quedan adheridas en los polos (Magnaflux, 2018) (Bernal Reinoso, 2014).

2.3.2 Yugo Electromagnético

Este yugo genera un campo magnético por medio de un sistema de bobina que está sobre un cuerpo en forma de U como se muestra en la Figura 4. El campo es transmitido a la pieza a través de sus dos extremidades (comúnmente llamados piernas) que funcionan como polos magnéticos y pueden ser fijos o articulados, éstos últimos pueden adaptarse a la geometría de la pieza y permiten variar la distancia entre los polos y el área efectiva de inspección (Bernal Reinoso, 2014). En el mercado hay variedad de modelos de yugos electromagnéticos dependiendo de su tamaño, peso, forma y lo más importante el tipo de corriente que utiliza. Hay yugos de corriente alterna o de corriente continua, y otros con la posibilidad de seleccionar los dos tipos de corriente, los cuales inducen un flujo magnético lineal entre sus polos, cabe resaltar que los yugos con corriente continua pueden dividirse en dos tipos, el primero que utiliza baterías y el segundo que rectifica la corriente alterna a través de capacitadores (Sheet, 2021). Esta técnica no presenta el riesgo de producir quemaduras por arco, gracias a que se transmite a la pieza solamente el campo magnético y no la corriente. Para el desarrollo de este proyecto se seleccionó el yugo que trabaja con los dos tipos de corriente, modelo Y7 de la marca Magnaflux, ya que permite la detección de discontinuidades subsuperficiales de interés y el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Industrial de Santander cuenta con este equipo (ASME Boiler & Pressure Vessel Code, 2019).

Figura 4*Yugo electromagnético Y7*

Nota. Tomado de (Magnaflux, 2021).

2.4 Partículas Magnéticas

Las partículas Magnéticas son fabricadas de materiales ferromagnéticos con dimensiones entre 0.125 a 60 micras, combinando morfologías esféricas y alargadas para proporcionar una movilidad adecuada, generalmente son de color rojo, pero también existen de múltiples colores y las de tipo fluorescente que son observadas bajo luz ultravioleta (David Moore & Bruce Graham, 2008). Las partículas magnéticas deben tener una alta permeabilidad para facilitar su magnetización permitiendo ser atraídas rápidamente por los campos de fuga; a su vez deben tener baja retentividad magnética con el fin de que no retenga magnetismo residual, permitiendo ser fácilmente removidas (A275-American Society for Testing and Materials, 2014).

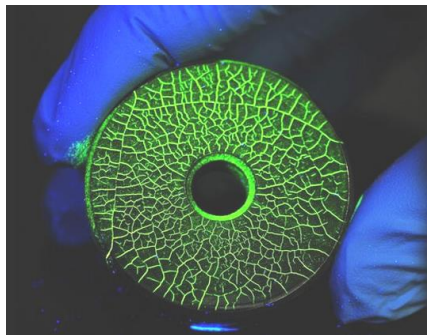
Las partículas pueden ser de dos tipos secas o húmedas. Las secas se utilizan en forma de polvo y dependen del aire para que las lleve a la superficie de la pieza, por lo que se utilizan pistolas, bulbos o aplicadores tipo salero, proporcionando un alto grado de movilidad, siendo de difícil aplicación para inspecciones sobre cabeza (E1444-American Society for Testing and Materials, 2005) (BALLESTEROS, 2010).

Las partículas húmedas se utilizan en suspensión ya sea en agua o destilados del petróleo dificultando su movilidad, pero facilitando la inspección de piezas sobre cabeza o vertical, generalmente son aplicadas por aerosol, brocha o baño (Potter, 2015). Se utilizan partículas pequeñas debido a que al aumentar el tamaño tienden a decantarse y cuando se aplican en la superficie estas reducen su movilidad, quedándose quietas, lo cual dificulta enormemente su agrupación para visualizar las indicaciones de las discontinuidades.

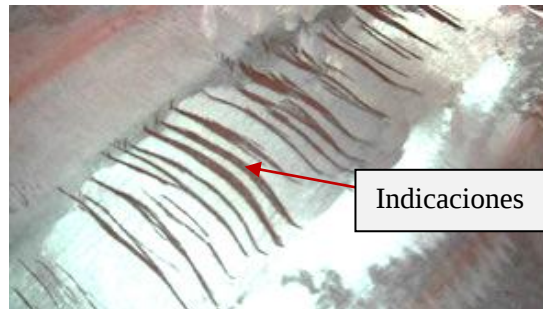
Para que la inspección sea efectiva debe existir un contraste entre las partículas y la superficie de la pieza, de manera que se tenga una óptima visualización de las indicaciones, por este motivo comercialmente hay tres tipos de partículas secas: colores visibles (ver Figura 5b) para ver bajo luz natural, colores fluorescentes (ver Figura 5a) para ver bajo radiación ultravioleta (David Moore & Bruce Graham, 2008). Las partículas de luz natural están disponibles en pigmentos grises, rojos, negros, amarillos, azules y metálicos permitiendo elegir al inspector el que mejor contraste con la superficie a inspeccionar. Los colores fluorescentes rara vez se usan en aplicaciones de partículas secas, debido a que éstas generalmente se utilizan en estructuras grandes lo que dificulta oscurecer el área de prueba, por lo tanto, los colores fluorescentes son usados en partículas húmedas para inspección de piezas pequeñas que requieran mayor sensibilidad (Hellier, 2020).

Figura 5

Sensibilidad de la corriente alterna y continua para detectar discontinuidades subsuperficiales



(a) Partículas Fluorescentes



(b) Partículas visibles

Nota. Tomado de (Soyuz, 2012) (JATUR-IRAHER, 2020).

2.5 Densidad del Campo Magnético y Curva de Histéresis

Siguiendo las instrucciones de la norma (E709-American Society for Testing and Materials, 2015) uno de los requisitos básicos para la inspección por partículas magnéticas es que la pieza debe estar adecuadamente magnetizada, de tal forma que la fuga del campo magnético generado por la discontinuidad acumule las partículas (Daniel & Pandi, 2018). Los imanes permanentes son muy útiles para estos propósitos, pero generalmente la magnetización es producida por electroimanes (Cheng, 2018).

El yugo electromagnético está diseñado con una fuente de magnetización autónoma, la cual contiene pequeños transformadores que generan baja tensión y alta corriente (Deutsch & Karl Deutsch, 2008). Al magnetizar una pieza se debe determinar la intensidad del campo magnético H definido como la fuerza magnetizante donde su unidad de medida es A/m ya que es producida por la corriente. Otro factor importante es la densidad de flujo magnético B definido como la cantidad de líneas de campo en cada punto, donde su unidad de medida es Tesla (T) y se

representa normalmente por la ecuación 1, donde se muestra la iteración lineal entre la densidad del campo y la intensidad de campo en el vacío (Fuerza Aérea, 2020).

Ecuación 1

Interacción lineal entre la densidad y la intensidad del campo en el vacío.

$$B = \mu_0 H \quad (1)$$

Nota. Siendo B la densidad de flujo magnético, H la intensidad del campo magnético y μ_0 la permeabilidad magnética en el vacío. Tomado de (Nathan Ida, 2008).

