

Evaluación de la sensibilidad de detección de discontinuidades ideales
subsuperficiales para la técnica de inspección por partículas
magnéticas utilizando el yugo electromagnético

Jairo Andrés García Tapias

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla
PhD en Ingeniería de Materiales

Codirectora

Ana María Pérez Ceballos
PhD en Ingeniería

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Santander
2025

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi familia, cuyo apoyo ha sido mi mayor fortaleza. A mis padres, abuelos y tíos por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia; y por estar presentes en cada etapa de mi vida con amor, comprensión y fe en mis capacidades.

También dedico este logro a quienes, con pequeñas acciones, palabras o gestos, me impulsaron a seguir adelante en los momentos difíciles.

Este trabajo es para ustedes, con profunda gratitud y cariño.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

En primer lugar, a mi director de trabajo de grado, Carlos Andrés Galán Pinilla, por su valiosa orientación, paciencia y conocimientos compartidos a lo largo del proceso. Su guía fue fundamental para el desarrollo de esta investigación.

A los profesores que me acompañaron a lo largo de la carrera, por contribuir a mi formación académica y profesional durante estos años.

Agradezco también a la universidad, por facilitar los equipos y recursos necesarios para la ejecución de las pruebas experimentales.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo incondicional, colaboración y palabras de aliento en los momentos más exigentes.

Y, por supuesto, a mi familia, por su constante respaldo, confianza y amor incondicional a lo largo de todo este camino.

Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Marco teórico	10
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo general.....	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. Metodología experimental	16
3.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica sobre la inspección por el método de partículas magnéticas empleando el yugo electromagnético	16
3.2 Etapa 2: Identificar las variables de operación y parámetros de la técnica por magnetización del yugo electromagnético.....	17
3.3 Etapa 3: Fabricar el bloque de referencia con discontinuidades planares ideales.	20
3.4. Etapa 4: Evaluar el efecto de la profundidad y sensibilidad de detección de la técnica.....	23
3.5 Etapa 5: Análisis de resultados.	26
3.6 Etapa 6: Elaboración del informe final.	26
4.Resultados y análisis	27
5. Conclusiones	47
6. Recomendaciones	49
Referencias Bibliográficas	50

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones del bloque de referencia fabricado	22
Tabla 2. Diseño factorial de múltiples niveles.....	23
Tabla 3. Número de corridas aleatorizadas para cada entalla	24
Tabla 4. Resultados de detección de las 5 discontinuidades por corrida experimental	27
Tabla 5. Resultados de detección de la primera discontinuidad	30
Tabla 6. Resultados de detección de la segunda discontinuidad	32
Tabla 7. Resultados de detección de la tercera discontinuidad	35
Tabla 8. Resultados de detección de la cuarta discontinuidad.....	37
Tabla 9. Resultados de detección de la quinta discontinuidad.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Fuga en el flujo del campo magnético en discontinuidad superficial y subsuperficial.....	10
Figura 2. Magnetización con yugo electromagnético	13
Figura 3. Flujograma de la metodología.....	16
Figura 4. Dimensiones del bloque de referencia con discontinuidades planares ideales.....	21
Figura 5. Distancias de profundidad de las 5 discontinuidades subsuperficiales mecanizadas.....	22
Figura 6. Distancias de lift-off controladas con bloques de madera de a)15 mm y b)30 mm	25
Figura 7. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de las discontinuidades detectadas	43
Figura 8. Grafica de efectos principales de las discontinuidades detectadas.....	45

Resumen

Título: Evaluación de la sensibilidad de detección de discontinuidades ideales subsuperficiales para la técnica de inspección por partículas magnéticas utilizando el yugo electromagnético.¹

Autor: Jairo Andrés García Tapias²

Palabras claves: Ensayos no destructivos, Yugo electromagnético, Discontinuidades subsuperficiales, Lift-off, Sensibilidad de detección.

Descripción: Este estudio evaluó la sensibilidad de detección de discontinuidades subsuperficiales de morfología planar mediante la técnica de partículas magnéticas utilizando el yugo electromagnético como técnica de magnetización. Se identificaron variables operativas críticas, como la separación entre polos, el lift-off y el tipo de partículas empleadas, y se diseñó un bloque de referencia en acero ASTM A36 con entallas de distintas profundidades para representar discontinuidades ideales. A través de un diseño de experimentos factorial multinivel y bajo condiciones controladas conforme a los requisitos establecidos en la norma ASME Sección V y las normas ASTM E709 y E1444, se analizaron los efectos de cada variable sobre la sensibilidad y capacidad de detección. Los resultados revelaron combinaciones de parámetros con alta sensibilidad de la técnica, así como limitaciones bajo ciertas configuraciones. Finalmente, se identificaron tendencias significativas mediante análisis estadísticos, incluyendo gráficos de Pareto y de efectos principales, lo cual permitió establecer conclusiones respecto al comportamiento del campo magnético y la acumulación de partículas en función de la geometría y configuración del ensayo.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. PhD. en Ingeniería de Materiales. Codirector: Ana María Pérez Ceballos. PhD. en Ingeniería.

Abstract

Title: Evaluation of the detection sensitivity of subsurface ideal discontinuities for magnetic particle inspection using the electromagnetic yoke.¹

Author: Jairo Andrés García Tapias²

Keywords: Non-Destructive Testing, Electromagnetic Yoke, Subsurface Discontinuities, Lift-off, Detection Sensitivity.

Description: This study evaluated the detection sensitivity of subsurface planar discontinuities using the magnetic particle testing method, employing an electromagnetic yoke as the magnetization technique. Key operating variables such as pole spacing, lift-off distance, and type of magnetic particles were identified. A reference block was fabricated using ASTM A36 carbon steel with notches of varying depths to represent ideal discontinuities. Through a multilevel factorial experimental design and under controlled conditions in accordance with ASME Section V and ASTM standards E709 and E1444, the effects of each variable on detection sensitivity were analyzed. The results revealed parameter combinations that enhanced technique sensitivity, as well as limitations under certain configurations. Significant trends were identified through statistical analyses, including Pareto and main effects plots, enabling conclusions regarding the behavior of the magnetic field and particle accumulation based on test geometry and setup configuration.

¹ Degree work

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. PhD. en Ingeniería de Materiales. Codirector: Ana María Pérez Ceballos. PhD. en Ingeniería.

Introducción

Actualmente, los Ensayos No Destructivos (END) desempeñan un papel crucial en la inspección de piezas metálicas, tanto en servicio como durante su fabricación. Su aplicación permite detectar discontinuidades y mecanismos de daño, sin alterar las propiedades o la forma de los componentes, lo que ayuda a prevenir la reducción en la capacidad de carga o fallas que podrían generar pérdidas humanas y económicas (Hellier, 2013).

Entre los métodos disponibles, la inspección con Partículas Magnéticas destaca por su rapidez y versatilidad, especialmente en la detección de discontinuidades planares como las grietas, tanto superficiales, como subsuperficiales (Goñi Córdoba & Fernández Carrasquilla, 2014). Dentro de este método, la magnetización localizada con el yugo electromagnético es ampliamente utilizada debido a su portabilidad y facilidad de manejo. Sin embargo, existen pocos estudios cuantitativos que permitan determinar con precisión el alcance máximo de detección de discontinuidades, tanto en profundidad como en sensibilidad para discontinuidades superficiales y subsuperficiales. Aunque las normas incluyen información parcial sobre estas características, y algunos métodos de verificación de capacidad portante, no existe suficiente información en la investigación científica o comercial que establezca el alcance ni un procedimiento estandarizado para medirlas.

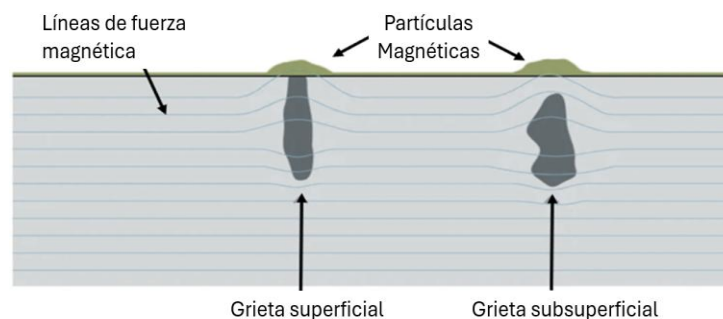
Ante esta necesidad, surge la siguiente pregunta: ¿Es posible identificar una combinación de variables para inspección de discontinuidades subsuperficiales que maximice la profundidad de detección y la sensibilidad del yugo electromagnético? Para responderla, se llevó a cabo un estudio basado en un análisis teórico de los parámetros de inspección conjuntamente con el diseño y fabricación de un bloque de referencia con discontinuidades ideales inducidas con dimensiones controladas. A través de un diseño de experimentos propuesto, se determinó la máxima profundidad de detección y la sensibilidad del método, proporcionando información cuantitativa clave para optimizar su aplicación.

1. Marco teórico

El Ensayo No Destructivo, END, de partículas magnéticas permite detectar grietas y otras discontinuidades de morfología planar en la superficie o a una cierta profundidad en materiales ferromagnéticos. Las pruebas de partículas magnéticas se pueden aplicar a la materia prima, material semielaborado, material terminado y soldaduras, tanto tratadas térmicamente como en estado de suministro (ASTM E709, 2021). Este método consiste en magnetizar el área a examinar, aplicando partículas magnéticas preparadas adecuadamente mientras se magnetiza el área y, posteriormente, interpretar y evaluar las acumulaciones de partículas resultantes. La máxima sensibilidad ocurre cuando la discontinuidad se encuentra en la superficie y es perpendicular al flujo magnético inducido en el material (ASTM E1444, 2022). Por lo anterior, si el material magnético presenta discontinuidades planares, éstas actuarán como polos magnéticos, generando un campo de fuga, y por tal, atraerán cualquier material ferromagnético, partículas finamente divididas en este caso, que estén cercanas. De esta forma, un metal magnético puede ser magnetizado local o globalmente y se le pueden esparcir sobre su superficie, pequeñas partículas magnéticas y así observar cualquier acumulación de estas, lo cual evidencian la presencia de discontinuidades superficiales o subsuperficiales en el metal como se puede observar en la figura 1 (ASNT, 2008).

Figura 1.

Fuga en el flujo del campo magnético en discontinuidad superficial y subsuperficial.



Nota. La imagen representa la acumulación de partículas en los puntos de fuga. Adaptado de: MetrooMat (s.f.). <https://metroomat.com/tintas-liquidos-penetrantes-particulas-magneticas-deteccion-defectos/>

Las discontinuidades superficiales se refieren a interrupciones físicas en la estructura de un material que pueden afectar la apariencia, la integridad estructural o las propiedades funcionales. Estas discontinuidades pueden tener diferentes causas y manifestarse de diversas maneras. Las grietas, pueden llegar a ser muy finas, aun así, producen patrones nítidos con este método de inspección (ASTM E709, 2021).

