

Comparación de la sensibilidad de las técnicas de magnetización con yugo electromagnético y puntas de contacto en la detección de entallas artificiales

Johan Sebastian Delgado Soto

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla

Doctor en ingeniería de materiales

Codirector

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en ingeniería

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga

2026

Dedicatoria (Opcional)

A mis padres, Olga Lucía Soto Rodríguez y Alonso Delgado Chaparro, por su amor incondicional, por su constante apoyo y por haber sido el pilar fundamental en mi formación y en cada paso de este camino.

A mis hermanos y al resto de mi familia, por su cariño, comprensión y por estar siempre presentes en los momentos importantes.

A mi novia, Johana Velandia Espinosa, por su paciencia, su compañía y por haber compartido conmigo cada esfuerzo, cada duda y cada logro durante este proceso.

Este trabajo es un pequeño reflejo de todo el amor, el sacrificio y el apoyo que he recibido de ustedes.

Con profundo agradecimiento y cariño.

Agradecimientos (Opcional)

En primer lugar, doy gracias a Dios por haberme dado la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar este trabajo de grado.

A mis padres, Olga Lucía Soto Rodríguez y Alonso Delgado Chaparro, por su amor incondicional, su sacrificio constante y por ser el mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación en mi vida. A mis hermanos, Carolina Delgado Soto y Edgar Delgado Soto, por su apoyo, cariño y por estar siempre presentes.

A mi novia, Johana Velandia Espinosa, y a toda su familia, por su paciencia, comprensión y por acompañarme en cada etapa de este proceso con amor y motivación.

A mi director, Carlos Andrés Galán Pinilla, y a mi codirectora, Ana María Pérez Ceballos, por su valiosa orientación, exigencia y dedicación durante todo el desarrollo de este trabajo. Su conocimiento y apoyo fueron fundamentales para la culminación de esta tesis.

A mis compañeros Geordy Quintero, Edwin Linares, Kelly Miranda, Vanessa Guerrero y Andrea Castillo, por su amistad, colaboración y por compartir conmigo los momentos de estudio y esfuerzo. Su amistad ha marcado profundamente mi vida y permanecerá siempre en mi memoria.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por su enseñanza, orientación y apoyo a lo largo de toda la carrera.

A la Universidad Industrial de Santander y especialmente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por brindarme la formación académica y las herramientas necesarias para crecer como profesional.

A todos, mi más sincero agradecimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO.....	14
2. OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo General.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3. METODOLOGÍA	20
3.1 Fase 1. Revisión bibliográfica sobre Ensayos No Destructivos (END) y el método de partículas magnéticas	20
3.2 Fase 2 Diseño y fabricación de una muestra tipo placa con entallas de longitud controlada.....	21
3.3 Fase 3 Determinación de las condiciones óptimas de inspección mediante yugo electromagnético y puntas de contacto	31
3.4 Evaluación de la sensibilidad de las técnicas de inspección mediante yugo electromagnético y puntas de contacto	33
3.5 Análisis comparativo de los resultados obtenidos	35
3.6 Redacción del informe final de investigación.....	35
4. RESULTADOS.....	36

5. CONCLUSIONES 46

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Dimensiones de referencia de las entallas artificiales fabricadas mediante EDM</i>	29
Tabla 2. <i>Sistema de experimentos para el yugo electromagnético y puntas de contacto</i>	33
Tabla 3. <i>Orden aleatorio de las corridas para cada entalla para la técnica de yugo electromagnético y puntas de contacto</i>	34
Tabla 4. <i>Resultados de inspección de las tres entallas con la técnica de puntas de contacto</i>	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Representación de una grieta la cual interrumpe la trayectoria normal de las líneas de flujo en un bloque ferromagnético.....</i>	15
Figura 2. <i>Representación esquemática de las técnicas de magnetización de inspección por partículas magnéticas.....</i>	17
Figura 3. <i>Flujograma de la metodología seguida en el trabajo de grado.....</i>	20
Figura 4. <i>Dimensiones de la muestra tipo placa utilizada para el estudio.....</i>	22
Figura 5. <i>Vista en corte transversal de la placa con las dimensiones teóricas de las entallas fabricadas mediante EDM.....</i>	23
Figura 6. <i>Dimensiones de referencia obtenidas de la entalla L1 con microscopía óptica utilizando un lente de 35X y realizando análisis con software ImageJ.....</i>	24
Figura 7. <i>Reconstrucción de 3D en escala de grises mediante microscopía Confocal.....</i>	26
Figura 8. <i>Análisis de la variación de profundidad de la entalla L1 a partir de reconstrucciones 3D de diferentes planos de corte.....</i>	28
Figura 9. <i>Distribución de profundidades de referencia de las entallas artificiales L1, L2 y L3 obtenidas mediante reconstrucción 3D.....</i>	30
Figura 10. <i>Partículas magnéticas secas y húmedas fluorescentes utilizadas en el estudio: Magnaflux 3A, Magnaglo 14AM base oleosa y Magnaglo 14A base acuosa.....</i>	32
Figura 11. <i>Muestra tipo placa con entallas artificiales fabricadas mediante electroerosión por penetración.....</i>	36

Figura 12. <i>Resultado de la inspección con yugo electromagnético utilizando partículas húmedas fluorescentes verificación de la dirección y fuerza del campo mediante el indicador de tipo "pie gauge".....</i>	<i>37</i>
Figura 13. <i>Indicaciones superficiales detectadas con yugo electromagnético utilizando partículas secas.....</i>	<i>38</i>
Figura 14. <i>Indicaciones obtenidas en la entalla L1 con puntas de contacto en las corridas 1 y 2.....</i>	<i>40</i>
Figura 15. <i>Indicaciones obtenidas en la entalla L2 con puntas de contacto en las corridas 1 y 2.....</i>	<i>41</i>
Figura 16. <i>Indicaciones obtenidas en la entalla L3 con puntas de contacto en las corridas 1 y 2.....</i>	<i>42</i>
Figura 17. <i>Indicaciones detectadas en las entallas L1, L2 y L3 durante la corrida 3.....</i>	<i>43</i>
Figura 18. <i>Indicaciones detectadas en la corrida 4 en las entallas L1, L2 y L3 con partículas húmedas fluorescentes acuosas.....</i>	<i>43</i>

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Dimensiones de referencia obtenidas de la entalla L2 con microscopía óptica utilizando un lente de 35X y realizando análisis con software ImageJ</i>	51
Apéndice B. <i>Dimensiones de referencia obtenidas de la entalla L3 con microscopía óptica utilizando un lente de 35X y realizando análisis con software ImageJ</i>	51
Apéndice C. <i>Análisis de la variación de profundidad de la entalla L2 a partir de reconstrucciones 3D en diferentes planos de corte</i>	52
Apéndice D. <i>Análisis de la variación de profundidad de la entalla L3 a partir de reconstrucciones 3D en diferentes planos de corte</i>	52
Apéndice E. <i>Superficie de inspección libre de indicaciones mediante magnetización con yugo electromagnético y partículas secas</i>	53
Apéndice F. <i>Indicaciones detectadas en la corrida 4 en las entallas L1, L2 y L3 con partículas húmedas fluorescentes oleosas</i>	53

Resumen

Título: Comparación de la sensibilidad de las técnicas de magnetización con yugo electromagnético y puntas de contacto en la detección de entallas artificiales¹

Autor: Johan Sebastian Delgado Soto²

Palabras Clave: Partículas magnéticas, Ensayos no destructivos, Yugo electromagnético, Puntas de contacto, Entallas artificiales, Sensibilidad de detección, Discontinuidades subsuperficiales.