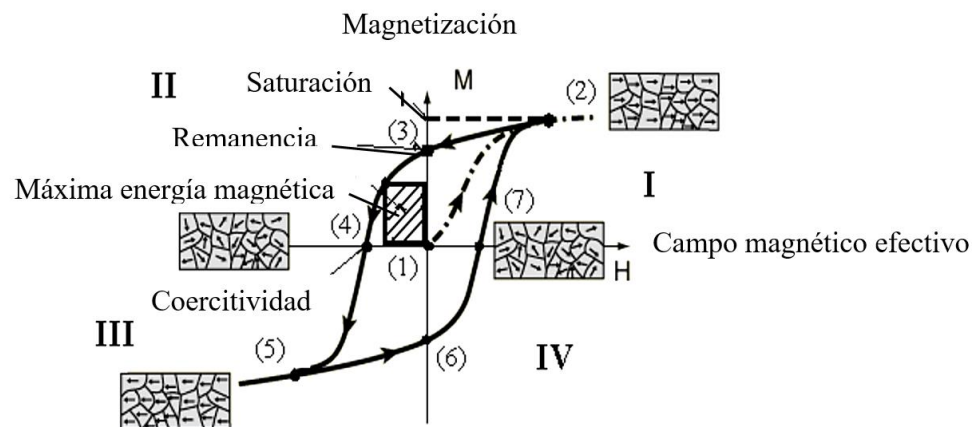
Por otra parte, la curva del ciclo de histéresis B-H muestra la relación que hay entre la densidad de campo magnético y la intensidad de éste, la relación es conocida como permeabilidad magnética, siendo una de las propiedades más importantes del material que requiera ser inspeccionado por el método de partículas magnéticas teniendo en cuenta que el valor de la permeabilidad varia de un material a otro (ALBERTO, 2014). La curva de histéresis permite identificar la intensidad del campo magnético coercitivo H_C producido cuando la curva es simétrica respecto al origen y se lleva al punto máximo de saturación, de igual forma la curva permite observar la densidad del campo magnético remanente B_r siendo éste la densidad de campo que puede mantener un material una vez se deja de aplicar el campo magnético (Paolo di Barba, 2013).

Como se puede observar en la Figura 6, al iniciar en el punto (1) de la gráfica el material no presenta magnetismo y todos sus dominios magnéticos están orientados al azar, al momento de aplicar un campo, el material comienza a magnetizarse hasta (2) siendo este paso la “curva de primera magnetización”, al llegar al punto máximo (2) se tiene una “magnetización de saturación” donde todos los dominios magnéticos están en su máxima alineación. Al retirar el campo magnético poco a poco se llega al punto (3) donde el campo es nulo, sin embargo, se

observa que el material queda con cierta intensidad de campo magnético debido al reordenamiento de los dominios, esta intensidad se denominada “magnetización remanente” siendo un parámetro importante ya que muestra la cantidad de magnetización que puede almacenar el material, esta propiedad es directamente relacionada con la microestructura del acero, reduciendo su valor al aumentar el contenido de ferrita. Al aumentar el campo en sentido opuesto hasta (4) se obtiene la “curva de desmagnetización”, con una intensidad H denominada “coercitividad intrínseca”, siendo un parámetro importante debido a que permite identificar la intensidad de campo para desmagnetizar el material, este factor aumenta con el porcentaje de carbono en los aceros, y se debe considerar para los procesos de desmagnetización. Si se sigue aumentando el campo en ese sentido se llega nuevamente a un punto de saturación (5) donde los dominios están alineados completamente en dirección opuesta a los del punto (2), al retirar el campo magnético poco a poco se llega al punto (6) donde el campo es nulo, pero el material queda con magnetismo residual, finalmente se aplica un campo para retornar al punto de partida donde se cierra el ciclo de histéresis magnética (HUMBERTO PEREDO, 2008).

Figura 6

Componentes de la Curva de Histéresis



Nota. Tomado de (HUMBERTO PEREDO, 2008).

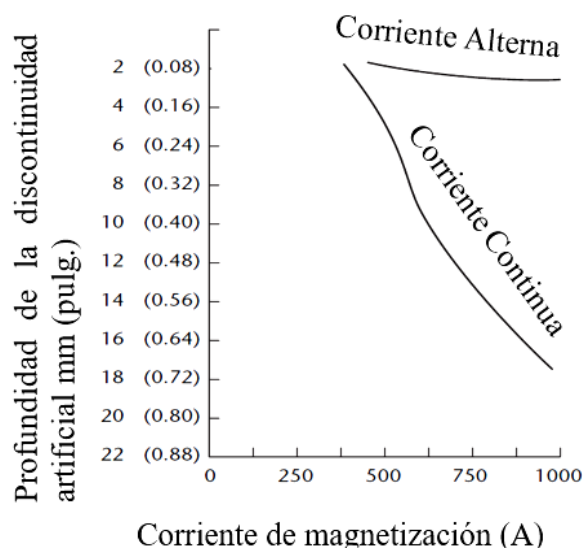
2.6 Tipos de corrientes de magnetización

En la inspección con el método de partículas magnéticas se emplean diferentes tipos de corrientes y su elección modifica completamente el objetivo del ensayo, siendo la corriente alterna la que permite una mayor movilidad de las partículas por la variación de la intensidad de manera periódica con el tiempo en forma sinusoidal, con valores de corrientes positivos y negativos, esta inversión de la corriente provoca un efecto que concentra el campo en la superficie de la pieza y comúnmente es llamado efecto piel, cuanto mayor es la frecuencia de la corriente alterna más intenso es el efecto, por esta razón la corriente alterna se utiliza para detectar discontinuidades abiertas a la superficie, esta corriente genera campos con fácil desmagnetización y su efecto pulsante del flujo facilita la movilidad de las partículas (Paweł & Dariusz, 2020). En la corriente continua se tiene lo contrario, una fase estable donde su intensidad no varía con el tiempo y el campo magnético generado es más intenso, éste se concentra en la superficie de la pieza y se distribuye linealmente hasta el centro, haciendo que el campo magnético sea penetrante, permitiendo detectar discontinuidades subsuperficiales, esto se consigue mediante el empleo de baterías o en el caso del yugo Y7 se obtiene a través de una corriente alterna rectificada de onda completa, ya que proviene de la red eléctrica.

La grafica obtenida para el conductor central al emplear el anillo de ketos (ver Figura 7), permite determinar que la corriente alterna está limitada, debido a que solo puede detectar discontinuidades superficiales y cercanas a la superficie, en caso contrario la corriente continua presenta una excelente penetración ideal para la detección de discontinuidades subsuperficiales. Según la bibliografía se esperaría que este fenómeno se comporte de manera similar para la magnetización con yugo electromagnético (Waldrop et al., 2008).