Las discontinuidades subsuperficiales se refieren a irregularidades o cambios físicos que ocurren en las capas más externas o cercanas de la superficie de un material, pero que no son visibles o abiertas en la superficie, pero que pueden afectar la integridad. Estas discontinuidades pueden tener diversas causas y manifestaciones, son importantes en diversas aplicaciones, ya que pueden afectar la durabilidad, la resistencia y la apariencia de los materiales y estructuras (Kato, Fujimura, Hiramatsu, & Yamamoto, 2021). Por lo tanto, la inspección adecuada es necesaria para identificar y gestionar estos tipos de discontinuidades.

Las discontinuidades subsuperficiales producen indicaciones menos claras que aquellas abiertas a la superficie. Los patrones tienden a ser amplios, en lugar de nítidos, dado que las partículas pueden generar patrones que tienden a estar menos agrupadas (ASTM E709, 2021).

Principalmente este método establece un campo magnético con alta densidad de flujo en el material ferromagnético. Las líneas de flujo deben extenderse cuando pasan a través de material no ferromagnético como el aire en una discontinuidad. Debido a que las líneas de flujo no pueden cruzarse, esta acción de esparcimiento puede forzar que algunas de las líneas de flujo salgan del material. La fuga de flujo también es causada por la reducción del material ferromagnético, como

un cambio de sección transversal o el final de la pieza. Si bien existen variaciones en el método de partículas magnéticas, todas dependen de este principio que establece que, las partículas magnéticas serán retenidas en los lugares de fuga de flujo magnético. La intensidad del campo de fuga de flujo en las discontinuidades se ha reportado que depende principalmente de los siguientes factores: características y densidad de flujo magnético en el material, el cual es variable desde la superficie hasta el núcleo de la pieza, al igual que del tamaño, orientación, morfología y proximidad de la discontinuidad a la superficie (ASTM E709, 2021).

La magnetización se lleva a cabo usando campos magnéticos inducidos por corrientes eléctricas. La corriente eléctrica aplicada puede ser continua, alterna o rectificada. El campo magnético generado por la corriente es más profundo cuanto menor es la frecuencia, por lo que con corriente continua (CC) pueden detectar defectos a mayor profundidad que con corriente alterna (CA). La corriente alterna, se utiliza para defectos superficiales o de pequeña profundidad. En este caso la alternancia de campos invierte la polaridad sometiendo a las partículas magnéticas a una agitación que facilita su desplazamiento y, en consecuencia, su atracción por los campos de fuga. También pueden usarse corrientes rectificadas con las que se consigue el efecto beneficioso de la corriente alterna, por producir agitación en las partículas magnéticas, mientras que el sentido único de polaridad permite tener una mayor penetración al igual que con corriente continua (ASNT, 2008).

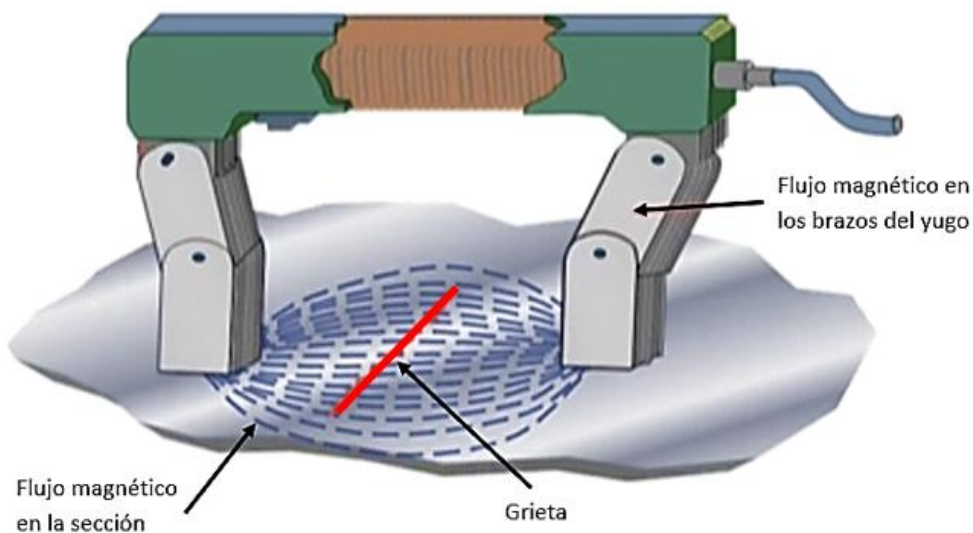
Cualquiera que sea la técnica empleada para producir el flujo magnético en la pieza, tanto circular como longitudinal, la máxima sensibilidad se obtendrá con las discontinuidades lineales orientadas perpendicularmente a las líneas de flujo magnético, por lo que se requieren al menos dos magnetizaciones perpendiculares entre sí para llegar a evaluar todas las posibles discontinuidades en cada área a ser examinada. Los equipos de magnetización empleados para este método son: yugo electromagnético, bobina y los que producen campos magnéticos circulares

(Flores Barrera, 2009).

Los yugos electromagnéticos consisten en un enrollamiento de cable sobre un cuerpo en forma de “U” hecho de hierro blando, sus brazos pueden ser fijos o articulados, los cuales sirven para ajustarse de acuerdo con la pieza a examinar. Este yugo puede ser diseñado para trabajar con CC y CA. Cuando se trabaja con CC, hay una mayor penetración del campo mientras con CA el campo magnético se concentra en la superficie de la pieza, dando mejor sensibilidad para discontinuidades superficiales sobre una amplia zona. En general, las discontinuidades al ser reveladas deberían estar entre los dos polos del yugo y orientadas perpendicularmente a la línea imaginaria que los conecta como se observa en la figura 2 (Meléndez, 2013).

Figura 2.

Magnetización con yugo electromagnético.



Nota. La imagen representa la magnetización localizada mediante el yugo electromagnético.

Adaptado de: TWI Ltd. (s.f.). <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/non-destructive-examination-nde-part-1-liquid-penetrant-and-magnetic-particle-inspection-122>

Las partículas utilizadas pueden aplicarse en seco o húmedas en suspensión en líquidos como agua o aceite; dichas partículas pueden ser tanto de color rojo, anaranjado, gris o de otros colores y, fluorescentes, para facilitar su visualización en la pieza sujeta a ensayo (ASME V Art. 7, 2023). Una vez las partículas esparcidas sobre la pieza se acumulan en las fugas de campo magnético, estas se visualizan bajo condiciones óptimas de iluminación proporcionando al inspector una indicación (AWS An American National Standard, 2019), la cual será valorada por medio de normas o códigos, como ASME SEC V y AWS D1.1, para su respectiva aceptación o rechazo (ASTM E709, 2021).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la sensibilidad de detección de discontinuidades ideales subsuperficiales de morfología planar utilizando la técnica de magnetización por yugo electromagnético.

2.2 Objetivos específicos

Identificar las variables de operación de la técnica de magnetización empleando el yugo electromagnético y su posible efecto individual sobre el campo magnético generado.

Fabricar un bloque de referencia de acero al carbono con discontinuidades planares ideales con diferentes dimensiones.

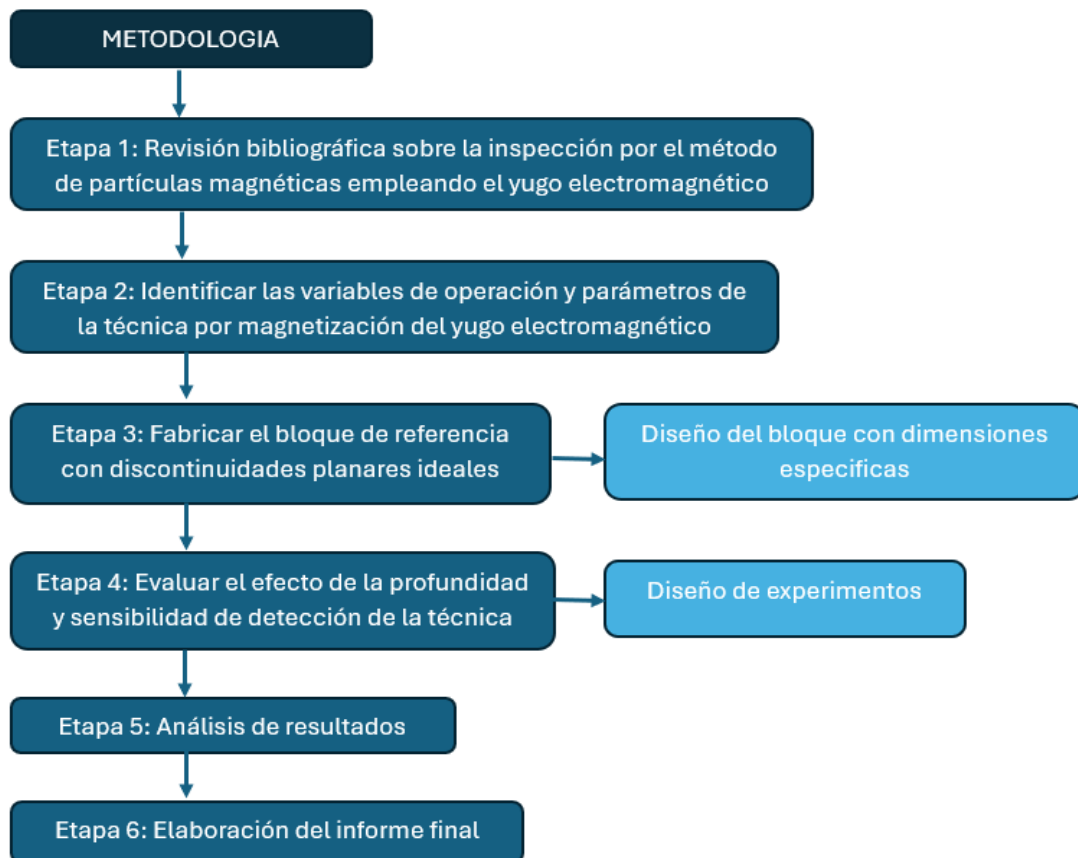
Evaluar el efecto de las variables seleccionadas sobre la profundidad y sensibilidad de detección de las discontinuidades a partir del diseño de experimentos.

3. Metodología experimental

Para cumplir con los objetivos del proyecto de investigación, la metodología se estructura en seis etapas, las cuales se presentan a continuación en la Figura 3, y seguidamente se describen.

Figura 3.

Flujograma de la metodología



3.1 Etapa 1: Revisión bibliográfica sobre la inspección por el método de partículas magnéticas empleando el yugo electromagnético:

La revisión bibliográfica se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos. Primero, se identificaron las normas más relevantes para el método de partículas magnéticas con yugo electromagnético, con el fin de comprender los requisitos, parámetros técnicos y procedimientos

recomendados. Luego se analizaron los principios físicos del ensayo de partículas magnéticas, incluyendo la generación de fugas de flujo magnético y la acumulación de partículas en las discontinuidades. Además, se estudiaron los tipos de partículas utilizadas (secas y húmedas) y su aplicación según la superficie y la sensibilidad requerida. Las principales fuentes utilizadas fueron: **ASME Sección V, Artículo 7: Procedimientos para la inspección con partículas magnéticas** (ASME V Art. 7, 2023).