Descripción: La inspección por partículas magnéticas es uno de los métodos de ensayos no destructivos más utilizados para detectar discontinuidades planares superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos, pero su sensibilidad depende, entre otras, de la técnica de magnetización, el tipo de partículas y las dimensiones del defecto. Este trabajo comparó la sensibilidad de las técnicas de yugo electromagnético y puntas de contacto en la detección de entallas artificiales planares subsuperficiales. Se fabricó una muestra de acero ASTM A36 con tres entallas mecanizadas por electroerosión (EDM) de longitudes 2,5 mm, 5 mm y 10 mm. Se realizó un diseño experimental factorial 2² con 12 inspecciones por técnica, evaluando la separación entre polos/puntas y el tipo de partículas magnéticas, todas con corriente directa y corriente continua de media onda (DC/HWDC) mediante el método continuo. Los resultados mostraron que el yugo electromagnético no generó ninguna indicación detectable en las 12 corridas, mientras que las puntas de contacto presentaron una sensibilidad significativamente superior, detectando la entalla L3 en todas las configuraciones. Las partículas húmedas fluorescentes ofrecieron mayor contraste visual y las secas destacaron por su mejor movilidad. La longitud de la entalla resultó el factor dominante en la detectabilidad. Se concluye que las puntas de contacto con campo circular son más efectivas para la detección de discontinuidades planares subsuperficiales, proporcionando criterios cuantitativos para optimizar planes de inspección en la industria.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. 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: Sensitivity Comparison Between Electromagnetic Yoke and Contact Prods Techniques for Detecting Artificial Subsurface Notches in Ferromagnetic Steel¹

Author: Johan Sebastian Delgado Soto²

Key Words: Magnetic Particles, Non-Destructive Testing, Electromagnetic Yoke, Contact Prods, Artificial Notches, Detection Sensitivity, Subsurface Discontinuities

Description: Magnetic particle testing (MT) is one of the most widely used non-destructive testing methods for detecting surface and subsurface discontinuities in ferromagnetic materials. However, its sensitivity depends on the magnetization technique, particle type, and defect dimensions. This study compared the sensitivity of electromagnetic yoke and contact prods magnetization techniques for the detection of subsurface planar artificial notches. A reference sample was fabricated from ASTM A36 steel containing three EDM-machined notches with controlled lengths of 2.5 mm, 5 mm, and 10 mm. A 2² factorial experimental design was implemented, consisting of 12 inspections per technique, evaluating pole/probe spacing and particle type (dry and fluorescent wet). All inspections were performed using direct current (DC) or half-wave direct current (HWDC) under the continuous magnetization method.

The results showed that the electromagnetic yoke produced no detectable indications in any of the 12 runs. In contrast, the contact prods technique exhibited significantly higher sensitivity, consistently detecting the L3 notch (longest) in all configurations. Fluorescent wet particles provided superior visual contrast, while dry particles stood out for their greater mobility on the surface. Notch length proved to be the dominant factor influencing detectability.

It is concluded that contact prods with circular magnetic fields are more effective for detecting subsurface planar discontinuities. These findings provide quantitative criteria for optimizing inspection plans in the metallurgical industry.

¹ Degree Work

² Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. 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

En la industria metalúrgica y en sectores estratégicos como el automotriz, aeronáutico, petrolero y de generación de energía, el aseguramiento de la integridad de los materiales y componentes metálicos es un factor determinante para garantizar la seguridad, la confiabilidad y la eficiencia operativa (Carvalho et al., 2008). En este sentido, los ensayos no destructivos (END) constituyen una herramienta esencial, ya que permiten identificar, evaluar y controlar posibles discontinuidades o daños en piezas y estructuras sin comprometer su funcionalidad ni alterar sus propiedades (Deepak et al., 2021).

Dentro de los diversos métodos de END, la inspección por partículas magnéticas (MT, por sus siglas en inglés) se emplea ampliamente para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales críticas, como las grietas en materiales ferromagnéticos. Su versatilidad y facilidad de aplicación la han convertido en un método de elección en múltiples áreas industriales (“Magnetic-Particle Inspection,” 2018). No obstante, la sensibilidad de detección que ofrece este método depende de variables críticas, tales como la técnica de magnetización, la orientación del campo magnético respecto a la discontinuidad y la profundidad a la que se ubica esta discontinuidad respecto a la superficie, la geometría de la pieza y la naturaleza de los defectos presentes, así como, de las condiciones de inspección (tipo de corriente, de partículas y de procedimiento de inspección utilizado). Esto plantea la necesidad de realizar estudios que permitan evaluar y comparar cuantitativamente la capacidad real de detección bajo condiciones controladas (Bubela & Babak, 2022).

En este contexto, la presente investigación planteó el desarrollo de una muestra de referencia con entallas de longitud controlada, fabricadas por electroerosión por penetración,

simulando discontinuidades artificiales subsuperficiales de morfología plana, buscando condiciones límite o críticas de sensibilidad de detección de cada una de las técnicas en estudio del presente trabajo. Este recurso experimental constituye una herramienta útil para comparar la respuesta de las técnicas de magnetización, yugo electromagnético y puntas de contacto, en la detección de defectos de dimensiones conocidas. Proporciona, criterios para definir parámetros del plan de inspección en función de datos cuantitativos de sensibilidad, al igual que determinar la profundidad efectiva de penetración del campo magnético útil al momento de definir el alcance de inspección para cada técnica.

1. Marco teórico

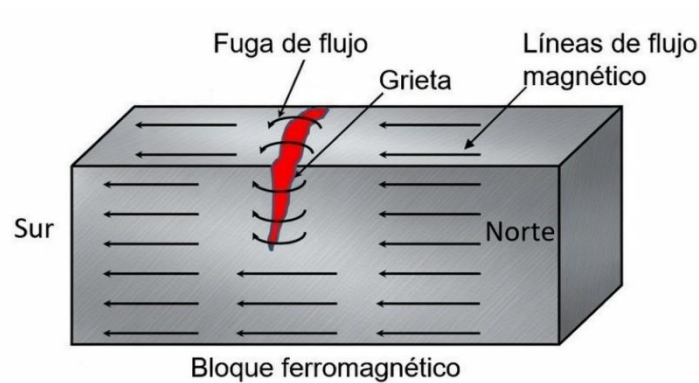
Los ensayos no destructivos (END) son técnicas para evaluar materiales, piezas o uniones a fin de detectar discontinuidades, sin inutilizar el componente ni alterar su desempeño (American Society for Metals, 1989). La posibilidad de verificar la calidad durante la fabricación, la operación y el mantenimiento, constituyen un pilar de la confiabilidad en sectores como aeronáutico, automotriz, energético y ferroviario (Wu et al., 2024), así como su capacidad de detectar defectos tempranos sin sacrificar productividad en procesos de fabricación y unión (Deepak et al., 2021).

Los END obtienen información del estado superficial, subsuperficial e interno mediante diferentes métodos complementarios de inspección, los cuales, a diferencia de los ensayos destructivos, producen indicaciones interpretables sin causar daño, habilitando inspecciones en servicio. Entre los métodos de inspección más utilizados para la detección de grietas se encuentran las partículas magnéticas, que brindan ventajas operativas y soportan estrategias de mantenimiento preventivo (Yuan et al., 2021); de forma complementaria, su adopción sistemática reduce reemplazos prematuros y riesgos operativos al elevar la confiabilidad global de la inspección (Ferreira et al., 2012).