Figura 7

Sensibilidad de la corriente alterna y continua evaluada en el anillo de ketos



Nota. Tomado de *Hanbook sección 3 (Nathan Ida, 2008).*

2.7 Funcionamiento y requisitos de la fuerza del yugo electromagnético

La inspección con la técnica del yugo electromagnético requiere el cumplimiento de requisitos relacionados con la fuerza portante, el cual está determinado por la capacidad máxima de elevación de peso de un bloque de acero que va relacionada con la fuerza electromagnética del yugo, la cual se realiza con diferentes masas dependiendo de la corriente a utilizar y el espaciado entre las piernas del yugo, como se puede evidenciar en la Tabla 1 (E709-American Society for Testing and Materials, 2015).

Tabla 1*Fuerza mínima de elevación del yugo*

TIPO DE CORRIENTE	ESPACIADO ENTRE LAS PIERNAS DEL YUGO	
	2 a 4 pulg. (50 a 100 mm)	4 a 6 pulg. (100 a 150 mm)
C.A	10 libras (45 N / 4.5 Kg)	
C.C	30 libras (135 N / 13.5 Kg)	50 libras (225 N / 23.0 Kg)

*Nota. Tomado de (ASTM-E709, 2015).***2.7.1 Sistemas de verificación de intensidad de campo**

En la actualidad hay bloques y equipos que permiten verificar la dirección en que se genera el campo y la intensidad de éste, pero muy poco se sabe sobre hasta donde podría detectar una discontinuidad subsuperficial y cuál es su sensibilidad.

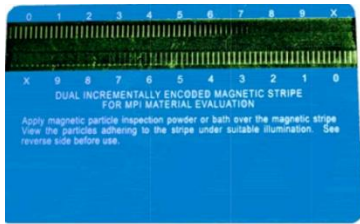
A continuación, se presentan los sistemas más conocidos (Tabla 2) para la verificación y evaluación del rendimiento de las partículas magnéticas, del mismo modo la medición de la densidad de flujo, todo esto con el fin de tener un conocimiento fundamental de las propiedades influyentes en la inspección (Caudill & Jones, 2015).

Tabla 2*Sistemas de verificación de intensidad de campo*

Figura	Descripción
A photograph of a yellow, fan-shaped magnetic field indicator with a handle. The handle has the word 'MAGNAFLUX' printed on it.	Indicador de Campo Magnético: Es un dispositivo que se utiliza como ayuda en la determinación de la dirección de los campos magnéticos para la detección de discontinuidades en metales ferrosos.



Calzas de verificación: Son un medio eficaz para la verificación de la intensidad del campo y para establecer la dirección del campo cuando se utiliza el método continuo. Las calzas deben ser de acero con bajo contenido de carbono, AMS 5062 o equivalente.



Tarjeta de Banda Magnética: Los medios magnéticos codificados en una tarjeta de banda magnética son utilizados como indicador del rendimiento de las partículas magnéticas. Estas tarjetas deben fabricarse siguiendo la norma ISO 7810 y se realizan con materiales de baja o alta coercitividad. El rendimiento de las partículas se puede clasificar sobre la base del indicador más débil.



Bloques Magnetizados Permanentemente: Se utilizan para medir la densidad de flujo, la costura entre los dos bloques de acero actúa como una discontinuidad proporcionando una fuga de flujo requerida para las indicaciones. La densidad de flujo disminuye a medida que se aumenta la distancia desde el imán afectando las indicaciones.

Nota. Tomado de (E709-American Society for Testing and Materials, 2015).

2.8 Identificación de los parámetros y los requisitos de la técnica

En esta sección se dan a conocer los requisitos y los parámetros de la técnica, los cuales se deben tener en cuenta para realizar una inspección con el yugo electromagnético (Deutsch & Karl Deutsch, 2008).

2.8.1 Requisitos de la técnica

Las piezas a inspeccionar deben ser ferromagnéticas, debido a que estos materiales se magnetizan fácilmente al inducir un campo magnético (Caudill & Jones, 2015). Las partículas magnéticas a utilizar deben tener alta permeabilidad magnética, baja retentividad y fuerza coercitiva (Paweł & Dariusz, 2020). El tamaño y la forma de las partículas es, hasta cierto punto, más crítico que la permeabilidad magnética para lograr sensibilidad y facilidad de uso, debido a

que si las partículas no son adecuadas se pueden presentar falsas indicaciones y errores en la inspección. Se recomienda utilizar una combinación de tamaños de partículas tanto finas para aumentar sensibilidad como gruesas para disminuir la naturaleza polvorienta. (David Moore & Bruce Graham, 2008). Otro requisito a tener en cuenta es el tipo de corriente que se utilizara, en este caso es la corriente continua con un campo magnético concentrado longitudinal con el fin de evaluar las discontinuidades subsuperficiales que forman un ángulo comprendido entre 45° y 90° con respecto a las líneas de fuerza utilizando el yugo Y7 (Huang & Wei Zhao, 2016).

La pieza se debe desmagnetizar al finalizar la inspección, ya que ésta generalmente queda con un magnetismo residual que interfiere con las operaciones, como por ejemplo durante el mecanizado al hacer que las virutas se adhieran al objeto de prueba y esto es perjudicial tanto para la vida útil de la herramienta como para el acabado de la pieza. También puede interferir con operaciones de soldadura al cambiar el arco y producir soldaduras potencialmente defectuosas. La desmagnetización de las piezas siempre se debe realizar con corriente alterna teniendo en cuenta que el proceso de desmagnetización es en realidad una reducción del campo residual a un nivel apropiado para el servicio o fabricación subsiguiente de la pieza (Roderic & Stanley, 2008).

2.8.2 Parámetros de la técnica

Estudios relacionados publicados en *Optimización Multiobjetivo de un Circuito Magnético para Ensayos No Destructivos por la Técnica de Fuga de Flujo Magnético*, Mfl. determinaron las variables que afectan la intensidad del campo magnético inducido a la pieza, siendo la primera la distancia entre el yugo y la pieza conocida como (*lift-off*), la cual se recomienda debe ser mínima, o incluso hacer contacto para lograr un mejor resultado, toda vez que proporcione mayor densidad del campo magnético como se puede evidenciar en la Figura 8

(c); esto debido a que existen ocasiones en donde la inspección no permite el contacto entre el yugo y la pieza. (Singh Sharatchandra & Mahadevan, 2019).