ASME Sección VIII, División 1: Aplicación del ensayo en recipientes a presión y soldaduras (ASME VIII Div. 1, 2023).

ASTM E709: Guía estándar para la inspección con partículas magnéticas (ASTM E709, 2021).

ASTM E1444: Procedimiento estándar para ensayos con partículas magnéticas en materiales ferromagnéticos (ASTM E1444, 2022).

Posteriormente, se evaluaron las ventajas y limitaciones del yugo electromagnético para identificar parámetros de inspección fundamentales, como la intensidad del campo magnético, la distancia entre polos magnéticos y los tipos de corriente aplicables (CC o CA). Finalmente, la información recopilada fue organizada y sintetizada en función de los elementos clave del ensayo, como procedimientos generales, equipos y materiales necesarios, normas de referencia y criterios de inspección y aceptación, facilitando así la implementación de la metodología experimental propuesta en las siguientes etapas del proyecto.

3.2 Etapa 2: Identificar las variables de operación y parámetros de la técnica por magnetización del yugo electromagnético:

Se identificaron las variables (factores que el inspector puede modificar) y parámetros (valores establecidos por la norma) de la técnica de magnetización presentes en la inspección con yugo electromagnético, a partir de las cuales se seleccionaron para determinar su influencia en la

sensibilidad desde el punto de vista de la máxima profundidad de detección de discontinuidades subsuperficiales. De este análisis se seleccionaron las variables que fundamentan el diseño experimental, presentado en el siguiente capítulo. Asimismo, se reconocieron limitaciones en aplicación, profundidad, sensibilidad e interpretación.

Un parámetro clave que influye en el ensayo es el tipo de corriente utilizada. En este caso, dado que la investigación se centra en la detección de discontinuidades subsuperficiales, la normativa recomienda el uso de corriente continua (CC), la cual fluye en una sola dirección con un voltaje constante (ASTM E709, 2021). Esto conduce a que el campo magnético generado por corriente continua penetre una mayor profundidad en el material, lo que la convierte en la opción sugerida para evaluar defectos bajo la superficie, de interés en la presente investigación. En materiales ferromagnéticos, dicho campo magnético generado mediante CC puede penetrar una parte significativa de la sección del componente, lo que permite la detección efectiva de discontinuidades subsuperficiales mediante el uso de partículas magnéticas secas (Hellier, 2013). Sin embargo, para partículas magnéticas húmedas se recomienda la corriente alterna, aspecto que limita la detección de discontinuidades subsuperficiales, configuración que fue estudiada en el presente trabajo, al registrar la detección de discontinuidades planares subsuperficiales en condiciones desfavorables de la técnica, como lo es CC-Partículas húmedas.

A partir de lo anterior, se identificaron tres variables experimentales fundamentales que influyen en la sensibilidad del yugo electromagnético para detectar discontinuidades subsuperficiales, ordenadas según su relevancia teórica. La primera es la longitud de apertura del yugo, denominada distancia entre polos magnéticos, cuya influencia se debe a su efecto sobre la intensidad y distribución del campo magnético inducido en la pieza. Un aumento moderado de esta apertura puede extender el área efectiva de inspección, detectando discontinuidades de mayor

profundidad y en mayor área superficial. Sin embargo, un aumento excesivo en la longitud de apertura puede disminuir la densidad del flujo magnético, reduciendo así la sensibilidad y resolución para detectar discontinuidades pequeñas o subsuperficiales (ASNT, 2008). Para el rango de separación de los polos, se trabajó bajo la norma ASME que indica que se debe operar entre 3 y 8 pulgadas de apertura (ASME V Art. 7, 2023).

La segunda variable es el "lift-off", es decir, la distancia entre la superficie de la pieza y los polos del yugo electromagnético. La modificación del lift-off puede llegar a afectar la capacidad del yugo para detectar discontinuidades subsuperficiales. Un mayor lift-off implica que menos líneas de flujo magnético puedan penetrar en la pieza, reduciendo la posibilidad de hacer visibles las fugas de campo generadas por discontinuidades, sobre todo al reducir el tamaño de las discontinuidades (ASNT, 2008). Esta variable se considera relevante dado que, en algunas configuraciones, el yugo no puede hacer contacto directo con la superficie de la pieza, aunque el proceso de magnetización si sea posible. Sin embargo, su efecto cuantitativo sobre la sensibilidad del ensayo no ha sido abordado en detalle en la literatura revisada y si se considera posible realizar la inspección dado que de manera general se indica que el yugo debe estar en contacto directo con la superficie o lo más cercano posible, sin especificar mayor detalle al respecto (ASTM E1444, 2022).

Finalmente, la tercera variable corresponde al tipo de partículas utilizadas en el ensayo, las cuales pueden ser secas o húmedas. La elección entre ambos tipos puede afectar la visibilidad y el tipo de corriente que se puede llegar a utilizar, caracterizadas por tener tamaño y movilidad diferentes, oscilando convencionalmente entre 70 a 100 μm para las secas y de 7 a 15 μm para las húmedas fluorescentes, por lo tanto, cada tipo tiene una sensibilidad particular y, por tanto, en la capacidad de detección de discontinuidades. Las partículas húmedas fluorescentes ofrecen una mejor visualización debido a su alto contraste bajo luz UV, aunque presentan menor movilidad.

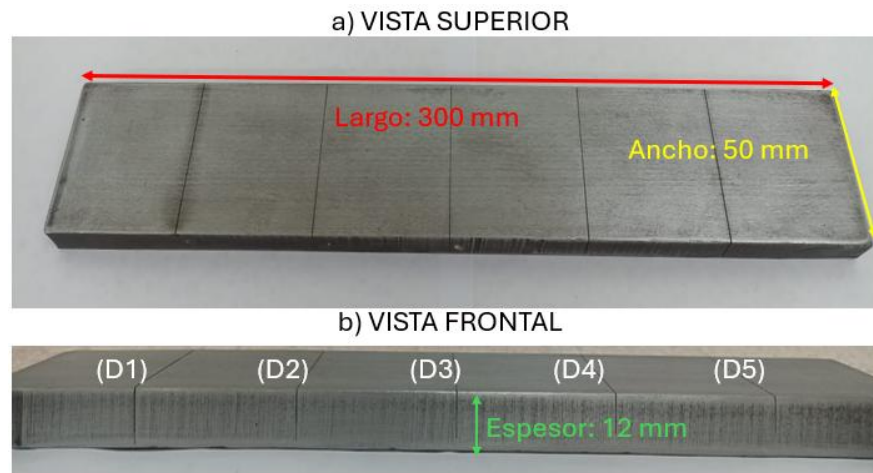
Por otra parte, las partículas secas tienen mayor movilidad sobre la superficie, pero su sensibilidad puede ser inferior en comparación con las húmedas (Hellier, 2013).

3.3 Etapa 3: Fabricar el bloque de referencia con discontinuidades planares ideales:

En esta etapa se diseñó y fabricó un bloque patrón de referencia con discontinuidades controladas, tipo entallas planas, para ser utilizado en la evaluación de sensibilidad y calibración del ensayo de partículas magnéticas con yugo electromagnético. El bloque permitió evaluar la sensibilidad del método para detectar discontinuidades subsuperficiales de diferentes profundidades. Se seleccionó para su fabricación el acero ASTM A36, un acero al carbono de bajo costo y ampliamente utilizado en estructuras, debido a sus propiedades ferromagnéticas al tener la fase ferrítica predominante, lo que lo hace ideal para el método de partículas magnéticas al tener alta permeabilidad magnética. Además, su buena maquinabilidad permite un mecanizado preciso de las entallas, asegurando exactitud en las dimensiones. Este material, de amplia disponibilidad y estandarización en la industria, garantiza que el bloque represente condiciones reales de inspección. Asimismo, sus propiedades mecánicas le otorgan la resistencia necesaria para soportar la manipulación y el uso repetido durante los ensayos. El procedimiento inició con la selección y preparación de una placa de acero A36, cortada a las dimensiones, proponiendo 300 mm de largo, 50 mm de ancho y 12 mm de espesor. Las dimensiones del bloque fabricado se muestran a continuación en la figura 4a.

Figura 4.

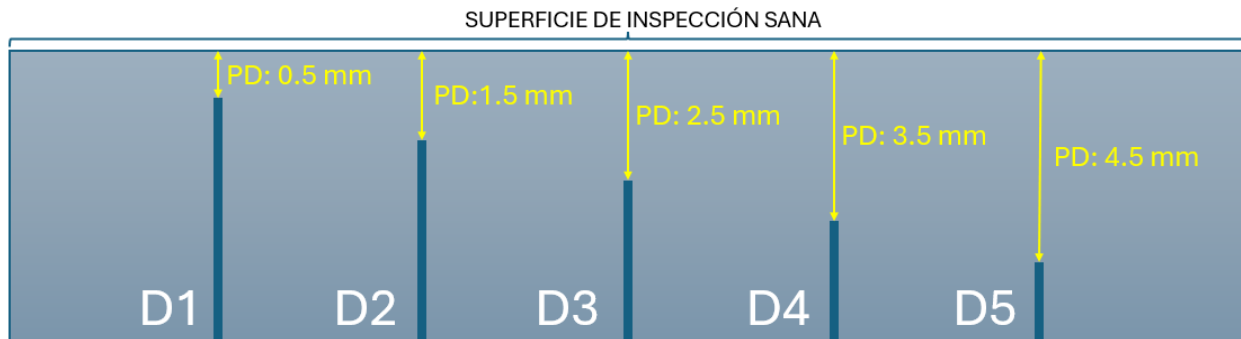
Dimensiones del bloque de referencia con discontinuidades planares ideales.



Luego, se procedió al mecanizado de cinco entallas lineales mediante mecanizado de corte por hilo, (Ancho del hilo 180 μm), con una separación uniforme de 50 mm entre ellas. Este tipo de mecanizado permite obtener entallas con paredes bien definidas al ser planas, una profundidad constante de mecanizado y un buen acabado superficial, garantizando una discontinuidad delgada y controlada por sistema Control Numérico por Computadora (CNC) con una tolerancia de ± 0.04 mm. Las entallas fueron mecanizadas con profundidades de D1=11.5 mm, D2=10.5 mm, D3=9.5 mm, D4=8.5 mm y D5=7.5 mm respectivamente, dando como resultado discontinuidades subsuperficiales al ser vistas desde la cara contraria al mecanizado, superficie sana, ver figura 4b. La profundidad de referencia para la inspección corresponde a la distancia medida entre la superficie sana y el borde de la entalla. Estas distancias son: 0.5 mm para la primera discontinuidad (D1), 1.5 mm para la segunda (D2) 2.5 mm para la tercera (D3), 3.5 mm para la cuarta (D4) y 4.5 mm para la quinta (D5), mediciones tomadas con calibrador vernier. En la figura 5 se presenta un esquema de vista frontal que especifica las profundidades de las discontinuidades subsuperficiales, PD, a inspeccionar.

Figura 5.