La inspección por partículas magnéticas (Magnetic Testing, MT) detecta discontinuidades de morfología planar, superficiales y cercanas a la superficie en materiales ferromagnéticos. La pieza se magnetiza y las irregularidades interrumpen el flujo de las líneas de magnetización, generando fuga de flujo como se observa en la Figura 1, las cuales atraen partículas y producen indicaciones visibles. Esta combinación de sensibilidad y facilidad de uso la posiciona como opción preferente en muchas líneas de inspección (Wu et al., 2024), con tiempos de ejecución competitivos frente a otros END en rutinas de planta (Yuan et al., 2021).

Figura 1.

Representación de una grieta la cual interrumpe la trayectoria normal de las líneas de flujo en un bloque ferromagnético.



Nota. La imagen representa la interrupción de las líneas de flujo, generando un campo de fuga magnética (flux leakage) que emerge hacia la superficie. Tomado de: Federal Highway Administration. Modificado por el autor. Fuente: https://infotechnology.fhwa.dot.gov/magnetic-particle-testing-mt/?utm_source

El fundamento físico de MT es la fuga de flujo magnético como se ilustra en la Figura 1, donde una grieta altera la permeabilidad magnética local y provoca escape de campo que concentra partículas finas en la superficie. La intensidad de magnetización y las propiedades magnéticas del material a estudiar controlan el fenómeno (Lee et al., 2003), y la orientación de la discontinuidad respecto al campo aplicado modula la sensibilidad de la indicación (Katoh et al., 2000). Esta orientación del campo es determinante, ya que la máxima respuesta se obtiene cuando líneas de flujo son perpendiculares a la grieta, condición que maximiza la densidad de fuga y la acumulación de partículas (Lee et al., 2003).

La confiabilidad de este método depende de variables del proceso de magnetización y de las partículas. El tipo de corriente ya sea continua (DC) o alterna (AC), controla la penetración de la magnetización y el contraste (Katoh et al., 2003). La AC resalta defectos superficiales por su baja penetración, mientras que la DC es más adecuada para discontinuidades no conectadas con la superficie del material (Wu et al., 2024). Por otra parte, la concentración, tamaño y movilidad de las partículas determinan el contraste y el ruido de fondo en la superficie inspeccionada (Wu et al., 2024).

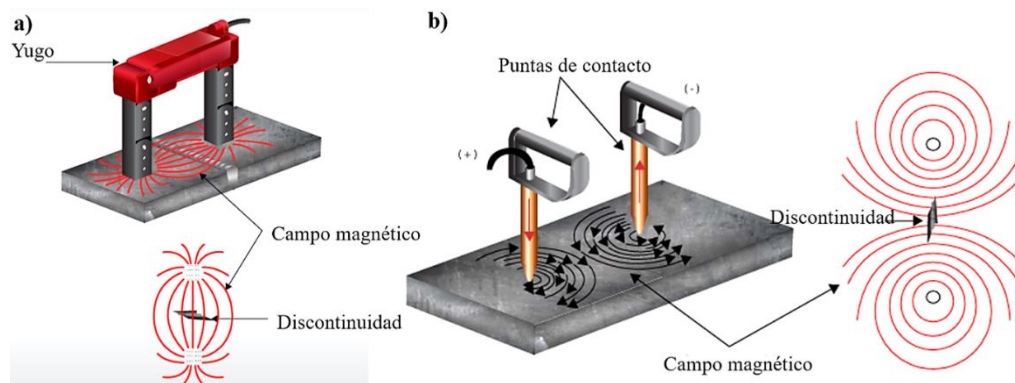
La sensibilidad del método de partículas magnéticas depende del sistema completo de magnetización de la pieza. Dentro de este sistema, la técnica de magnetización constituye uno de los factores más relevantes. Entre las técnicas más utilizadas, dos son usadas con objetivos y alcances similares, pero con ventajas y limitaciones propias el yugo electromagnético y las puntas de contacto. La selección de la técnica de ensayo influye directamente en la sensibilidad para detectar discontinuidades (Alvarado et al., 2024) y está condicionada por la geometría y el espesor del componente (Torres et al., 1992).

El yugo electromagnético es un dispositivo portátil que consiste en una bobina y un núcleo de hierro en forma de “U”, cuyas extremidades, constituyen los polos magnéticos, o patas del yugo, son los que se apoyan sobre la superficie de la pieza a inspeccionar induciendo un campo magnético longitudinal. En casos puntuales, por limitaciones geométricas o de acceso, el yugo electromagnético podría no establecer contacto directo con la superficie. En estas condiciones, la inspección se realiza con un determinado lift-off, permitiendo el ensayo, pero reduciendo significativamente la sensibilidad (García Tapias, 2025). Al momento de circular corriente por la bobina interna del yugo, se genera un campo magnético longitudinal entre los polos, de manera que la zona de inspección queda magnetizada en dirección paralela a la superficie, como se observa

en la Figura 2a). Esta técnica, de magnetización indirecta, es altamente efectiva para la detección de discontinuidades transversales a la dirección del campo magnético, especialmente fisuras y grietas superficiales (Stupakov et al., 2006). Su portabilidad y facilidad de uso lo convierten en uno de los equipos más utilizados en inspecciones de campo y en la industria aeroespacial y automotriz, sin embargo, el área efectiva de inspección es localizada (ASTM E1444, 2025). La norma ASTM E709 lo recomienda como método estándar en inspecciones de mantenimiento rutinario, particularmente cuando se requiere flexibilidad en el acceso a componentes de gran tamaño (ASTM E709, 2021).

Figura 2.

Representación esquemática de las técnicas de magnetización de inspección por partículas magnéticas



Nota. La imagen ilustra los esquemas del a) yugo electromagnético generando un campo longitudinal y b) puntas de contacto produciendo un campo circular alrededor del flujo de corriente por las puntas. Tomado de: Curso de inspección con partículas magnéticas (LOG S.A. de C.V., 2014). Modificado por el autor

Por otra parte, las puntas de contacto constituyen una técnica de magnetización directa. En este método, se hace pasar corriente eléctrica a través de la pieza mediante dos electrodos metálicos denominados puntas que se apoyan directamente sobre su superficie. Esta técnica genera un campo

magnético circular alrededor de la trayectoria de la corriente por cada punta (Massa, 1976), lo cual permite detectar discontinuidades orientadas de manera transversal a las líneas de campo circular como se muestra en la Figura 2b). El método es recomendado para inspecciones rápidas de soldaduras en estructuras metálicas y componentes de gran volumen, donde el uso de bobinas o yugos no resulta práctico (ASTM E3024, 2022). Adicionalmente, permite un control de la intensidad del campo magnético inducido a partir de la intensidad de corriente de magnetización utilizada y la separación entre las puntas, variable que no está incluida en el yugo al tener una única intensidad de corriente. No obstante, el uso de las puntas de contacto requiere un estricto control de los parámetros de inspección, tales como la separación entre electrodos y la intensidad de corriente. Dado que se trata de una técnica de magnetización directa, en la cual la corriente eléctrica circula a través de la propia pieza, se puede generar un calentamiento significativo por efecto Joule. Este calentamiento, si no es adecuadamente controlado, puede inducir cambios microestructurales y alterar las propiedades mecánicas y magnéticas del material. Además, un exceso de corriente o un falso contacto con la superficie puede producir quemaduras superficiales, afectando la integridad de la pieza o generando una magnetización no uniforme (Moore, 1998).

Las partículas magnéticas son el medio indicador en el ensayo, las cuales se concentran en las fugas de flujo revelando la presencia de discontinuidades. Estas partículas están fabricadas con materiales ferromagnéticos de alta permeabilidad y baja retentividad magnética, para responder fácilmente al campo y no quedar imantadas tras la inspección (American Society for Metals, 1989).