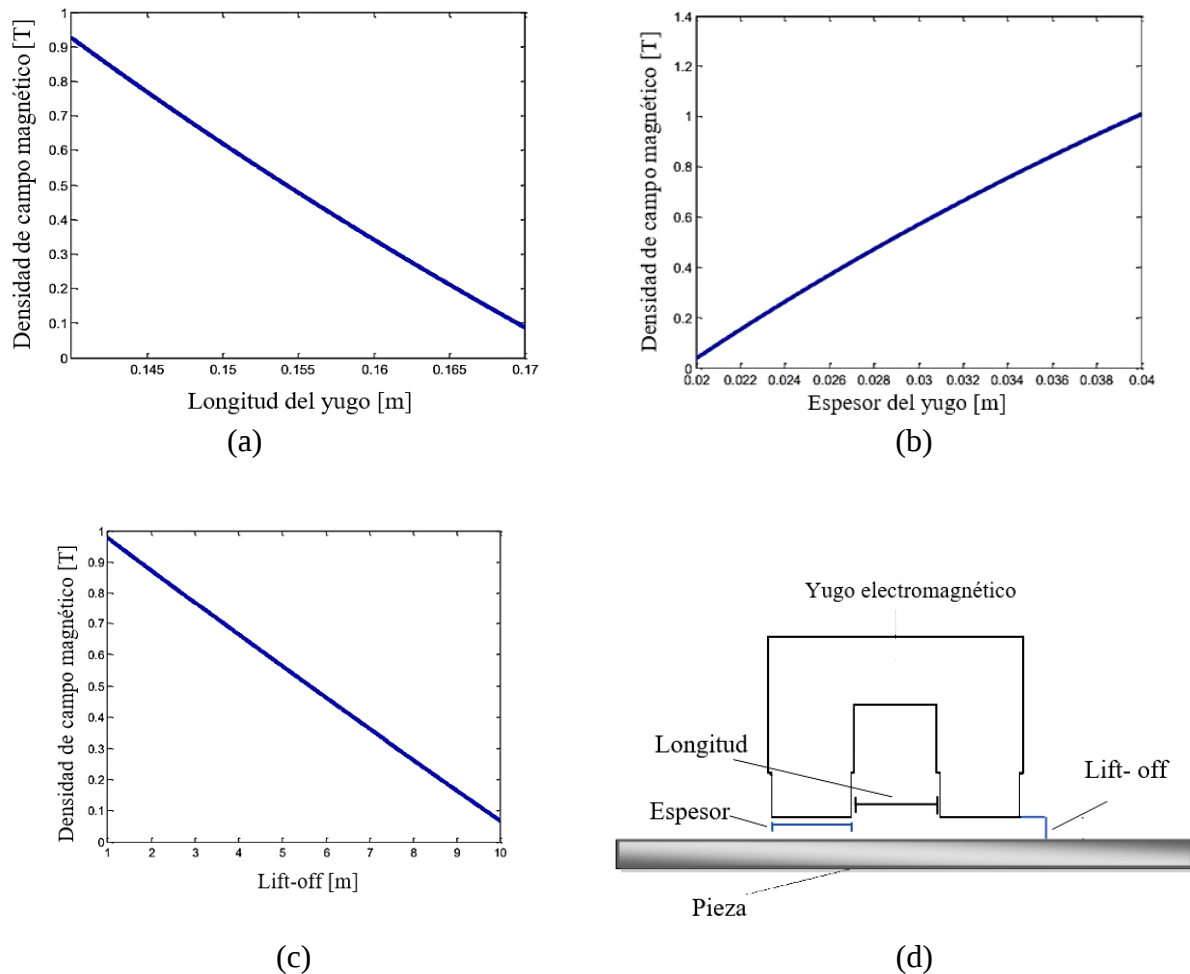
La segunda es la separación entre las piernas del yugo (longitud) la cual es inversamente proporcional a la densidad del campo magnético, como se puede observar en la Figura 8a, al aumentar la longitud entre las piernas se disminuye rápidamente la densidad del campo magnético en la pieza, esto se debe a que el flujo magnético que viaja desde el polo sur al norte tendrá que recorrer una mayor distancia, por lo que no se genera una concentración del campo en la pieza reduciendo las fugas de flujo, puesto que no se tendrá la fuerza suficiente para producirlas, por ejemplo si pasa de 14.5 cm de separación a 17 cm la densidad disminuye de 0.8 T a 0.1 T.

La tercera es el espesor de las piernas del yugo la cual es directamente proporcional al campo, como se puede observar en la Figura 8b donde al aumentar el espesor se genera una mayor densidad del campo magnético facilitando la identificación de las discontinuidades presentes en la pieza. Sin embargo, los yugos son diseñados por los fabricantes y vienen con este parámetro fijo, seleccionado previamente por el usuario (Singh Sharatchandra & Mahadevan, 2019).

A continuación, se presentan las Figuras 8a, 8b, 8c, 8d, donde se observan las relaciones anteriormente mencionadas entre la longitud (separación entre piernas), espesor del yugo y *lift-off* con la densidad del campo magnético, mostrando la importancia de estos tres parámetros para la sensibilidad.

Figura 8

Campo de fuga y generación del flujo magnético en el yugo electromagnético



Nota. Tomado de (ALBERTO, 2014).

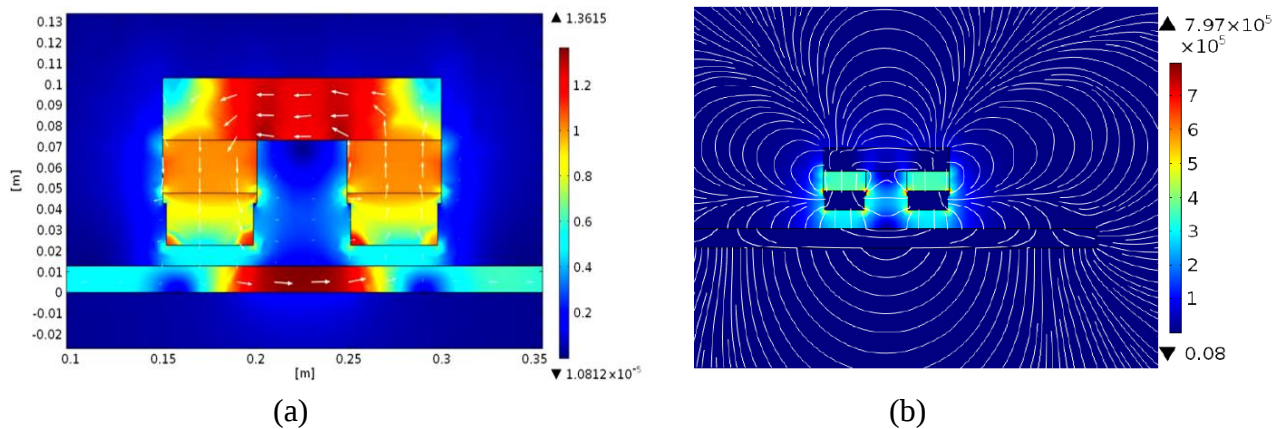
Para determinar las dimensiones optimas de los parámetros que permitan un espacio de inspección ideal, el estudio mencionado anteriormente utilizó dos tipos de algoritmos, siendo el primero un algoritmo genético, el cual permitió determinar la configuración ideal de los parámetros que cumplieran con los criterios de optimización y el segundo un algoritmo implementado por el software Matlab y simulado en Comsol basado en elementos finitos 2D

como se puede observar en la Figura 9a donde se presentó la dirección del flujo magnético y la intensidad del campo en las diferentes partes del yugo, permitiendo identificar la zona efectiva de inspección. En la Figura 9b se representa las líneas de flujo magnético alrededor del yugo.

Estos resultados fueron tenidos en cuenta en el presente trabajo para el diseño de experimentos.