Distancias de profundidad de las 5 discontinuidades subsuperficiales mecanizadas



Las profundidades de las cinco entallas fueron seleccionadas de forma progresiva con el propósito de simular discontinuidades subsuperficiales controladas de diferente profundidad, esta variación permite evaluar la sensibilidad del yugo electromagnético con diferentes configuraciones. De este modo, se verificó la capacidad de la técnica ante entallas pasantes de diferentes profundidades. Este diseño, además, facilita la verificación del equipo, asegurando el cumplimiento de los requisitos normativos. A continuación, se muestra con más detalle en la tabla 1 las especificaciones del diseño del bloque de referencia.

Tabla 1.

Especificaciones del bloque de referencia fabricado

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Material	Acero ASTM A36	Ancho de entalla	180 μm (Mismo ancho del hilo)
Espesor	12 mm	Cantidad de entallas	5
Ancho	50 mm	Distancia entre entallas	50 mm
Largo	300 mm	Profundidades de entallas (mm)	11.5, 10.5, 9.5, 8.5, 7.5
Tipo de discontinuidad	Entallas lineales	Profundidades de las discontinuidades subsuperficiales (mm)	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5

Una vez mecanizadas las entallas, se realizó la limpieza mediante cepillado manual, especialmente para remover residuos visibles en la superficie, y se utilizó aire comprimido para eliminar los residuos presentes en las profundidades de la entalla, sin alterar las dimensiones de las discontinuidades. Finalmente, se marcaron visiblemente las posiciones de cada entalla para su correcta identificación durante los ensayos.

3.4 Etapa 4: Evaluar el efecto de la profundidad y sensibilidad de detección de la técnica:

Después de la elaboración del bloque de referencia con los parámetros dimensionales requeridos, se procedió a realizar las inspecciones. Para ello se propuso un diseño de experimentos el cual permitió cuantificar cómo afectan las tres variables seleccionadas: la longitud de separación entre polos, el lift-off y el tipo de partículas, sobre la sensibilidad de detección de las discontinuidades planares subsuperficiales ideales obtenidas. Para tal fin, se generó un diseño de experimentos factorial multinivel de tres factores, aleatorizado en dieciocho (18) corridas sobre cada entalla del bloque de referencia, para un total de 90 inspecciones. A continuación, en la tabla 2, se resumen los factores, los niveles considerados y las variables estudiadas del diseño factorial multinivel.

Tabla 2.

Diseño factorial de múltiples niveles

Variable	Factor	Valor	Nivel
Longitud de separación	A	3 in	1
		5 in	2
		8 in	3
Lift-off	B	0 mm (contacto)	1
		15 mm	2
		30 mm	3
Tipo de partícula	C	secas	1
		húmedas	2

En todas las corridas se utilizó corriente continua, incluso en el caso de las partículas húmedas, para las cuales no se recomienda este tipo de corriente, pero por la naturaleza subsuperficial de la discontinuidad la norma establece como requisito el uso de este tipo de corriente (CC). Para los casos de partículas secas o húmedas y corriente alterna no se detectó ninguna indicación de forma efectiva.

Para cada corrida se procedió a ajustar el yugo a la longitud de separación indicada, factor (A), posicionarlo a la distancia de lift-off correspondiente, factor (B) y aplicar el tipo de partículas seleccionado, factor (C). Todas las inspecciones se realizaron con la técnica de inspección continua, la cual consiste en mantener el campo magnético activo, para luego aplicar o espolvorear las partículas sobre la superficie del bloque; bajo iluminación blanca o UV según si se aplican particular secas visibles o húmedas fluorescentes, respectivamente. Se inspeccionaron las cinco entallas y se registró como variable de respuesta un “1” si se observó la indicación de partículas acumuladas sobre superficie, o un “0” en caso contrario, al no tener indicación o ser imperceptible. En la tabla 3 se muestra el orden aleatorizado de las dieciocho (18) corridas.

Tabla 3.

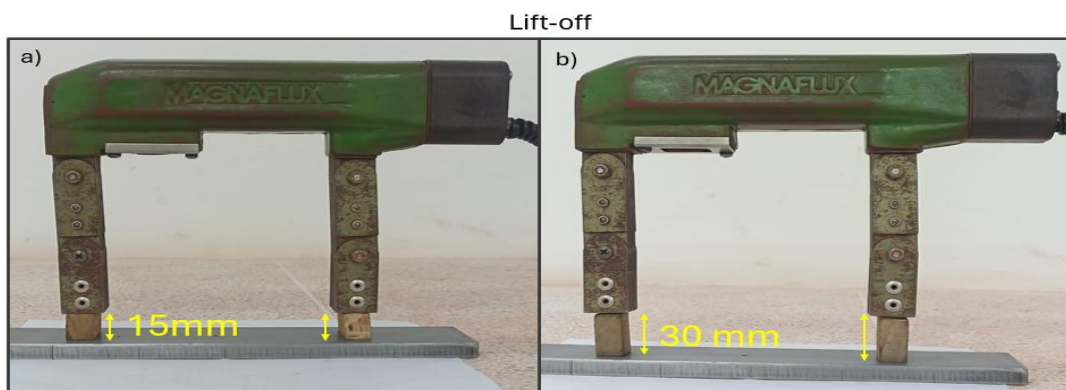
Número de corridas aleatorizadas para cada entalla

CORRIDA	A	B	C
1	3	1	2
2	1	1	2
3	2	2	1
4	3	2	1
5	2	1	1
6	1	2	2
7	3	3	2
8	2	3	2
9	2	1	2
10	3	3	1
11	2	2	2
12	3	1	1
13	2	3	1
14	1	1	1
15	3	2	2
16	1	3	1
17	1	2	1
18	1	3	2

Para garantizar un control preciso del lift-off durante la inspección, se emplearon bloques de madera, un material diamagnético, considerado magnéticamente neutro para fines prácticos. Los espesores fueron de 15 mm y 30 mm, colocados entre los polos del yugo y la superficie del bloque de acero. Estos bloques de madera, figura 6a y 6b actúan como cuñas de referencia, de 15 mm, y 30 mm respectivamente en este ejemplo, que aseguran de forma repetible las distancias lift-off, evitando variaciones manuales al posicionar el yugo y permitiendo evaluar con exactitud cómo la separación influye en la sensibilidad de detección de discontinuidades subsuperficiales.

Figura 6.

Distancias de lift-off controladas con bloques de madera de a)15 mm y b)30 mm



Todas las pruebas se realizaron siguiendo los lineamientos de ASME Sección V, Artículo 7, y las recomendaciones de ASTM E1444/E709, para la aplicación de partículas magnéticas con yugo electromagnético.

3.5 Etapa 5: Análisis de resultados:

Una vez concluida la etapa experimental que corresponde a la inspección del bloque de referencia, se procedió a realizar el respectivo análisis estadístico de los datos. Este análisis permitió identificar los efectos principales e interacciones entre variables, así como determinar si las discontinuidades fueron detectadas. Adicionalmente, se evaluaron visualmente las características de las indicaciones, como la definición, entendida como el ancho que forman las partículas agrupadas y la cantidad de partículas agrupadas en la superficie.

3.6 Etapa 6: Elaboración del informe final:

Tras completar las etapas anteriores, el trabajo de grado concluyó con el análisis, interpretación y resolución de los objetivos planteados. Finalmente, se organizó y redactó el informe final del trabajo para su presentación ante la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales.

4. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología planteada en el capítulo anterior. En la tabla 4 se presentan las detecciones obtenidas, identificadas con “1” cuando la entalla fue detectada y con “0” cuando no lo fue, para cada una de las corridas experimentales, sobre las cinco discontinuidades, D1 a la D5, de diferentes profundidades. En la tabla 4 se puede identificar cómo influyen en la capacidad del método para detectar discontinuidades subsuperficiales. La información organizada en la tabla 4 constituye la base de resultados para el análisis estadístico posterior, tomando como principal criterio si detecta o no detecta como estimación de la sensibilidad. En la tabla se resaltan los resultados que no lograron detectar la discontinuidad.

Tabla 4.

Resultados de detección de las 5 discontinuidades por corrida experimental

CORRIDA	FACTOR A	FACTOR B	FACTOR C	D1	D2	D3	D4	D5
1	3	1	2	1	1	1	0	0
2	1	1	2	1	1	1	1	1
3	2	2	1	1	1	0	0	0
4	3	2	1	1	1	1	0	0
5	2	1	1	1	1	1	1	1
6	1	2	2	1	1	0	0	0
7	3	3	2	1	0	0	0	0
8	2	3	2	1	0	0	0	0
9	2	1	2	1	1	1	1	1
10	3	3	1	1	0	0	0	0
11	2	2	2	1	0	0	0	0
12	3	1	1	1	1	1	1	1
13	2	3	1	1	1	0	0	0
14	1	1	1	1	1	1	1	1
15	3	2	2	1	0	0	0	0
16	1	3	1	1	0	0	0	0
17	1	2	1	1	1	0	0	0
18	1	3	2	1	0	0	0	0

Es de recalcar que en la tabla 4 se evidencia que hay condiciones favorables y desfavorables en las que ciertas configuraciones permiten detectar hasta las cinco discontinuidades (D1–D5), mientras que otras configuraciones apenas logran la detección de una o dos entallas, las más cercanas a la superficie, lo que demuestra la variación de sensibilidad de la técnica con las condiciones de inspección estudiadas. La corrida 14, C14, correspondió a una de las configuraciones más efectivas dentro del diseño experimental, mostrando resultados positivos en la detección de todas las discontinuidades evaluadas, desde la más superficial hasta la más profunda. Esta combinación se caracterizó por emplear una longitud de separación de polos mínima (factor $A = 1$), un lift-off también mínimo (factor $B = 1$), y el uso de partículas secas (factor $C = 1$). Esta configuración permitió una mayor concentración y orientación del flujo magnético en el bloque de referencia, generando condiciones óptimas para la fuga de campo en presencia de discontinuidades. A su vez, la cercanía del yugo a la superficie (bajo lift-off) maximizó el acoplamiento magnético, mientras que las partículas secas mostraron un mejor comportamiento en cuanto a movilidad y acumulación en la zona de indicación. Por el contrario, en varias corridas como la 7, 8, 10, 11, 15, 16 y 18, únicamente se detecta la primera discontinuidad (D1), la de menor profundidad subsuperficial (0.5 mm), lo cual muestra que la inspección no detectaría discontinuidades subsuperficiales a profundidades mayores de 0.5 mm. Estas corridas críticas comparten dos características clave: valores de lift-off elevados (niveles 2 y 3) y/o el uso de partículas húmedas (nivel 2). Por ejemplo: La corrida C7 ($A=3$, $B=3$, $C=2$) tiene mayor separación de polos, máximo lift-off y partículas húmedas mostrando así el desempeño más bajo; sin embargo, esta configuración C7 logra detectar la primera discontinuidad D1. Esto sugiere que el lift-off es el factor más crítico, seguido por el tipo de partículas, esto se debe a que el aumento del lift-off reduce significativamente el flujo de campo en la superficie, limitando la formación de fugas de campo y, por ende, la atracción de partículas.