Se aplican en forma seca (polvo fino, útil en superficies rugosas) o en suspensión húmeda (en agua o aceite, visibles o fluorescentes). Las partículas fluorescentes son las más sensibles bajo luz ultravioleta, mientras que las secas resisten mejores condiciones de campo (ASTM E3024, 2022).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Comparar la sensibilidad de detección de entallas ideales con longitud controlada aplicando las técnicas de magnetización con yugo electromagnético y puntas de contacto.

2.2 Objetivos Específicos

Desarrollar una muestra con entallas de longitud controlada mecanizadas mediante electroerosión EDM para la evaluación de la sensibilidad de detección en las técnicas de magnetización por yugo electromagnético y puntas de contacto.

Establecer con base en un diseño de experimentos, las condiciones de inspección más adecuadas del yugo electromagnético y las puntas de contacto para la detección de las entallas mecanizadas en la muestra.

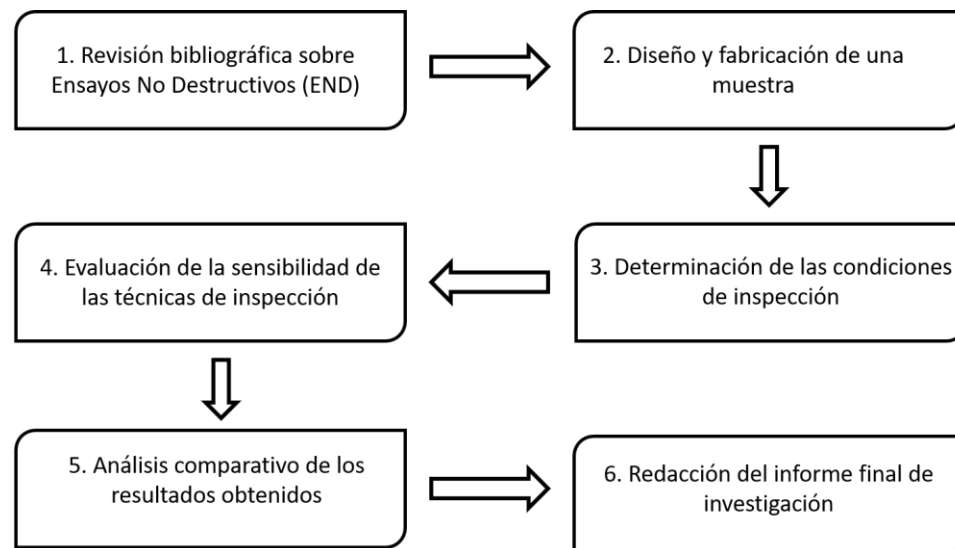
Comparar la sensibilidad de los dos métodos de magnetización, para las mejores condiciones de inspección determinadas, en la detección de entallas de longitud controlada mecanizadas por electroerosión.

3. Metodología

El presente proyecto de investigación se estructuró en una serie de fases, mostradas en la Figura 3, que se describen a continuación.

Figura 3.

Flujograma de la metodología seguida en el trabajo de grado



3.1 Fase 1. Revisión bibliográfica sobre Ensayos No Destructivos (END) y el método de partículas magnéticas

La revisión bibliográfica consistió en un proceso sistemático de búsqueda, selección y análisis de fuentes, orientado a comprender los fundamentos teóricos del método de partículas magnéticas y las técnicas de magnetización utilizadas en el presente estudio. Este trabajo se realizó a partir de los recursos disponibles en la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, donde se consultaron libros, normas técnicas, artículos científicos y trabajos de grado vinculados con el tema. Después, se estudiaron las normas que regulan el método de partículas magnéticas, en particular aquellas relacionadas con la aplicación del yugo electromagnético y de las puntas de

contacto (prods). Dicho análisis permitió establecer los parámetros técnicos y los procedimientos operativos que rigen estas técnicas.

De igual manera, se revisaron los principios físicos que sustentan el ensayo, especialmente el comportamiento del flujo magnético y la formación de fugas de campo en presencia de discontinuidades. Se analizó la forma en que las partículas magnéticas tanto secas como húmedas, se acumulan en dichas zonas, así como los factores que influyen en su sensibilidad y capacidad de detección. Las principales normas estudiadas fueron ASTM E709, ASTM E1444, ASTM E3024, ASME Sección V Artículo 7 y ASME Sección VIII División 2.

Con base en esta revisión, se evaluaron las ventajas y limitaciones operativas del yugo electromagnético y de las puntas de contacto, considerando aspectos como la intensidad y orientación del campo magnético, la distancia entre polos, el tipo de corriente aplicable (CA o CD) y sus implicaciones en la inspección, Asimismo, el diseño del bloque se llevó a cabo procurando que la geometría de las entallas mecanizadas con métodos disponibles localmente se aproximara al valor crítico de detección de las técnicas mencionadas, con el fin de evaluar la sensibilidad de inspección en condiciones críticas.

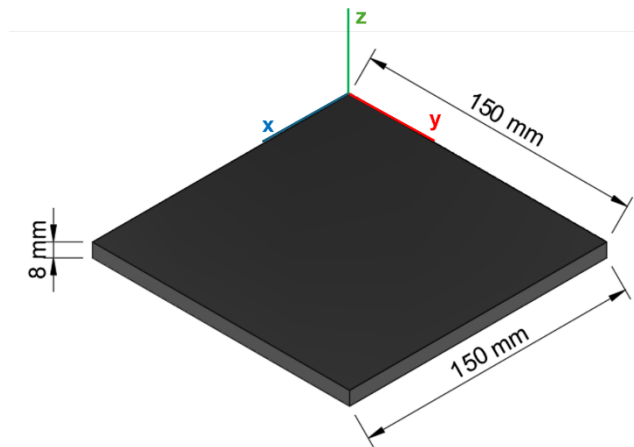
3.2 Fase 2. Diseño y fabricación de una muestra tipo placa con entallas de longitud controlada.

Se diseñó y fabricó una muestra tipo placa en acero ASTM A36 con entallas planares, con el fin de realizar la comparación experimental entre las técnicas de magnetización por yugo y puntas de contacto. La elección del acero A36 se basó en su alta permeabilidad magnética, lo que facilita la inducción de campos magnéticos y la detección de fugas en discontinuidades durante las inspecciones por partículas magnéticas (American Society for Metals, 1989), sumado a que es un acero ampliamente utilizado en la fabricación de estructuras metálicas. Las especificaciones

geométricas de dicha muestra se presentan en la Figura 4, las dimensiones de la muestra se diseñaron (longitud y ancho) fueron seleccionadas con el fin de permitir las inspecciones, garantizando una separación de las puntas de contacto y del yugo mínima de 3 pulgadas y máxima de 5.9 pulgadas. Este tamaño garantiza la distribución de las entallas artificiales de tal manera que es posible identificarlas sin que interfiera entre ellas. Adicionalmente, la penetración de las entallas se diseñó para posibilitar la detección de las discontinuidades planares desde la cara sana de la muestra mediante ambas técnicas, lo que facilita la comparación entre ellas al inspeccionar discontinuidades subsuperficiales.

Figura 4.

Dimensiones de la muestra tipo placa utilizada para el estudio.