Figura 9

(a) Densidad de Campo Magnético (T), (b) Intensidad de Campo Magnético (A/m)

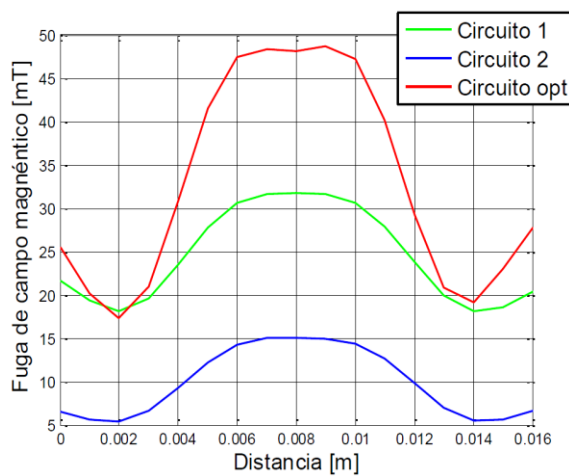


Nota. Tomado de (ALBERTO, 2014).

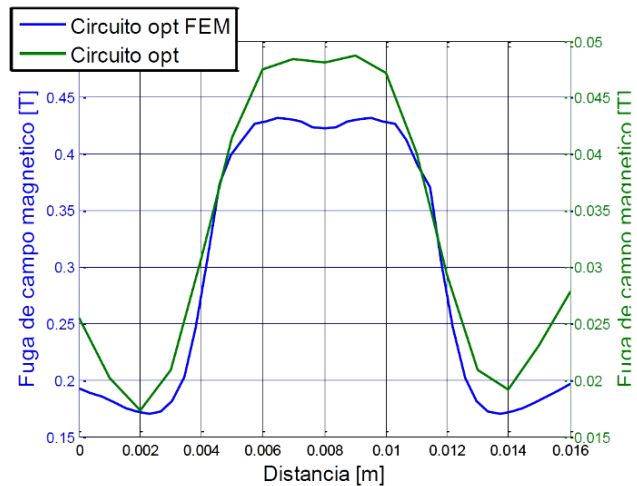
El estudio realizó dos gráficas donde presenta el comportamiento de la fuga de campo magnético basado en experimentos reales, realizando una variación en la longitud, espesor y *lift-off* (ver Tabla 3) los cuales afectan la sensibilidad analizada en la indicación, como se puede observar en la Figura 10a, donde la línea roja representa la configuración óptima para realizar la inspección. Además, se realizó una comparación entre el comportamiento real y el teórico por elementos finitos 2D del circuito optimizado observado en la Figura 10b.

Tabla 3*Circuitos reales con variaciones en sus parámetros*

	Circuito 1	Circuito 2	Circuito óptimo
Longitud del yugo (m)	0.20	0.15	0.15
Espesor del yugo (m)	0.03	0.02	0.02
Lift-off (m)	0.02	0.03	0.02

Nota. Tomado de (ALBERTO, 2014).**Figura 10***Comportamiento de la fuga de campo magnético del circuito optimizado evaluado en condiciones reales**(a) comparado con dos circuitos reales. (b) comparado con el circuito optimizado FEM 2D*

(a)



(b)

Nota. Tomado de (Parra, 2014).

En la Tabla 4 se presentan las medidas óptimas de los parámetros, para obtener un área de inspección ideal en la detección de las discontinuidades subsuperficiales. Todo esto con el objetivo de investigar la máxima profundidad que se puede detectar con el yugo electromagnético Y7 y evaluar la sensibilidad del equipo.

Tabla 4*Medidas óptimas para la inspección con yugo Y7*

Circuito Óptimo		
Longitud (m)	Espesor (m)	Liff-off (m)
0.15	0.02	0.02

Con base en todo lo expuesto, en el presente trabajo se tendrán en cuenta las siguientes variables de prueba con los factores a evaluar experimentalmente utilizando un yugo comercial, mediante el procedimiento de inspección descrito a continuación.

3. Procedimiento de inspección para evaluar la sensibilidad de detección de la técnica

A continuación, se presenta el procedimiento en tres etapas para evaluar cuantitativamente la sensibilidad y la máxima profundidad de detección de discontinuidades subsuperficiales planares utilizando el yugo electromagnético Y7.

Etapas 1. Definición de las configuraciones en las que se realizarán las mediciones

Para la selección de las configuraciones se utilizaron las variables analizadas anteriormente en la bibliografía se realizó un diseño de experimentos factorial multinivel debido a que cada factor de estudio tiene diferentes niveles, en este caso se estudiaron tres factores: el primer factor es el tipo de partículas magnéticas, el segundo la longitud entre las piernas y el tercero *lift-off*. Este experimento se realizó en el software *STATGRAPHICS*, haciendo una combinación de manera aleatoria para definir la cantidad de mediciones, las cuales podrán ser realizadas en el laboratorio para evaluar el efecto de cada variable sobre el resultado y determinar realmente cual factor presenta una mayor influencia en proporcionar la máxima profundidad de detección. Según este diseño se deben realizar 18 mediciones como se muestra en la Tabla 5 en donde la corriente continúa y el espesor de las piernas del yugo van a hacer

constantes para todas las mediciones. Los valores de la longitud se determinaron con base al estudio presentado anteriormente donde la distancia óptima para realizar la inspección se encuentra entre 15 y 30 cm y el *lift-off* se varía entre 0 y 3 cm. En cuanto a las partículas se utilizarán dos tipos: las primeras húmedas fluorescentes y la segunda seca visibles con el fin de analizar cuales generan una mejor indicación.

Tabla 5

Configuraciones para las mediciones

Número de medición	Longitud (cm)	Tipo de partículas	<i>Lift-off</i> (cm)
1	15	Húmeda	0
2	15	Húmeda	1
3	15	Húmeda	3
4	15	Secas	0
5	15	Secas	1
6	15	Secas	3
7	24	Húmeda	0
8	24	Húmeda	1
9	24	Húmeda	3
10	24	Secas	0
11	24	Secas	1
12	24	Secas	3
13	30	Húmeda	0
14	30	Húmeda	1
15	30	Húmeda	3
16	30	Secas	0
17	30	Secas	1
18	30	Secas	3

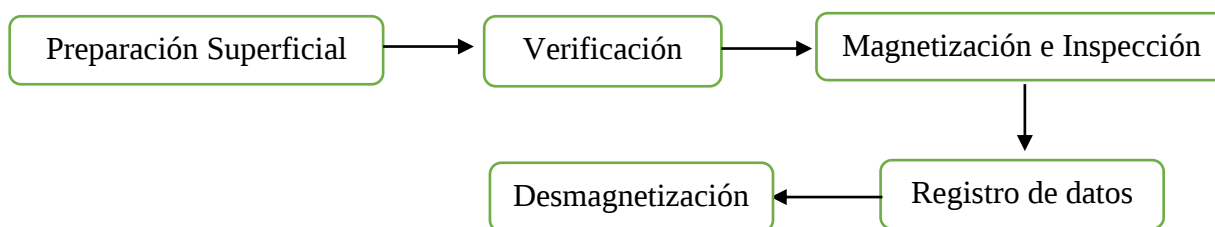
Etapa 2. Procedimiento para realizar las mediciones

En la presente etapa se da a conocer el procedimiento (ver Figura 11) para la medición de las configuraciones mostradas en la etapa 1, siguiendo las recomendaciones de la norma *E709 American Society for Testing and Materials* con el fin de obtener resultados óptimos en la inspección.