A continuación, se presentan los resultados de detección obtenidos para cada una de las cinco discontinuidades del bloque de referencia, los cuales son organizados en tablas independientes. Cada tabla, de la tabla 5 a la 9, resume, para las 18 corridas experimentales, el registro visual del resultado, en las cuales se evidencia la entalla detectada bajo las diferentes combinaciones para las corridas indicadas en la tabla 3. Este formato permite comparar de manera el desempeño del método, ancho y continuidad de la indicación, mostrando en cada tabla los resultados para cada discontinuidad inspeccionada especificando la corrida y el valor de los factores A, B y C.

La Tabla 5 presenta los resultados correspondientes a las inspecciones realizadas con las dieciocho corridas a la primera discontinuidad, D1, ubicada a 0.5 mm de la superficie. Al tratarse de la discontinuidad de mayor cercanía al nivel de la superficie, se registró el mayor índice de detección en comparación con las demás entallas. Sin embargo, se evidenció que factores como el lift-off y el tipo de partículas utilizadas también influyen en esta condición. Por ejemplo, en la corrida C7, se observó una disminución en la acumulación de partículas húmedas, lo cual dificultó la detección. Asimismo, en la corrida C10, el patrón de indicación fue poco definido, lo que generó incertidumbre durante la inspección visual, incluso tratándose de la entalla más superficial. De acá en adelante la corrida se llamará con la letra C. Seguidamente del análisis visual de todas las indicaciones, se realizará el análisis estadístico de los resultados.

Tabla 5.

Resultados de detección de la primera discontinuidad

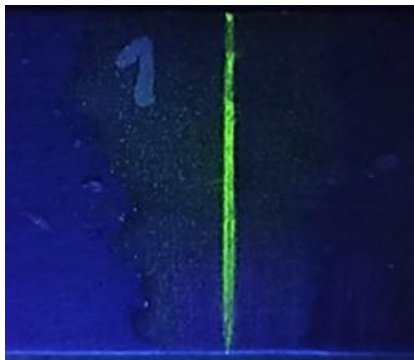
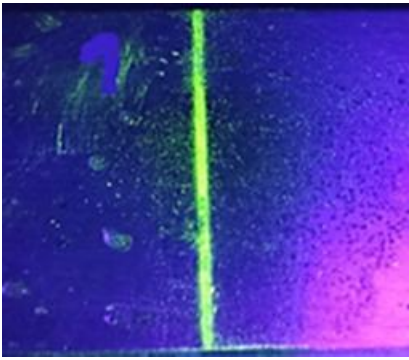
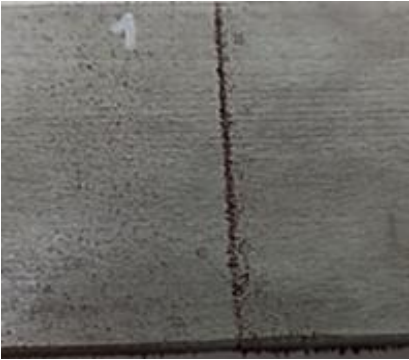
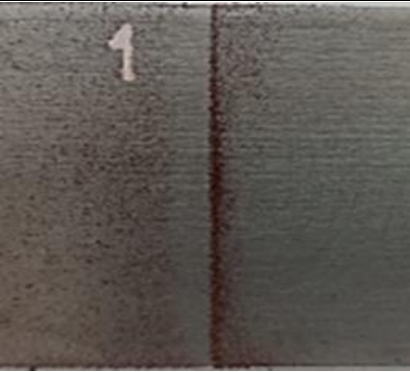
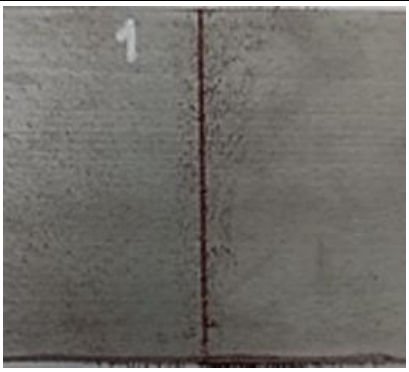
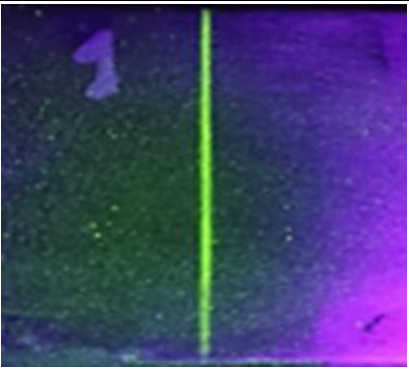
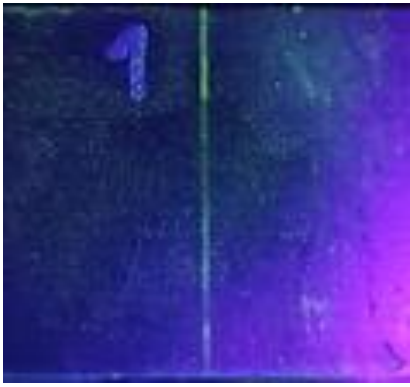
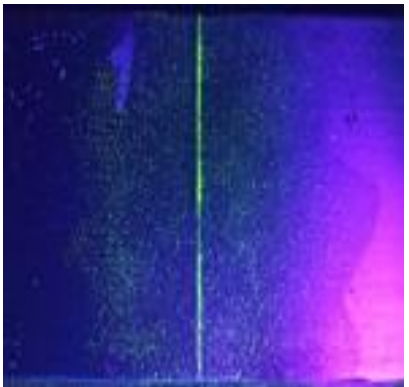
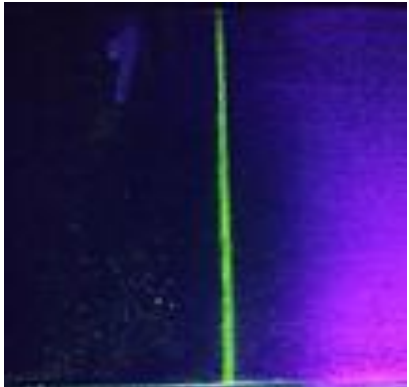

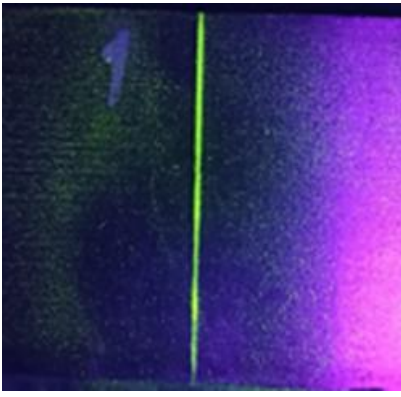

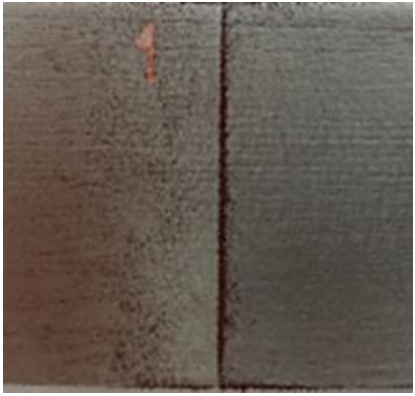




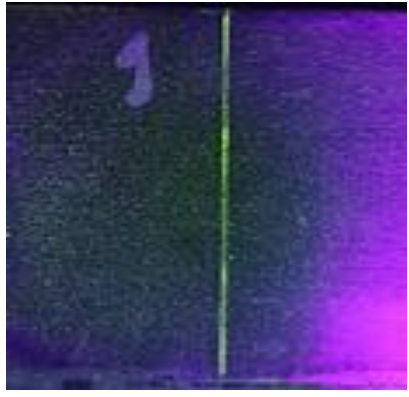
DISCONTINUIDAD: D1		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
		
CORRIDA C1=A:3; B:1; C:2	CORRIDA C2 =A:1; B:1; C:2	CORRIDA C3 =A:2; B:2; C:1
		
CORRIDA C4 = A:3; B:2; C:1	CORRIDA C5 =A:2; B:1; C:1	CORRIDA C6 = A:1; B:2; C:2
		
CORRIDA C7 = A:3; B:3; C:2	CORRIDA C8 = A:2; B:3; C:2	CORRIDA C9 = A:2; B:1; C:2

Tabla 5 (continuación)

DISCONTINUIDAD: D1		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
		
CORRIDA C10 =A:3; B:3; C:1	CORRIDA C11 =A:2; B:2; C:2	CORRIDA C12 =A:3; B:1; C:1
		
CORRIDA C13 =A:2; B:3; C:1	CORRIDA C14 =A:1; B:1; C:1	CORRIDA C15 =A:3; B:2; C:2
		
CORRIDA C16 = A:1; B:3; C:1	CORRIDA C17 =A:1; B:2; C:1	CORRIDA C18 =A:1; B:3; C:2

Al comparar las indicaciones de la corrida C16 y C3 para la discontinuidad D1, tabla 5, se observa que en los dos casos se detecta, pero la acumulación de partículas en el caso de C3 no es continua, y la acumulación es más ancha, difusa. Este comportamiento se observa con mayor

claridad por ejemplo en las corridas C6, C7 y C8, donde el ancho y continuidad de la indicación cambia. La discontinuidad D1 fue detectada por todas las corridas.

A continuación, la Tabla 6 presenta los resultados correspondientes a la segunda discontinuidad, D2, de 1.5 mm de profundidad. Aunque se trata de una discontinuidad poco profunda, el ligero aumento respecto a la discontinuidad anterior permite observar una mayor dificultad para las mismas condiciones del ensayo. En particular, se evidencia una reducción en la sensibilidad de detección en las corridas realizadas con valores elevados de lift-off, especialmente cuando se combinaron con partículas húmedas. En estas condiciones, el campo magnético no tiene suficiente intensidad para generar las indicaciones, para las corridas donde se indica que no detecto, como en C7, y para algunas las indicaciones son poco visibles o difusas, como en C3, C6 o C13.

Tabla 6.