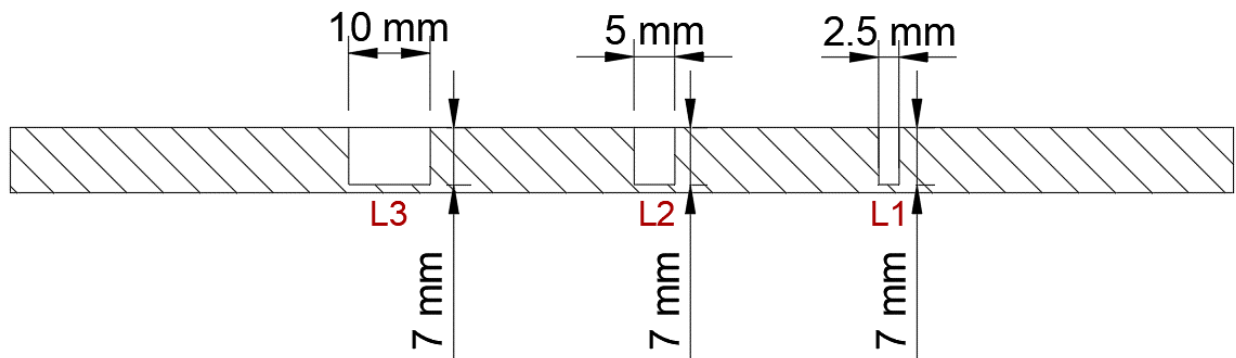


Se diseñaron tres entallas de longitud controlada, siendo esta la única dimensión variable, con valores comprendidos entre 2.5 mm y 10 mm. Estas medidas se seleccionaron con el propósito de evaluar hasta qué nivel de detección llegan las técnicas, estando dentro de los posibles rangos de detección/no detección, al igual que comprender cómo la variación en la longitud de la discontinuidad influye en su detectabilidad, estableciendo una progresión incremental de $L1=2.5$, $L2=5$ y $L3=10$ mm. Las tres entallas tienen una profundidad teórica de penetración de 7 mm,

quedando a 1 mm de profundidad medida desde la cara sana. Cada una fue identificada y descrita según sus dimensiones, las cuales se presentan en un corte de la vista frontal de la placa en la Figura 5. Dichas dimensiones corresponden a los valores teóricos especificados esperados para su fabricación, la cual fue realizada mediante mecanizado por electroerosión por penetración (EDM)

Figura 5.

Vista en corte transversal de la placa con las dimensiones teóricas de las entallas fabricadas mediante EDM.



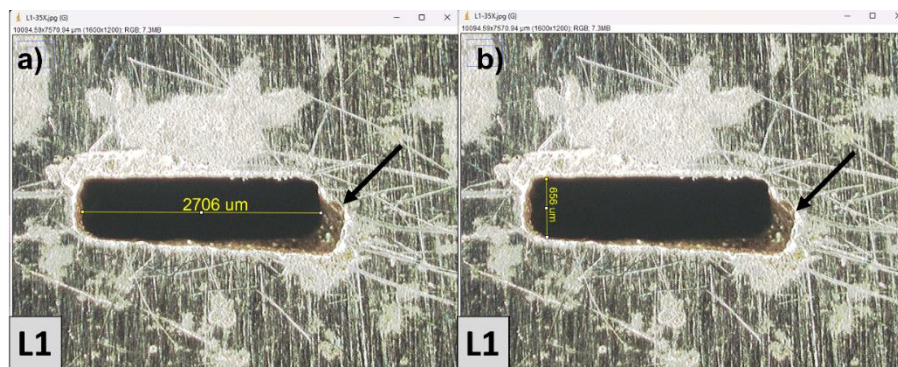
Una vez obtenida la placa con las entallas superficiales en una de sus caras, denominada cara mecanizada, se procedió a verificar las dimensiones generadas mediante el proceso de electroerosión (EDM), etapa fundamental, dado que proveerá las dimensiones y morfologías de referencia de las entallas. Para ello, se empleó un microscopio digital Hirox KH-7700 confocal de alta profundidad de campo visual, con un lente de 35X, registrándose para cada entalla una imagen que permitió determinar la longitud y ancho máximos, al igual que detalles cualitativos relacionados con la morfología de las entallas. Estas imágenes fueron posteriormente analizadas en el software ImageJ, donde se cargaron y calibraron utilizando la escala incluida en las fotografías capturadas por el microscopio en todos los casos. La calibración se realizó mediante la herramienta “Set Scale”, seleccionando la regla de referencia presente en la imagen, midiendo su

longitud en píxeles y convirtiéndola a unidades de milímetros, lo que permite transformar las mediciones digitales en valores para el análisis dimensional.

Una vez calibrado el software, se procedió a realizar la medición de la primera entalla, registrada como L1. El análisis de la entalla presenta como dimensiones máximas una longitud de $2706 \mu\text{m}$ (2.706 mm) y un ancho máximo de $656 \mu\text{m}$ (0.656 mm) como se muestra en la Figura 6a y 6b respectivamente. En la entalla L1 mostrada en la Figura 6, se observa en la parte inferior derecha un desgaste generado por uno de los electrodos utilizados en el primer contacto con la pieza, como lo señala la flecha de color negro, el cual no afecta el proceso de medición de la entalla, al tener una profundidad menor a $60 \mu\text{m}$. Aspecto no presentado en las entallas L2 y L3.

Figura 6.

Dimensiones de referencia obtenidas de la entalla L1 con microscopía óptica utilizando un lente de 35X y realizando análisis con software ImageJ.



Para el análisis de la segunda imagen correspondiente a la entalla L2, se determinó una longitud máxima de $5281 \mu\text{m}$ (5.281 mm) y un ancho máximo de $621 \mu\text{m}$ (0.621 mm), como se muestra en el Apéndice A.a (pág. 51) y A.b (pág 51) respectivamente, empleando el sistema previamente calibrado.

Para el análisis de la tercera imagen correspondiente a la entalla L3, se determinaron una longitud máxima de 8980 μm (8.980 mm) y un ancho máximo de 659 μm (0.659 mm) en el Apéndice B. (pág. 51) respectivamente, empleando el sistema previamente calibrado.

Una vez determinadas las dimensiones superficiales de las entallas, se procedió a determinar la profundidad máxima de cada discontinuidad mediante el uso del mismo microscopio Hirox, empleando la función de reconstrucción 3D. Este procedimiento se realizó con el fin de obtener datos de referencia de las dimensiones en cuanto a la profundidad de la entalla ideal y poder relacionar con la máxima sensibilidad que podría detectarse bajo las condiciones del presente trabajo de grado. Este procedimiento resultó necesario debido al reducido ancho de las entallas, el cual varió ligeramente entre cada una (0,656 mm en L1, 0,621 mm en L2 y 0,659 mm en L3), lo que dificulta significativamente la medición directa de la profundidad mediante técnicas convencionales. Debido a que las entallas presentan una morfología planar con valores similares de ancho, longitud y profundidad, el proceso de mecanizado se llevó a cabo empleando varios electrodos con el fin de minimizar el desgaste individual de cada uno y preservar la exactitud dimensional. Finalmente, se utilizó un electrodo específico para el mecanizado del fondo o la punta de la entalla. No obstante, la geometría obtenida no es perfectamente ideal, ya que el electrodo experimenta un desgaste progresivo, especialmente en sus bordes, que tiende a generar zonas redondeadas y a modificar la forma teórica del fondo o extremo.

Con el propósito de cuantificar las incertidumbres asociadas a la geometría real del fondo de las entallas, se realizaron reconstrucciones tridimensionales. Para esto, el fondo de la entalla se enfocó mediante el microscopio equipado con un lente de 140X. Inicialmente, se ajustó el enfoque ligeramente por encima de la superficie para optimizar la captura de la información.

Posteriormente, se activó el modo de reconstrucción 3D, definiendo un barrido progresivo del enfoque a lo largo del eje vertical (eje Z) hasta alcanzar el punto más profundo de la entalla.