A continuación, se describe cada paso del procedimiento.

Figura 11

Flujograma del procedimiento de inspección



Para realizar la inspección, se debe realizar una preparación superficial con el fin de evitar falsas indicaciones o afectar el desplazamiento de las partículas, la limpieza se realiza según el ítem 9.2 de la norma *E709 American Society for Testing and Materials* para eliminar contaminantes como agua, grasa, aceite, entre otros, utilizando detergentes, solventes o medios mecánicos como un cepillado suave en zonas que presente óxido y cascarillas de soldadura o del proceso de fabricación del material. Así mismo es esencial que la superficie de la pieza se seque completamente para que las partículas en polvo tengan un óptimo desplazamiento en la pieza. El secado se puede realizar con horno de secado, chorro de aire caliente o a temperatura ambiente. (Serrano, 2015). Seguidamente se configura el yugo en corriente continua y se realiza la verificación de la fuerza de magnetización según el ítem 20.3.7. de la norma *E709 American Society for Testing and Materials*. Una vez el equipo esté en condiciones de operación se

magnetiza la pieza ubicando el yugo sobre el bloque, de tal forma que la discontinuidad quede en el centro de las piernas y posteriormente se aplica las partículas magnéticas utilizando el método continuo siguiendo el ítem 8.4. de la norma *E709 American Society for Testing and Materials*. Este proceso se debe hacer 18 veces para cada discontinuidad teniendo en cuenta las variables mencionadas anteriormente variando tipo de partícula, longitud y *lift-off* según la Tabla 5. Finalmente se realiza un registro de los datos obtenidos y se desmagnetiza la pieza con corriente alterna según el ítem 18.2.3 de la norma *E709 American Society for Testing and Materials*, desplazando el yugo en dirección opuesta a la que se realizó la magnetización con movimientos circulares. Al finalizar se debe limpiar la pieza con aire comprimido si se utilizaron partículas secas y para las húmedas se debe secar y retirar las partículas con un cepillo, detergente o disolvente.

Etapas 3. Análisis estadístico de los datos

En esta etapa se recopilarán los datos tomados en el laboratorio registrando la profundidad máxima de la discontinuidad que se detectó, según el bloque patrón diseñado en la siguiente etapa. Posteriormente se deberá realizar un estudio de varianza y de efecto según el análisis de Pareto en el software STATGRAPHICS para analizar el efecto de cada variable sobre el resultado y determinar cuál tiene mayor influencia, identificando una posible combinación que presente mayor capacidad de detección de discontinuidades subsuperficiales y la posible combinación que presente la peor condición para su detección.

De esta forma será evaluada cuantitativamente la sensibilidad de detección de discontinuidades subsuperficiales con el yugo electromagnético Y7.

4. Diseño del Bloque de Verificación.

Se realizó un diseño del bloque para la verificación de la sensibilidad de discontinuidades subsuperficiales, utilizando los parámetros estudiados anteriormente, como: corriente continua, partículas magnéticas, longitud y *lift-off* teniendo en cuenta las dimensiones del yugo electromagnético Y7. Se estudiaron dos opciones para fabricar las discontinuidades, una en forma de entallas y otra en forma de barrenos. Al analizar la bibliografía se pudo identificar que los bloques de verificación que existen para medir la profundidad de detección utilizan barrenos y para la medición del alcance del campo magnético en discontinuidades abiertas a la superficie se utilizan entallas, por este motivo se seleccionaron las discontinuidades artificiales tipo barrenos, tomando como referencia el método de verificación del anillo de Ketos para el conductor central, técnica que ha sido de mayor estudio y ya cuenta a nivel de norma con el procedimiento para cuantificar el alcance de la magnetización según el nivel de corriente y variables de esta técnica, aspecto propuesto en el presente trabajo para el yugo electromagnético.

Se aconseja fabricar los barrenos por electroerosión ya que se puede controlar con mayor exactitud las dimensiones requeridas con cortes precisos y finos, además el material se extrae sin tener contacto físico evitando posibles fisuras, deformaciones o cambios microestructurales. Sin embargo, los procesos de mecanizado por arranque de viruta con broca realizados con alta precisión pueden ser utilizados también.

Para determinar el número de barrenos se utilizó la ecuación 2 la cual identifica la cantidad de muestras necesarias para realizar un estudio, en este caso con un nivel de certeza del 80 % y error del 20% se determinó que se deben realizar 10 barrenos.

Ecuación 2*Tamaño de Muestra Infinita*

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2} \quad (2)$$

Nota. Donde n es el tamaño de la muestra, Z es el parámetro estadístico que depende del nivel de confianza, e es el error de estimación máximo aceptado, p la Probabilidad de que ocurra el evento y q = (1-p) la probabilidad de que no ocurra el evento.

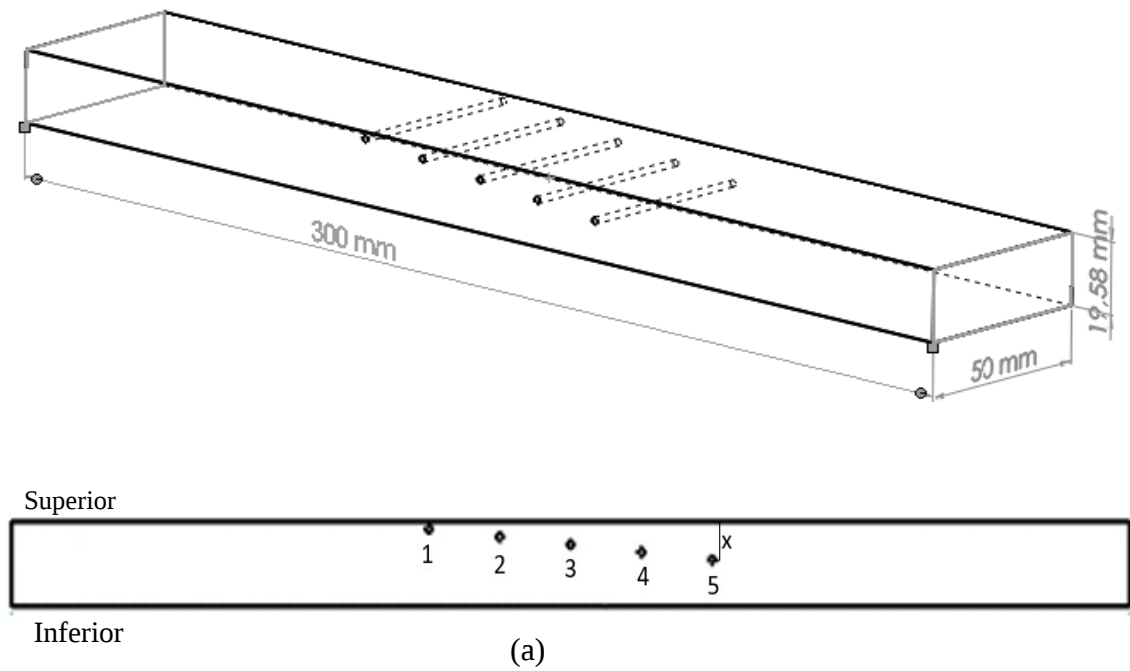
$$n = \frac{1.28^2 * 0.5 * 0.5}{0.2^2} = 10$$

En la Figura 12a se presenta el diseño del bloque con discontinuidades artificiales en forma de barreno con un diámetro de 1,78 mm y una distancia entre discontinuidades de 19 mm, medidas que fueron tomadas con base al anillo de ketos, de igual forma las dimensiones del bloque se asignaron con base a las medidas del yugo electromagnético Y7.