Resultados de detección de la segunda discontinuidad

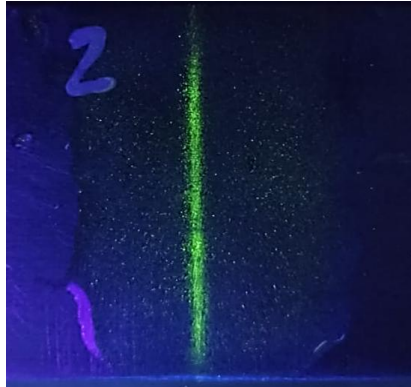
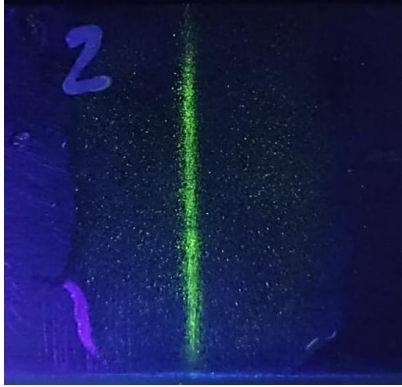

DISCONTINUIDAD: D2		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
		
CORRIDA C1=A:3; B:1; C:2	CORRIDA C2 =A:1; B:1; C:2	CORRIDA C3 =A:2; B:2; C:1

Tabla 6 (continuación)


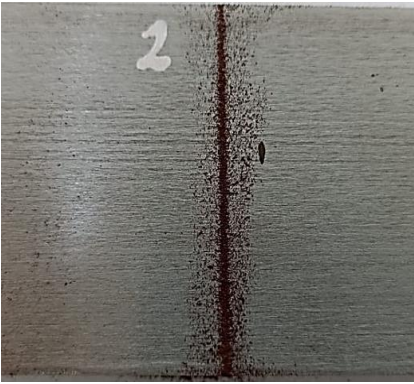
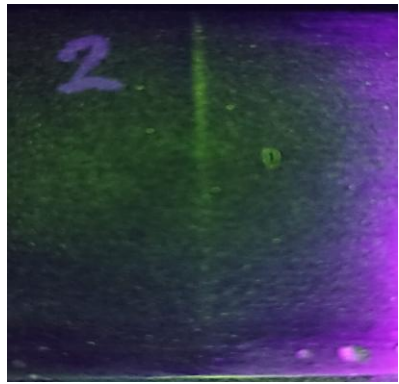
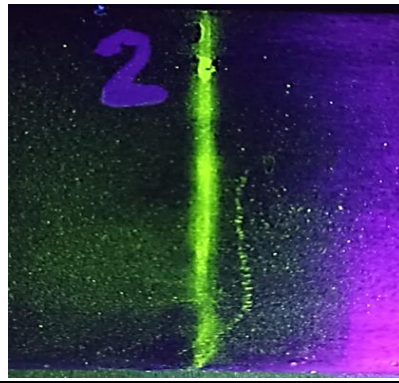




DISCONTINUIDAD: D2		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
		
CORRIDA C4 = A:3; B:2; C:1	CORRIDA C5 = A:2; B:1; C:1	CORRIDA C6 = A:1; B:2; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C7 = A:3; B:3; C:2	CORRIDA C8 = A:2; B:3; C:2	CORRIDA C9 = A:2; B:1; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C10 = A:3; B:3; C:1	CORRIDA C11 = A:2; B:2; C:2	CORRIDA C12 = A:3; B:1; C:1

Tabla 6 (continuación)

DISCONTINUIDAD: D2		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
		<p>NO SE DETECTÓ</p>
CORRIDA C13 =A:2; B:3; C:1	CORRIDA C14 =A:1; B:1; C:1	CORRIDA C15 =A:3; B:2; C:2
<p>NO SE DETECTÓ</p>		<p>NO SE DETECTÓ</p>
CORRIDA C16 =A:1; B:3; C:1	CORRIDA C17 =A:1; B:2; C:1	CORRIDA C18 =A:1; B:3; C:2

Aumentar la profundidad de la entalla, PD, de 0.5 a 1.5 mm tuvo como consecuencia que la entalla no fuera detectada en seis corridas, y que la corrida C6 fuera casi imperceptible. El comportamiento presentado está en concordancia con el principio físico de la técnica, dado que a mayor profundidad de la discontinuidad subsuperficial será más difícil su detección, sin embargo, se resalta que, para el caso de las corridas con partículas húmedas, se logra detectar parcialmente, como se evidencia en la corrida C2.

La Tabla 7 presenta los resultados de detección para la tercera discontinuidad, D3, de 2.5 mm de profundidad, que representa un caso intermedio entre las discontinuidades subsuperficiales en estudio. En esta discontinuidad se aprecia claramente el efecto combinado de la densidad de

flujo magnético (determinado por la separación de polos) y el lift-off sobre la movilidad y retención o atracción de las partículas. Con partículas secas, las corridas detectadas que emplearon mayor separación de polos y mayor lift-off mostraron una concentración visible notablemente superior, lo que facilitó la identificación de la entalla. En cambio, las partículas húmedas presentaron una menor acumulación bajo las mismas condiciones, debido a su movilidad y adherencia en presencia de un flujo magnético más débil al tener mayor profundidad la entalla.

Tabla 7.

Resultados de detección de la tercera discontinuidad

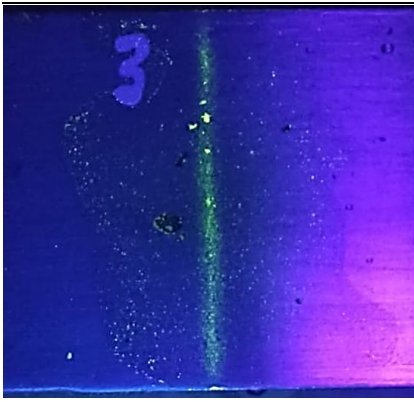
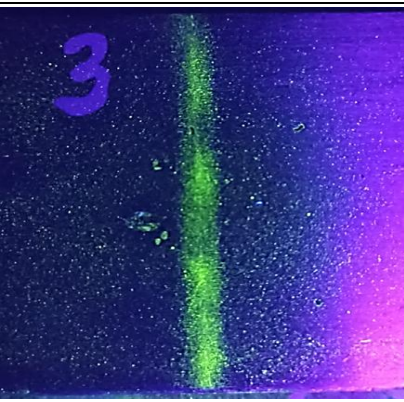


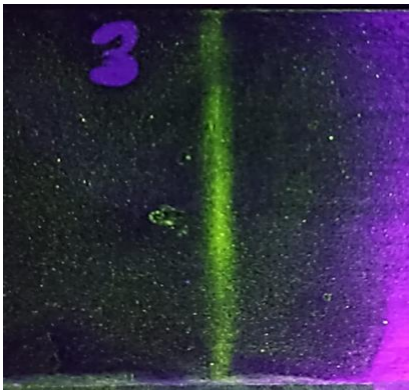
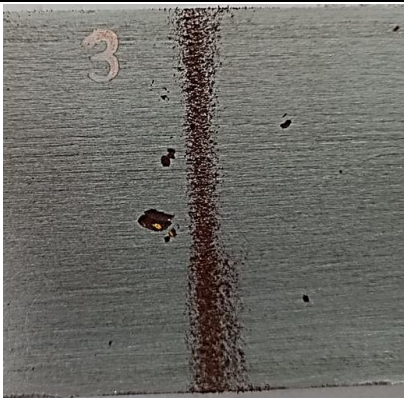

DISCONTINUIDAD: D3		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
		<p>NO SE DETECTÓ</p>
CORRIDA C1=A:3; B:1; C:2	CORRIDA C2 =A:1; B:1; C:2	CORRIDA C3 =A:2; B:2; C:1
		<p>NO SE DETECTÓ</p>
CORRIDA C4 = A:3; B:2; C:1	CORRIDA C5 =A:2; B:1; C:1	CORRIDA C6 = A:1; B:2; C:2

Tabla 7 (continuación)

DISCONTINUIDAD: D3		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C7 =A:3; B:3; C:2	CORRIDA C8 =A:2; B:3; C:2	CORRIDA C9 =A:2; B:1; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C10 =A:3; B:3; C:1	CORRIDA C11 =A:2; B:2; C:2	CORRIDA C12 = A:3; B:1; C:1
NO SE DETECTÓ		NO SE DETECTÓ
CORRIDA C13 =A:2; B:3; C:1	CORRIDA C14 =A:1; B:1; C:1	CORRIDA C15 =A:3; B:2; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ
CORRIDA C16 =A:1; B:3; C:1	CORRIDA C17 =A:1; B:2; C:1	CORRIDA C18 =A:1; B:3; C:2

Al comparar los resultados de la discontinuidad D3, con las anteriores, D1 y D2, se evidencia que las indicaciones para este caso son anchas y no están definidas claramente al ser difusas, sin embargo, se logran detectar en siete de las dieciocho corridas.

La Tabla 8, corresponde a los resultados de la cuarta discontinuidad, D4, caracterizada por tener 3.5 mm de profundidad. Los resultados obtenidos siguen ilustrando cómo a medida que la discontinuidad se encuentra más alejada de la superficie, al igual que el lift-off y la separación de polos mayor, se afecta la sensibilidad de detección. En esta discontinuidad subsuperficial, las corridas detectadas con partículas secas continuaron mostrando una retención de partículas más elevada en configuraciones de mayor separación de polos y lift-off, lo que facilitó la visualización de la discontinuidad. Por el contrario, las partículas húmedas presentaron una retención notablemente inferior en las mismas condiciones, evidenciando la pérdida de sensibilidad de esta técnica bajo separaciones mayores.

Tabla 8.

Resultados de detección de la cuarta discontinuidad

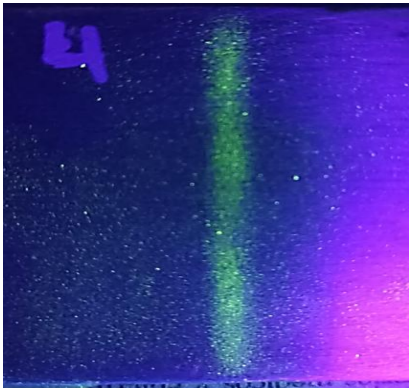
DISCONTINUIDAD: D4		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
NO SE DETECTÓ		NO SE DETECTÓ
CORRIDA C1=A:3; B:1; C:2	CORRIDA C2 =A:1; B:1; C:2	CORRIDA C3 =A:2; B:2; C:1

Tabla 8 (continuación)


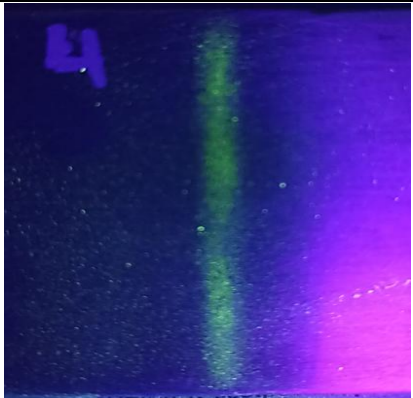


DISCONTINUIDAD: D4		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
NO SE DETECTÓ		NO SE DETECTÓ
CORRIDA C4 = A:3; B:2; C:1	CORRIDA C5 = A:2; B:1; C:1	CORRIDA C6 = A:1; B:2; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C7 = A:3; B:3; C:2	CORRIDA C8 = A:2; B:3; C:2	CORRIDA C9 = A:2; B:1; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C10 = A:3; B:3; C:1	CORRIDA C11 = A:2; B:2; C:2	CORRIDA C12 = A:3; B:1; C:1

Tabla 8 (continuación)

DISCONTINUIDAD: D4		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
NO SE DETECTÓ		NO SE DETECTÓ
CORRIDA C13 =A:2; B:3; C:1	CORRIDA C14 =A:1; B:1; C:1	CORRIDA C15 =A:3; B:2; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ
CORRIDA C16 =A:1; B:3; C:1	CORRIDA C17 =A:1; B:2; C:1	CORRIDA C18 =A:1; B:3; C:2

A pesar de la alta profundidad de la entalla, 3.5 mm, se logra detectar con claridad para las corridas C12 y C14, y con dificultad, al tener bajo contraste la luz emitida por las partículas húmedas fluorescentes en el caso de la corrida C9.