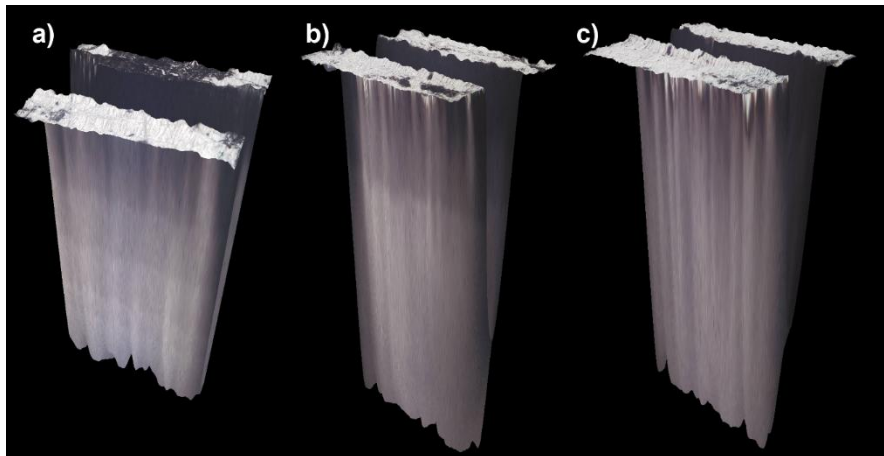
Este procedimiento presentó dificultades debido a la reflectividad del acero, ya que la reflexión de la luz en las paredes internas generó fenómenos de sobreexposición que afectaron la correcta visualización del fondo. Una vez establecida la profundidad máxima de análisis, se capturaron cuarenta imágenes correspondientes a diferentes planos focales distribuidos a lo largo del eje Z. Estas imágenes fueron procesadas mediante la técnica de apilamiento focal del software del equipo, obteniéndose un modelo tridimensional en escala de grises, como se muestra en la Figura 7.

En la Figura 7a, 7b y 7c se presentan las reconstrucciones tridimensionales de las tres entallas artificiales, correspondientes a L1, L2 y L3, respectivamente. La información derivada de esta reconstrucción es de carácter visual y cualitativo, y tiene como objetivo principal mostrar el perfil a lo largo del borde de cada entalla, permitiendo apreciar su morfología general.

Las tres entallas exhiben una geometría similar en cuanto a su forma, evidenciando que no se observan los bordes de los extremos redondeados o irregulares; siendo la principal diferencia entre ellas sus longitudes, cuyos valores teóricos fueron reportados previamente en la Figura 5. La morfología del fondo presenta rugosidad superficial con morfología similar para las tres entallas. A continuación, se presentan las mediciones obtenidas de cada una de ellas.

Figura 7.

Reconstrucción de 3D en escala de grises mediante microscopía Confocal



La Figura 8 ilustra las mediciones de profundidad máxima de la entalla L1, donde se llevaron a cabo tres capturas en planos transversales diferenciados con el objetivo de evaluar las variación en la profundidad a lo largo de su longitud de la entalla. Estas variaciones se manifiestan en las imagenes ilustradas como se señala con la flechas de color amarillo, observando una diferencia en el fondo entre 300 a 500 μm (0.3 a 0.5 mm) entre las zonas de máxima y minima penetración. En la parte superior de cada imagen, el cual se señala con la flecha de color verde, se detalla la morfología del fondo de la entalla con respecto al plano de captura, revelando que esta no tiene una forma estrictamente recta rectangular. Esta irregularidad se atribuye al fenómeno de redondeo en el electrodo, característico del mecanizado por electroerosión por penetración, por lo que en el borde la entalla es más fina que en la superficie.

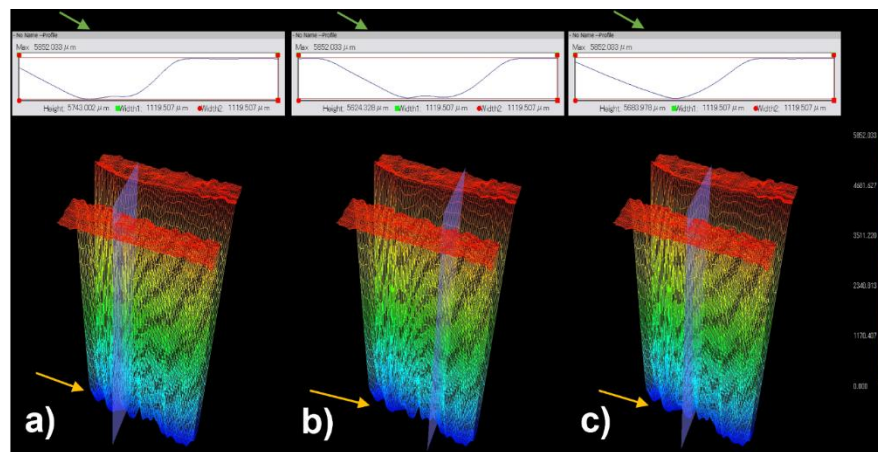
Las entallas no tienen un fondo plano con vértices y aristas definidas, más bien consiste en una terminación con bordes más finos, con leves variaciones según el corte donde se realice en análisis. En la Figura 8 se muestra la reconstrucción 3d y señalados con la flecha verde los planos de corte, ubicados en la parte superior de cada reconstrucción, los cuales muestran el perfil de la entalla.

La Figura 8 revela la evolución morfológica de la punta de la entalla L1: 8a muestra una curvatura central sobre un fondo semiplano; 8b y 8c presentan bordes redondeados por desgaste del electrodo.

En conjunto, la morfología registrada en la Figura 8 se asemeja más a una grieta aguda que a la forma plana idealizada, lo cual es deseable, ya que refleja un comportamiento de fractura más representativo y realista de la entalla.

Figura 8.

Análisis de la variación de profundidad de la entalla L1 a partir de reconstrucciones 3D en diferentes planos de corte.



En el Apéndice C. (pág. 52) se presenta el análisis de la profundidad de la entalla L2 mediante reconstrucción tridimensional, considerando tres planos de corte distintos a lo largo de su longitud. Se aprecia la evolución en la morfología o geometría de la entalla conforme avanza la penetración hasta alcanzar su valor máximo.

En el Apéndice C. (pág. 52) C.a, C.b y C.c identifican bordes redondeados que evidencian el desgaste del electrodo, mostrando una morfología similar a la registrada en la entalla L1. En

consecuencia, la reconstrucción de la L2 revela una geometría de fondo agudo en lugar de la configuración de fondo plano, careciendo de los vértices definidos.

En el Apéndice D. (pág. 52) presenta el análisis de profundidad de la entalla L3, realizado mediante reconstrucción tridimensional en tres planos de corte, siguiendo el procedimiento aplicado en las entallas L1 y L2. En el Apéndice D.a, correspondiente al extremo izquierdo, se observa una curvatura suave con fondo, lo que indica un desgaste del electrodo en este sector. Por su parte, la D.b, muestra bordes redondeados con un ligero desplazamiento hacia la sección posterior. Finalmente, el plano central D.c revela un redondeo uniforme agudo.

Una vez obtenidos los resultados de las mediciones dimensionales de las entallas mediante el microscopio confocal Hirox HK-7700, se realizó la comparación entre las dimensiones teóricas establecidas para el mecanizado indicadas en la Figura 5 y las dimensiones de referencia medidas después del mecanizado representadas en la Tabla 1.

En cuanto a la longitud de las entallas, se observa que las entallas L1 y L2 presentan incrementos respecto a sus valores teóricos, con unas desviaciones del orden de 0.2 a 0.3 mm. A diferencia, de la entalla L3 presenta una reducción en su longitud, indicando un valor 1.02 mm inferior.

Respecto al ancho de las entallas, las tres configuraciones presentan una variación similar, con incrementos aproximados de 0.16 mm frente a los valores teóricos.

Tabla 1.

Dimensiones de referencia de las entallas artificiales fabricadas mediante EDM.