El diseño está conformado por 5 barrenos los cuales permiten verificar 10 profundidades, utilizando el mismo bloque inspeccionados en dos posiciones (las dos caras) como se muestra en la Figura 13a cara superior y la Figura 13b cara inferior. La profundidad de cada barreno medida desde la cara superior es de 1.78 n mm donde n representa el barreno. Las distancias desde la superficie superior e inferior se pueden apreciar en la Tabla 6 y en la Tabla 7, respectivamente.

Figura 12

Diseño del bloque de calibración (a) 3D (b) 2D con dimensiones

**Figura 13**

Posiciones del bloque

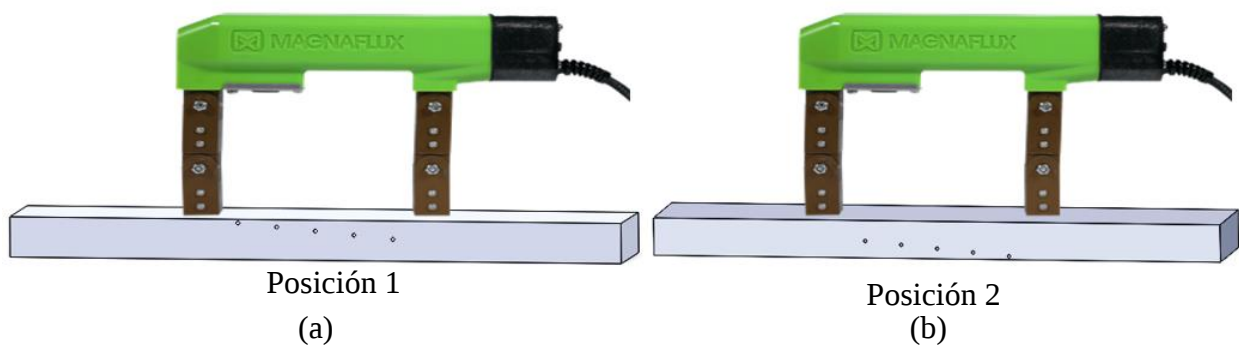


Tabla 6*Profundidad de los barrenos posición 1*

Posición 1					
Barreno	1	2	3	4	5
Distancia x (mm)	1.78	3.56	5.34	7.12	8.9

Tabla 7*Profundidad de los barrenos posición 2*

Posición 2					
Barreno	6	7	8	9	10
Distancia x (mm)	10.68	12.46	14.24	16.02	17.8

6. Conclusiones

Por medio de la revisión bibliográfica se determinaron las variables de la técnica siendo la principal el tipo de corriente a utilizar, donde la corriente continua presento una mayor penetración en comparación a la corriente alterna como era de esperarse. Otra variable analizada fue el tipo de las partículas magnéticas, debido a que presentan gran importancia ya que estas revelan la indicación, siendo las partículas fluorescentes las que tienen alta sensibilidad, permitiendo observar las indicaciones más pequeñas y profundas. Finalmente, se analizó la densidad del campo magnético identificando que puede aumentar o disminuir al variar factores como el *lift-off*, el espesor y la longitud entre las piernas del yugo electromagnético Y7.

Se propuso un procedimiento para evaluar cuantitativamente la sensibilidad de detección de discontinuidades subsuperficiales, realizando un experimento factorial multinivel en el software *STATGRAPHICS* con configuraciones aleatorias de las variables, para identificar la cantidad de mediciones que se deberán realizar en el laboratorio, con el fin de determinar la configuración adecuada que permita obtener la mayor sensibilidad en cuanto a la profundidad de detección del yugo electromagnético Y7 y el menor número de mediciones a realizar.

Se realizó el diseño de un bloque para la verificación de la máxima profundidad que puede detectar el yugo electromagnético Y7, teniendo en cuenta las variables de longitud, espesor de las piernas del yugo y *lift-off*, utilizando 5 discontinuidades artificiales tipo barreno, con el fin de medir diez profundidades diferentes al inspeccionar el bloque en dos posiciones, ubicando el yugo por cada cara.

Referencias Bibliográficas

- A275-American Society for Testing and Materials. (2014). Standard Practice for Magnetic Particle Examination of Steel Forgings Using. *American Society for Testing of Materials*, 4–9. <https://doi.org/10.1520/A0275>
- Agustin, H. Y. P. (2010). Detección de caracteres obliterados en acero 1095, mediante el método de inspección con partículas magnéticas. *Universidad de San Carlos de Guatemala*.
- ALBERTO, J. (2014). *OPTIMIZACION MULTIOBJETIVO DE UN CIRCUITO MAGNETICO PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR LA TECNICA DE FUGA DE FLUJO MAGNETICO*.
- Ángel, M., & Pozueta, R. (2014). Materiales y Circuitos Magnéticos. *Universidad de Cantabria*, 2, 1–48.
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code. (2019). Nondestructive Examination Section v. *An International Code*.
- BALLESTEROS, A. (2010). ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ANSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN AMBIENTES MARINOS. *International Institute for Environment and Development*, 07/80(2), 125. <https://arxiv.org/pdf/1707.06526.pdf><https://www.yrpri.org><http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000><https://www.fordfoundation.org/>http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/Republica_Dominicana/ccp/20120731051903/prep<http://webpc.ia>
- Barter. (2012). Typical fatigue-initiating discontinuities in metallic aircraft structures. *International Journal of Fatigue*, 41, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.10.017>