Finalmente, la Tabla 9 presenta los resultados correspondientes a la quinta discontinuidad, D5, con una profundidad de 4.5 mm, la más profunda del bloque de referencia fabricado. Este caso representa el límite práctico de detección del método con yugo electromagnético, evidenciando una notable disminución en la sensibilidad bajo configuraciones con mayor lift-off y menor densidad de flujo magnético (mayor separación de polos). Se observa que las partículas secas continúan mostrando una mayor capacidad de acumulación sobre las discontinuidades detectadas en comparación con las partículas húmedas, cuya aglomeración disminuye considerablemente en estas condiciones, dificultando la identificación de la discontinuidad. Este comportamiento refuerza la importancia del control de los parámetros operativos en la detección de discontinuidades subsuperficiales, pero muestra que la técnica puede llegar a detectar en ciertas configuraciones una

discontinuidad que esté a 4.5 mm de la superficie.

Tabla 9.

Resultados de detección de la quinta discontinuidad

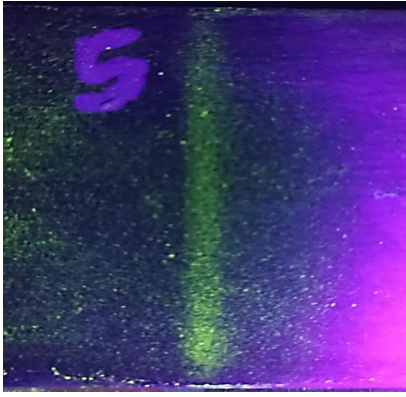
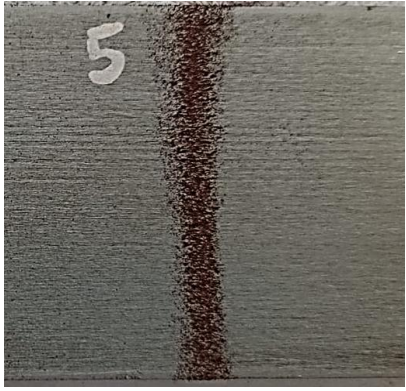
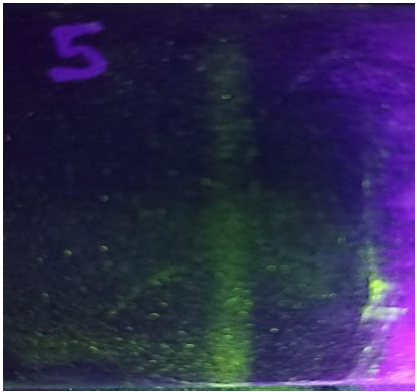


DISCONTINUIDAD: D5		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
NO SE DETECTÓ		NO SE DETECTÓ
CORRIDA C1=A:3; B:1; C:2	CORRIDA C2 =A:1; B:1; C:2	CORRIDA C3 =A:2; B:2; C:1
NO SE DETECTÓ		NO SE DETECTÓ
CORRIDA C4 = A:3; B:2; C:1	CORRIDA C5 =A:2; B:1; C:1	CORRIDA C6 = A:1; B:2; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C7 =A:3; B:3; C:2	CORRIDA C8 =A:2; B:3; C:2	CORRIDA C9 =A:2; B:1; C:2

Tabla 9 (continuación)

DISCONTINUIDAD: D5		
IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA	IMAGEN DETECTADA
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	
CORRIDA C10 =A:3; B:3; C:1	CORRIDA C11 =A:2; B:2; C:2	CORRIDA C12 = A:3; B:1; C:1
NO SE DETECTÓ		NO SE DETECTÓ
CORRIDA C13 =A:2; B:3; C:1	CORRIDA C14 =A:1; B:1; C:1	CORRIDA C15 =A:3; B:2; C:2
NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ	NO SE DETECTÓ
CORRIDA C16 =A:1; B:3; C:1	CORRIDA C17 =A:1; B:2; C:1	CORRIDA C18 =A:1; B:3; C:2

Para esta entalla se detecta con claridad la indicación con las corridas C12 y C14, mientras que con partículas húmedas fluorescentes la sensibilidad es casi nula, al detectar para dos configuraciones, pero con un contraste muy bajo, casi imposible de registrar, como se muestra en la corrida C9.

A partir de estos resultados obtenidos, se presenta a continuación el análisis estadístico basado en el diseño de experimentos propuesto. La Figura 7 muestra el gráfico de Pareto correspondiente, en orden descendente, los efectos estandarizados (en valor absoluto) de los

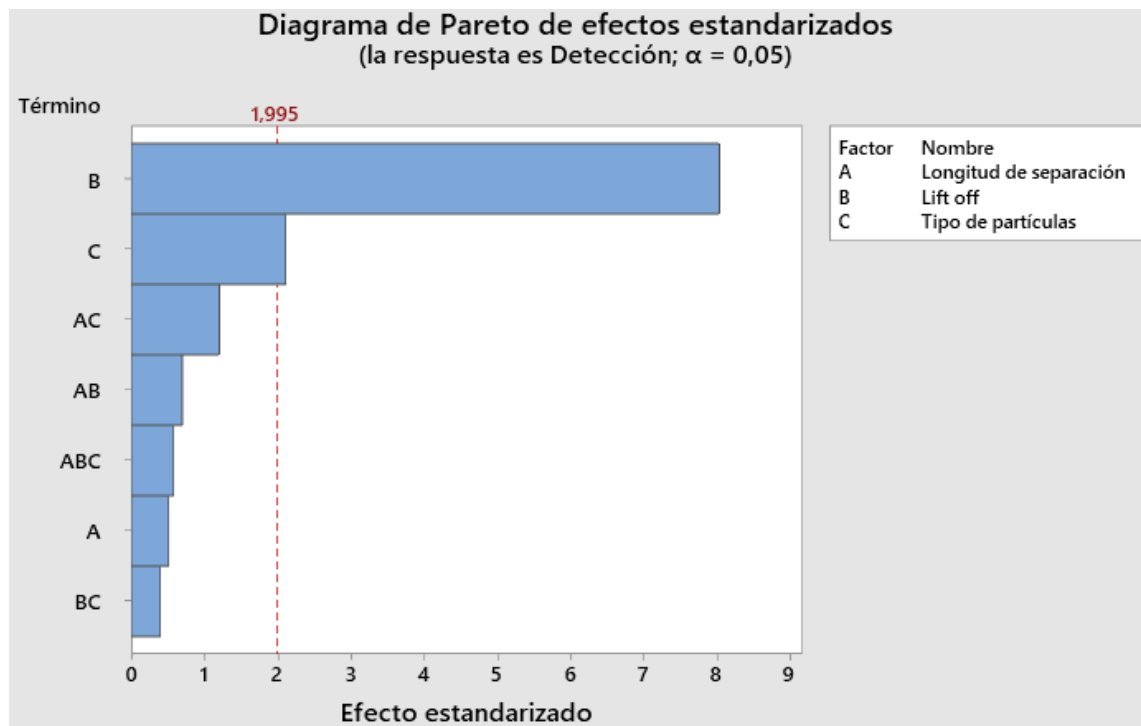
factores principales e interacciones dobles sobre la variable respuesta (número de discontinuidades detectadas). Cada barra representa el tamaño del “contraste de medias” estandarizado para un factor o combinación de factores, según la tabla 2, (por ejemplo, A = Longitud de separación de polos, B = lift-off, C = tipo de partículas, A×C, A×B, A×B×C, B×C). La línea punteada vertical indica el umbral de significancia al 95 % de confianza: cualquier barra horizontal que la cruza corresponde a un efecto que no se debe al azar, que tiene efecto significativo sobre la variación en las inspecciones con el yugo. Es decir, que ese factor indica el nivel de significancia estadística. Esto permitió identificar qué variables realmente influyen en la capacidad de detección del ensayo y cuáles no tienen un efecto relevante, lo que indica que pueden ser modificadas y su efecto no tiene significancia respecto a las otras variables, para las condiciones ideales del bloque de referencia diseñado en este trabajo.

En el gráfico de Pareto (figura 7), se observa que el factor B (lift-off) y el factor C (tipo de partículas) se encuentran por encima de la línea de significancia, lo que indica que ambos tienen un impacto real y relevante en la sensibilidad de detección de discontinuidades. En particular, el hecho de que el lift-off sea el factor más alto sugiere que la distancia entre el yugo y la superficie del bloque inspeccionado modifica de manera significativa la sensibilidad, reduciendo el número de entallas detectadas a mayor lift-off. Lo anterior ocurre porque la intensidad del flujo magnético, entendido como la densidad de líneas imaginarias de campo magnético que entran a la pieza, disminuye rápidamente, reduciendo la intensidad en la pieza y afectando la acumulación de partículas en las discontinuidades por reducción consecuente del campo de fuga. Por su parte, el tipo de partículas demuestra ser también un factor crítico: las partículas secas, al tener mayor movilidad, pueden ser atraídas incluso por la presencia de un campo magnético débil, mejorando la sensibilidad del ensayo en comparación con las partículas húmedas para inspección de discontinuidades subsuperficiales, por lo que se recomienda su uso en la inspección de este tipo de

discontinuidades. Sin embargo, la capacidad de retención disminuye a mayores profundidades subsuperficiales.

Figura 7.

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de las discontinuidades detectadas



En cambio, el factor A (separación entre polos) y todas las interacciones ($A \times B$, $A \times C$, $B \times C$, $A \times B \times C$) quedan por debajo de la línea de significancia. Esto significa que, aunque la separación entre polos influye teóricamente en la densidad de flujo magnético, en las condiciones específicas del experimento su efecto no fue lo suficientemente grande como para considerarse estadísticamente significativo en la variación natural de las inspecciones, lo que indica que los resultados serían repetibles si se hubieran hecho las inspecciones. Asimismo, ninguna de las interacciones entre factores mostró un patrón consistente que explicara variaciones significativas en la respuesta; en este sentido, combinar diferentes niveles de separación de polos con lift-off o

tipo de partículas no generó un efecto adicional que superara la variabilidad inherente a la detección de las discontinuidades subsuperficiales.