Entalla	Longitud	Ancho
L1	2.706 mm	0.656 mm

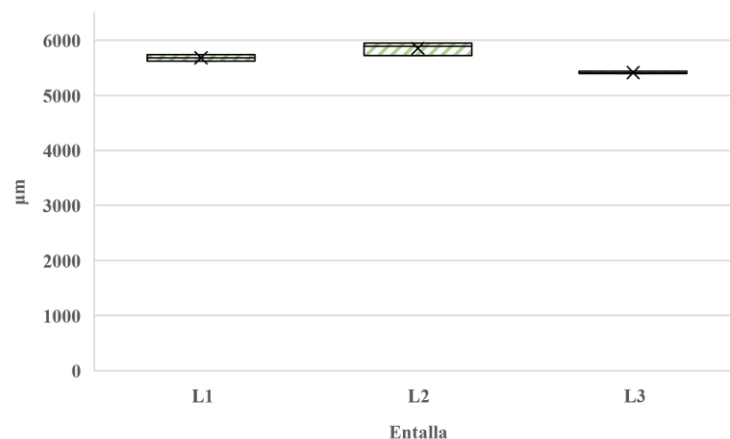
L2	5.281 mm	0.621 mm
L3	8.980 mm	0.659 mm

Una vez determinadas las dimensiones superficiales, se registraron las profundidades de referencia de cada entalla mediante reconstrucción 3D. La Figura 9 presenta un diagrama de cajas y bigotes que resume la distribución de las profundidades medidas en los tres planos de corte. Se observa una ligera variación entre las entallas, donde L2 registra la mayor profundidad media de 5895 μm , seguida de L1 con 5714 μm y finalmente L3 presenta una profundidad de 5423 μm .

En comparación con profundidad teórica de 7 mm, todas las entallas mostraron reducciones de 1316 μm para L1, 1114 μm para L2 y 1585 μm para L3. Estas diferencias reflejan el desgaste progresivo del electrodo durante el proceso de electroerosión por penetración. Con estos resultados se concluye que la profundidad de las entallas esta entre 2.01 mm y 2.577 mm, siendo un poco mayor a lo esperado de 1 mm, resultado que lleva a una condición de sensibilidad de detección un poco más crítica de la diseñada originalmente.

Figura 9.

Distribución de profundidades de referencia de las entallas artificiales L1, L2 y L3 obtenidas mediante reconstrucción 3D.



La caracterización mediante microscopía no tuvo únicamente un propósito dimensional, sino que permitió establecer las condiciones reales de las discontinuidades artificiales que serían utilizadas como referencia en la evaluación de las técnicas de inspección. De esta manera, se definieron tanto las dimensiones efectivas como la morfología de las entallas, incluyendo la geometría del fondo y las irregularidades asociadas al proceso de electroerosión, garantizando que la comparación de sensibilidad se realizará sobre defectos cuya principal diferencia es la longitud.

3.3 Fase 3. Determinación de las condiciones óptimas de inspección mediante yugo electromagnético y puntas de contacto

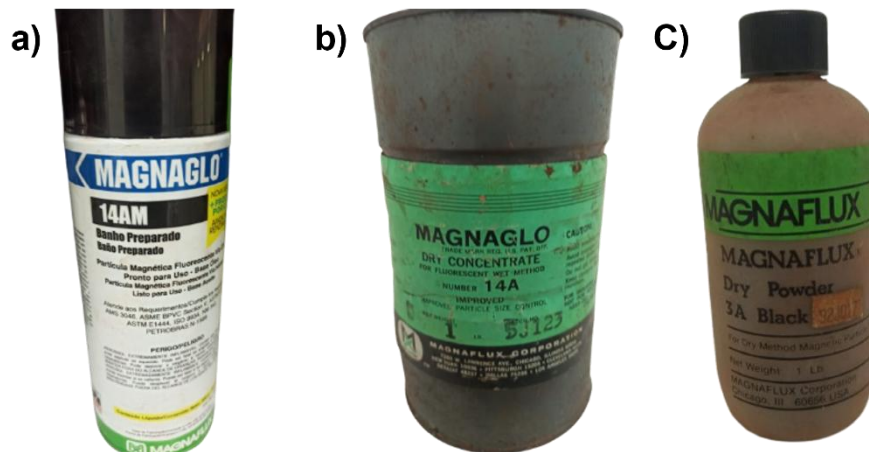
Se determinaron las condiciones de inspección para las técnicas de magnetización con yugo electromagnético y puntas de contacto, identificando las variables controlables por el inspector y los parámetros de cada técnica establecidos por la norma (ASTM E1444, 2025). El análisis se centró en evaluar su influencia sobre la sensibilidad de detección de discontinuidades subsuperficiales en las entallas artificiales, priorizando la detección y visibilidad de las indicaciones con las partículas magnéticas en superficie, en el cual se enfoca el uso de corriente directa (DC), que logra obtener una mayor penetración en los materiales ferromagnéticos, dado que la corriente alterna (AC) mostró menor desempeño en la detección de defectos subsuperficiales según revisiones previas (García Tapias, 2025b).

Para el yugo electromagnético y puntas de contacto, se seleccionaron dos variables, ya que se empleó exclusivamente corriente directa. La primera variable es la distancia entre polos, denominada separación entre polos (SP), esta afecta la intensidad y distribución del campo magnético, donde un aumento moderado extiende el área efectiva de inspección, pero se reduce la densidad de flujo y la sensibilidad de defectos (Kato et al., 2003). La segunda variable corresponde al tipo de partículas magnéticas, las cuales son secas de referencia Magnaglo 3A o las

húmedas fluorescentes. En este sentido, las inspecciones experimentales se realizaron utilizando ambos tipos de partículas, húmedas fluorescentes de base oleosa de referencia Magnaglo 14AM (ver Figura 10a), adicionalmente se realizaron corridas con húmedas fluorescentes de base acuosa de referencia Magnaglo 14A (ver Figura 10b), la cual se realiza con fines de comparación de sensibilidad y contraste. Esta variable influyó en la sensibilidad del ensayo, ya que cada tipo de partículas presenta características particulares en cuanto a tamaño, forma, movilidad y visibilidad. Las partículas secas Magnaflux 3A (ver Figura 10c), se presentan en vía seca, conformadas por dos morfologías, esféricas y alargadas, mediante una mezcla balanceada de ambas formas con el fin de mejorar la movilidad de las partículas sobre la superficie de inspección, estas partículas tienen tamaños entre 60 y 100 μm . Las partículas húmedas se caracterizan por su menor tamaño, que se encuentran entre 5 y 20 μm , lo que permite una mejor definición y visualización de las discontinuidades bajo iluminación ultravioleta al ser fluorescentes, mientras que las secas se destacan por una mayor movilidad durante la inspección.

Figura 10.

Partículas magnéticas secas y húmedas fluorescentes utilizadas en el estudio: Magnaflux 3A, Magnaglo 14AM base oleosa y Magnaglo 14A base acuosa.



3.4 Fase 4. Evaluación de la sensibilidad de las técnicas de inspección mediante yugo electromagnético y puntas de contacto

Luego de la elaboración de la muestra tipo placa y la selección de las variables de estudio, se determinaron las condiciones de inspección, para lo cual se procedió a realizar un diseño de experimentos. De esta manera se buscó evaluar el efecto de las variables seleccionadas, la separación tanto de polos como de las puntas de contacto y el tipo de partículas magnéticas, para la comparación de la sensibilidad de las técnicas de inspección. Para este fin, se implementó un sistema de experimentos factorial 2^2 , aleatorio en cuatro corridas por cada entalla de la muestra, resultando en un total de doce inspecciones por cada técnica de magnetización. En la Tabla 2 se resumen las variables, factores y los niveles estudiados para el yugo electromagnético y puntas de contacto.