- Basili, R., & Burrato, P. (2021). Operating manual. *Annals of Geophysics*, 44(4 SUPPLEMENT), 835–888.
- Bernal Reinoso, C. F. (2014). *Estudio técnico e implementación del laboratorio de ensayos no destructivos (END) para el área de ciencia y tecnologías de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*. 214.
- Bunge, J., & Magallanes, D. (2010). Ensayos no Destructivos. *Universidad Politécnica de Cataluña*, 27–61.
- Caudill, G., & Jones, T. (2015). *Reference Standards for Magnetic Particle Testing Chapter 10 Handbook*.
- Cheng, W. (2018). Signal Characteristics of Circular Induction Coil Influenced by Scanning Spatial Location in MFL. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35(2).
<https://doi.org/10.1007/S10921-016-0347-7>
- Daniel, J., & Pandi, S. (2018). *Detection and Classification of Discontinuities using Discrete Wavelet Transform and MFL Testing*.
<https://ndtlibrary.asnt.org/2018/DetectionandClassificationofDiscontinuitiesusingDiscreteWaveletTransformandMFLTesting>
- David Moore, & Bruce Graham. (2008). *Magnetic Particles Chapter 7- Handbook*.
- Deutsch, V., & Karl Deutsch. (2008). *Magnetization Chapter 4- Handbook*.
<https://www.soyuz.mx/ensayos-no-destructivos/particulas-magneticas/>
- E1444-American Society for Testing and Materials. (2005). Standard Practice for Magnetic Particle Testing 1. *American Society for Testing of Materials*, 1–20.
<https://doi.org/10.1520/E1444>
- E709-American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Guide for Magnetic Particle

- Examination 1. *American Society for Testing of Materials*, 1–38.
<https://doi.org/10.1520/E0709-15.2>
- Fuerza Aérea. (2020). *Partículas-Magnetizables*.
- Hellier, C. J. (2020). *Manual de evaluación no destructiva*, 3E (E. McGraw-Hill (ed.); 3rd, ilustra ed., Vol. 148).
- Huang, S., & Wei Zhao. (2016). *Magnetic Flux Leakage: Theories and Imaging Technologies*.
<https://books.google.com.co/books?id=qz57DQAAQBAJ&pg=PA12&lpg=PA12&dq=Modeling+of+the+yoke-magnetization+in+MFL-testing+by+finite+elements&source=bl&ots=3rw8-Yf496&sig=ACfU3U1-r0d3c-AE3bMesqVmxtWuUSjeQg&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiPzeDK6qbzAhV4TDABHTojBLUQ>
- HUMBERTO PEREDO. (2008). *Substitución de Fe³⁺ por Iones de Aluminio en Hexaferrita de Bario BaFe₁₂O₁₉*. 1–83.
- ILOG S.A. (2013). *Partículas Magnéticas. Academisa Group of Companies*, 1–138.
<http://www.ademinsa.com/archivos/746>
- Infobrother. (2017). *NDT - Direct Magnetization*.
<http://www.infobrother.com/Tutorial/NDT/NDT-direct-magnetization>
- InfoBrother. (2017). *NDT - Indirect Magnetization*.
<http://www.infobrother.com/Tutorial/NDT/NDT-indirect-magnetization>
- JATUR-IRAHER. (2020). *Ensayo por Partículas Magnéticas*.
<https://jaturiraher.com/postensayoparticulasmagneticas/>
- Kaletsch. (2021). Influence of high initial porosity introduced by laser powder bed fusion on the fatigue strength of Inconel 718 after post-processing with hot isostatic pressing. *Additive*

- Manufacturing*, 47(March), 102331. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102331>
- Kulchytsky, G. (2016). *Prevención de la congelación del tanque de partículas magnéticas cuando se utilizan baños de partículas de agua*.
<https://ndtlibrary.asnt.org/2006/PreventingMagneticParticleTankFreezingWhenUsingWaterParticleBaths>
- Magnaflux. (2018). *YM-5 Yugo Electromagnética para END*.
<https://magnaflux.mx/Productos/Inspeccion-por-Particulas-Magneticas/Equipo/YM-5.htm>
- Magnaflux. (2021). *Y-7 Yugo Electromagnético para END*.
<https://magnaflux.mx/Productos/Inspeccion-por-Particulas-Magneticas/Equipo/Y-7.htm>
- Mehta, B. (2015). *Análisis de grietas superficiales y subsuperficiales en muestras de acero al carbono mediante pruebas de partículas magnéticas y pruebas de penetración de líquidos*.
<https://ndtlibrary.asnt.org/2015/SurfaceandSubsurfaceCrackAnalysisinCarbonSteelSamplesusingMagneticParticleTestingandLiquidPenetra>
- Moore, & Patrick. (2020). *Nondestructive Testing Handbook. American Society for Nondestructive Testing*.
- Murillo Sigero, A. (2010). *Análisis De Defectos Y Como Evitarlos En Soldaduras De Arco Smaw Y Saw Longitudinales Y Circunferenciales En Ductos De Transporte De Hidrocarburos*. 52.
[https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/269/1/MONO-ETSI-MURILLO.SIGERO %283%29.pdf](https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/269/1/MONO-ETSI-MURILLO.SIGERO%283%29.pdf)
- Nathan Ida. (2008). *Magnetism Chapter 3 Handbook*.
- Panchano, C. R. (2011). *Diseño Y Construcción De Un Control De Corriente Para El Equipo De Magnetización De Banco Para La Detección De Discontinuidades En Materiales Ferromagnéticos*. <http://eelalnx01.epn.edu.ec/handle/15000/3963>

Paolo di Barba, A. S. and S. W. (2013). *Field model in electricity and magnetism*.

Paweł, J., & Dariusz, K. (2020). Analytical-numerical approach to the skin and proximity effect in lines with round parallel wires. *Energies*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/en13246716>

Pérez, J., & Álvarez, A. (2017). *Manual básico - Control de la ejecución en obra de las uniones soldadas*.

Potter, R. (2015). *Magnetic Particle Testing of High Tensile Parts Used in Aerospace Applications*.

<https://ndtlibrary.asnt.org/2005/MagneticParticleTestingofHighTensilePartsUsedinAerospaceApplications>

Prejean, H. (2018). *How Nondestructive Test Methods are Applied to Tubular Products for Today's Exploration and Production of Oil and Gas*.
<https://ndtlibrary.asnt.org/2008/HowNondestructiveTestMethodsareAppliedtoTubularProductsforTodaysExplorationandProductionofOilandG>

René Edmundo Chicas Robles, & Roberto Alejandro Aguilar Rivas. (2013). *ANÁLISIS DE FISURAS EN LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ACEROS AL CARBONO SUS CAUSAS Y SOLUCIONES*.

Roderic, & Stanley. (2008). *Demagnetization Chapter 11 Handbook*. 8.

Sanjaya, S., & Srinivas, K. (2021). Detección de defectos planos en estructuras compuestas de PRFV de múltiples capas mediante resonancia magnética nuclear de campo bajo. *Materials Evaluation*, 79(9), 897–904. <https://doi.org/10.32548/2021.ME-04201>

Sheet, P. D. (2021). *Y-7 Yoke*. August, 7–8.

Singh Sharatchandra, & Mahadevan, S. (2019). *Three-Dimensional Finite Element Modeling of Magnetic Flux Leakage Technique for Detection of Defects in Carbon Steel Plates*.

- Soyuz. (2012). *Particulas Magneticas*. <https://www.soyuz.mx/ensayos-no-destructivos/particulas-magneticas/>
- Waldrop, R., Stanley, R. K., & Satish. (2008). *Fundamentals of Magnetic Testing Chapter 2 Handbook*.
- Yin, S., & Wei, Y. (2017). Failure analysis of weld crack of P92 steel. *Key Engineering Materials*, 737 KEM, 50–55. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.737.50>