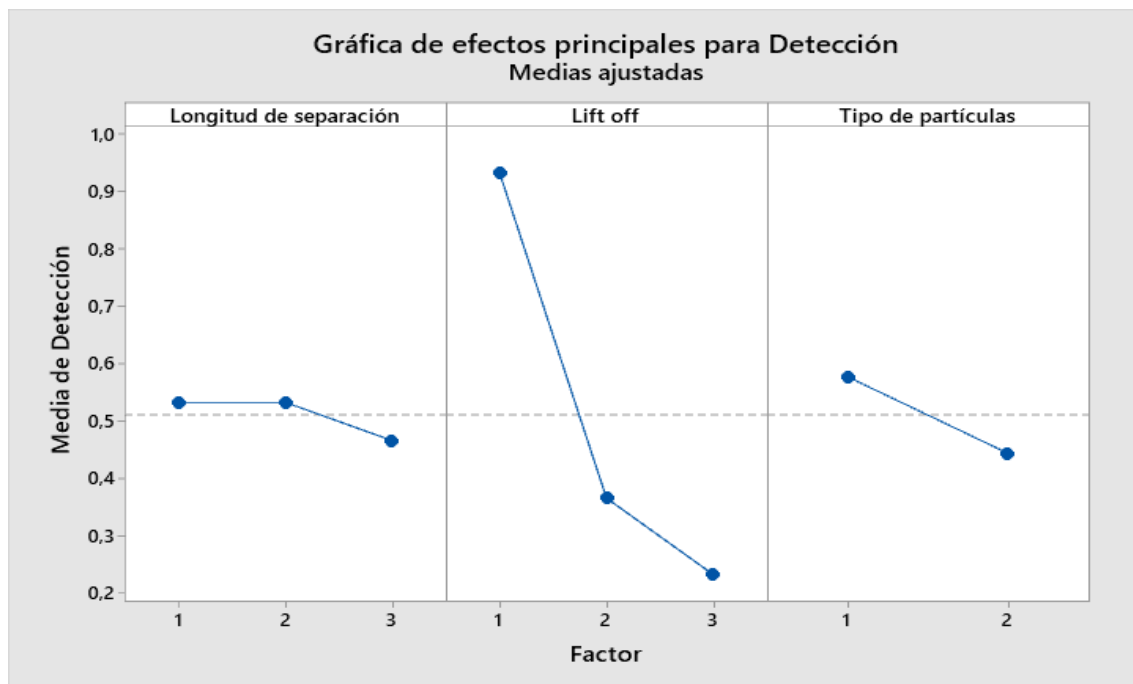
La Figura 8 presenta la gráfica de efectos principales obtenida del diseño factorial, el eje vertical representa la media ajustada de detección, la cual corresponde al promedio de detecciones logradas para cada nivel de los factores estudiados. Este valor indica qué tan efectiva fue cada configuración en términos de detección, permitiendo comparar directamente el impacto de cada factor (longitud de separación, lift-off y tipo de partículas) sobre la capacidad de la inspección magnética para revelar discontinuidades subsuperficiales. En ella se observa también que el factor más influyente es el lift-off, ya que su línea presenta una pendiente notablemente descendente. A medida que aumenta la separación entre el yugo electromagnético y la superficie del material, la capacidad de detección disminuye de forma significativa. En segundo lugar, el tipo de partículas también afecta la sensibilidad del método, siendo las partículas secas más efectivas que las húmedas para visualizar discontinuidades en las condiciones evaluadas. Por su parte, la longitud de separación de polos del yugo mostró una variación muy leve, lo que sugiere que, dentro del rango de 3 a 8 pulgadas utilizado, este factor no generó un cambio significativo en la media de detección, por lo que es posible concluir que la separación entre polos modifica únicamente el área efectiva de inspección.

Estos resultados son coherentes con lo observado en la inspección visual y permiten identificar que la separación entre el yugo y la superficie, así como el tipo de partículas utilizadas, son factores críticos para optimizar la eficacia del ensayo por partículas magnéticas. Además, a partir de los resultados es posible identificar las combinaciones de parámetros que maximizan la capacidad de detección de discontinuidades subsuperficiales. Las mejores sensibilidades de detección se obtuvieron cuando el yugo electromagnético se mantuvo en contacto directo con la superficie (lift-off = 0 mm), se emplearon partículas secas y se utilizó una separación de polos

intermedia (5 pulgadas). Esta configuración permite mantener una alta intensidad de campo magnético localizado y una buena acumulación de partículas sobre las fugas del campo, facilitando la detección visual. Por el contrario, combinaciones con alto lift-off (30 mm) y partículas húmedas mostraron pérdidas importantes de sensibilidad, especialmente en las discontinuidades más profundas.

Figura 8.

Gráfica de efectos principales de las discontinuidades detectadas



Los resultados cuantitativos son concordantes con lo estipulado cualitativamente por la teoría y las normativas aplicables, como ASME Sección V y la ASTM E709, que regulan el uso de ensayos no destructivos por partículas magnéticas. Estas normas establecen que el yugo debe proporcionar una intensidad suficiente de campo magnético y que el contacto físico mejora la detección. Aspecto de interés en el presente trabajo, en el cual se valida la sugerencia conocida. Sin embargo, en este trabajo adicionalmente se logra cuantificar el alcance de la penetración del

campo magnético con la suficiente intensidad para detectar discontinuidades planas siguiendo el diseño de experimentos. En este sentido, es posible afirmar que la intensidad del campo magnético puede llegar a tener la intensidad suficiente para detectar discontinuidades planares ubicadas a más de 5 mm de profundidad, para el tipo de acero acá estudiado, valores cuantitativos no reportados en la literatura revisada.

Asimismo, las normas reconocen que factores como el tipo de partículas y la distancia entre el yugo y la pieza afectan directamente la sensibilidad de la técnica, como se evidenció en el análisis de efectos principales y gráfico de Pareto. En consecuencia, los resultados experimentales no solo se alinean con los fundamentos teóricos cualitativos del método, sino que también ratifican las recomendaciones operativas descritas por las normas técnicas internacionales, dando una luz del alcance real que puede llegar a tener la técnica, considerando que tan profundo puede estar un defecto denominado subsuperficial para llegar a detectarse por esta técnica de magnetización.

5. Conclusiones

A partir del diseño experimental y el análisis estadístico realizado, se logró cumplir satisfactoriamente con el objetivo general del estudio, demostrando que la técnica de magnetización mediante yugo electromagnético tiene una sensibilidad de detección altamente dependiente de variables operativas como el lift-off y el tipo de partículas empleadas.

El lift-off es la variable con mayor impacto negativo sobre la capacidad de detección. A medida que aumenta la separación entre el yugo y la superficie, disminuye significativamente la intensidad del campo magnético aplicado, afectando la formación de las fugas de flujo necesarias para la acumulación de partículas. Por ejemplo, en la discontinuidad de 3.5 mm de profundidad (D4), se observó que una mayor separación redujo notablemente la visibilidad de la indicación al utilizar partículas húmedas, evidenciando la pérdida de sensibilidad del método ante altos valores de lift-off.

El tipo de partículas utilizadas influye significativamente en la capacidad de detección de discontinuidades subsuperficiales. Las partículas secas demostraron un mejor desempeño, especialmente en condiciones de mayor lift-off y separación de polos, debido a su menor dispersión y mayor adherencia en presencia de campos magnéticos débiles. Si bien la separación de polos por sí sola no mostró un efecto tan marcado, su interacción con el lift-off altera la distribución del campo magnético en el material, afectando así la eficacia del ensayo.

Con base en los resultados experimentales y el análisis estadístico, fue posible identificar combinaciones óptimas de variables que permitieron detectar discontinuidades de hasta 4,5 mm de profundidad, destacando especialmente las configuraciones con lift-off mínimo, separación media a alta y uso de partículas secas. Estos hallazgos fueron validados mediante el gráfico de Pareto y el análisis de efectos principales, los cuales confirmaron estadísticamente el impacto de los factores

evaluados sobre la sensibilidad del método, en concordancia con las expectativas teóricas y las recomendaciones establecidas en las normativas ASME Sección V, Artículo 7, ASTM E709 y ASTM E1444.

Los resultados experimentales confirmaron que es posible optimizar tanto la profundidad como la sensibilidad de detección de discontinuidades subsuperficiales mediante una adecuada combinación de variables de inspección con yugo electromagnético. No obstante, se identificaron limitaciones técnicas: combinaciones con lift-off elevado y partículas húmedas mostraron una reducción significativa en la retención de partículas, comprometiendo la sensibilidad del ensayo. Estos hallazgos respaldan la necesidad de controlar cuidadosamente las variables operativas para maximizar el rendimiento de la técnica.

6. Recomendaciones

Evaluar la sensibilidad del método utilizando entallas de longitud limitada, en lugar de entallas pasantes, con el fin de simular defectos más realistas en componentes industriales. Estas entallas pueden fabricarse también mediante electroerosión para asegurar precisión dimensional y control sobre su geometría.

Diseñar bloques de referencia con entallas inclinadas respecto a la superficie, en diferentes ángulos, para estudiar el efecto de la orientación de la discontinuidad en la sensibilidad de detección. Esta variación permitiría evaluar la capacidad del campo magnético para detectar defectos que no se encuentren en posición vertical, como ocurre comúnmente en condiciones reales.

Investigar el comportamiento de la técnica en materiales con distintas permeabilidades magnéticas, comparando aceros de diferentes composiciones o tratamientos térmicos, con el fin de entender mejor cómo varía la respuesta del campo magnético ante discontinuidades en materiales ferromagnéticos con propiedades diversas.

Analizar el efecto de otras formas geométricas de discontinuidad, como defectos circulares o en forma de ranura curva, para ampliar la aplicabilidad de los resultados a una gama más amplia de fallas potenciales.

Referencias Bibliográficas

American Society for Nondestructive Testing. (2008). *Nondestructive testing handbook: Vol. 2. Magnetic particle testing* (3rd ed.). ASNT.

American Society of Mechanical Engineers. (2023). *ASME boiler and pressure vessel code, Section V: Nondestructive examination, Article 7 - Magnetic particle examination*. ASME.

American Society of Mechanical Engineers. (2023). *Boiler and pressure vessel code: Section VIII, Division 1 - Rules for construction of pressure vessels, Mandatory Appendix 6: Methods for magnetic particle examination (MT)*. ASME.

American Welding Society. (2019). *Structural welding code - Steel*. American National Standards Institute.

ASTM International. (2021). *ASTM E709-21: Standard guide for magnetic particle testing*. ASTM International.

ASTM International. (2022). *ASTM E1444/E1444M-22: Standard practice for magnetic particle testing*. ASTM International.

Flores Barrera, L. G. (2009). *Medición de espesores por ultrasonido y requisitos necesarios para el personal que lleva a cabo ensayos no destructivos en la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional.

Goñi Córdoba, A., & Fernández Carrasquilla, J. (2014). *Ensayos no destructivos para localización*

de grietas en piezas estampadas. Trabajo de fin de grado, Universidad Pública de Navarra, España.

Hellier, C. (2013). *Handbook of nondestructive evaluation* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Kato, T., Fujimura, T., Hiramatsu, S., & Yamamoto, Y. (2021). *Subsurface crack propagation from internal defect in rolling contact fatigue of railway wheel steel*. *Materials Transactions*, 62(2), 185–190.

MetrooMat. (s. f.). *Tintas y líquidos penetrantes y partículas magnéticas: Soluciones avanzadas para la detección de defectos*. <https://metroomat.com/tintas-liquidos-penetrantes-particulas-magneticas-deteccion-defectos/>

Rodrigo Meléndez. (2013). *Fabricación de probetas para determinar la sensibilidad de equipos utilizados en ensayo no destructivos de partículas magnéticas basado en norma ASME V Secc. 7*. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.

TWI Ltd. (s. f.). *Non-destructive examination (NDE) - Part 1: Liquid penetrant and magnetic particle inspection*. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/non-destructive-examination-nde-part-1-liquid-penetrant-and-magnetic-particle-inspection-122>