Tabla 2.

Sistema de experimentos para el yugo electromagnético y puntas de contacto

Variable	Factor	Diseño para el yugo		Diseño para las puntas	
		Valor	Nivel	Valor	Nivel
Separación de polos	Sp	3 in	SP1	3 in	SPC1
		5 in	SP2	5.9 in	SPC2
Tipo de partícula	Tp	Húmedas	Tp1	Húmedas	Tp1*
		Secas	Tp2	Secas	Tp2

*: Dos tipos de partículas magnéticas húmedas 14a y 14AM.

En el caso del yugo la intensidad de corriente se mantuvo constante, dado que el yugo no compensa la intensidad de corriente en función de la separación de los polos. Por otra parte, para las puntas de contacto se mantuvo un nivel de corriente de 100 Amp/in, lo que indica que por cada pulgada de separación de las puntas se aplicó un nivel de corriente de 100 amperios. Esta selección

se debe a que el yugo directamente trae la opción de DC, mientras que el generador de referencia P-90 cuenta con control de intensidad de corriente seleccionando la opción HWDC al ser una fuente rectificadora monofásica. Esta selección se basa en la recomendación normativa para la inspección de discontinuidades subsuperficiales, ya que la corriente alterna (AC) genera el efecto piel, lo que limita su penetración (ASTM E709, 2021).

Para las corridas experimentales, se procedió a calibrar el yugo electromagnético y las puntas de contacto según las separaciones de los polos o puntas especificadas por factor (SP o SPC) y el tipo de partículas magnéticas seleccionada por el factor (Tp). La inspección se realizó mediante el método de magnetización continuo en todos los casos, el cual consiste en la aplicación del campo magnético y la dispersión de las partículas sobre la superficie de la muestra en el mismo instante, bajo iluminación blanca para partículas secas o ultravioleta en cuarto oscuro para partículas húmedas fluorescentes. Se inspeccionaron las tres entallas artificiales en cada corrida ubicando la entalla en el centro del área efectiva de inspección, registrando las indicaciones observadas. En la Tabla 3 se ilustra el orden aleatorio de las cuatro corridas para cada técnica de magnetización.

Tabla 3.

Orden aleatorio de las corridas para cada entalla para la técnica de yugo electromagnético y puntas de contacto.

Corrida	Sistema Yugo		Sistema Puntas	
	Tp	SP	SPC	Tp
1	Tp2	SP2	SPC1	Tp1
2	Tp2	SP1	SPC1	Tp2
3	Tp1	SP2	SPC2	Tp2
4	Tp1	SP1	SPC2	Tp1

3.5 Fase 5. Análisis comparativo de los resultados obtenidos

Una vez completadas las inspecciones experimentales descritas en la etapa 3.4, se procedió al análisis comparativo de los resultados para evaluar la sensibilidad de las técnicas de magnetización en la detección de las entallas artificiales. El análisis consistió en la observación de las indicaciones formadas en cada corrida, registrando parámetros visuales cualitativos en cuanto a si detecta o no detecta y la longitud.

3.6 Fase6. Redacción del informe final de investigación

La fase final de la metodología consistió en la compilación y redacción del trabajo de grado, en la cual se organizaron los resultados obtenidos, con el análisis, interpretación y resolución de los objetivos planteados. Por último, se elaboró el informe final del trabajo para su presentación ante la Escuela.

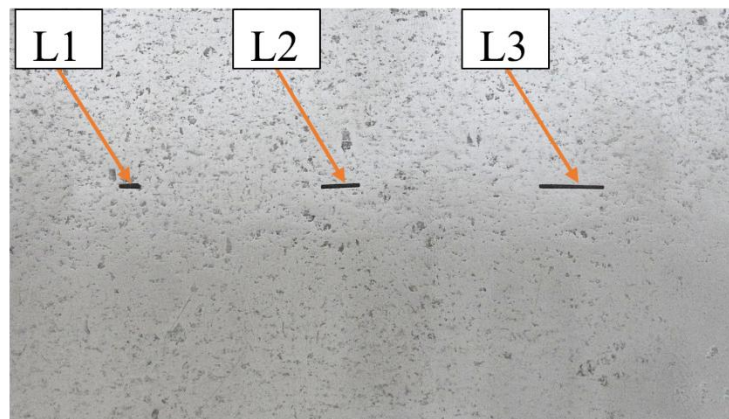
4. Resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de las inspecciones experimentales realizadas conforme a la metodología descrita en el capítulo anterior. Los datos resultan de las doce inspecciones realizadas por técnica de magnetización yugo electromagnético y puntas de contacto, aplicadas sobre las tres entallas artificiales con longitudes controladas.

Una vez finalizado el mecanizado por electroerosión, se obtuvo la muestra tipo placa. Como se muestra en la Figura 11. Esta placa presenta tres entallas artificiales de morfología planar con longitudes controladas L1, L2, L3, distribuidas de forma que permitan la inspección independiente con ambas técnicas de magnetización sin interferencias.

Figura 11.

Muestra tipo placa con entallas artificiales fabricadas mediante electroerosión por penetración.



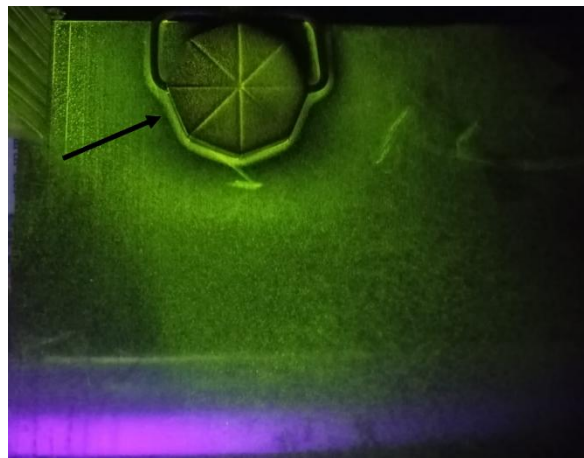
Tras realizar las doce inspecciones experimentales utilizando la técnica de magnetización con el yugo electromagnético, no se detectó ninguna indicación asociada a las discontinuidades subsuperficiales, obteniendo una superficie sin ninguna aglomeración de partículas en todos los casos probados, como se muestra en el Apéndice E (pág. 53). Este resultado sugiere una sensibilidad limitada de la técnica bajo las configuraciones evaluadas en el presente trabajo. Para

verificar la presencia y la intensidad del campo magnético adecuado durante la inspección, se empleó un indicador de campo tipo pie gauge, el cual confirmó la presencia del flujo magnético, sin llegar a generar indicaciones de las entallas artificiales, como se mencionó acá. Como se observa en la Figura 12, se evidencia la acumulación de partículas húmedas en el pie gauge, sin obtener el resultado de las entallas, concluyendo que la técnica no logra identificar ninguna indicación en las zonas de las entallas, bajo ninguna de las condiciones de inspección con el yugo.

En el Apéndice E. (pág. 53) se observa la superficie de inspección de la placa con partículas dispersas, sin acumulaciones lineales o un contraste que indiquen discontinuidades presentes en las zonas de las entallas.

Figura 12.

Resultado de la inspección con yugo electromagnético utilizando partículas húmedas fluorescentes verificación de la dirección y fuerza del campo mediante el indicador de tipo "pie gauge"



La ausencia de detección obtenida al aplicar la técnica de inspección con yugo electromagnético en todos los casos sobre la muestra fabricada no implica una falla del equipo o de la técnica, sino una limitación inherente al campo longitudinal frente a la detección de las

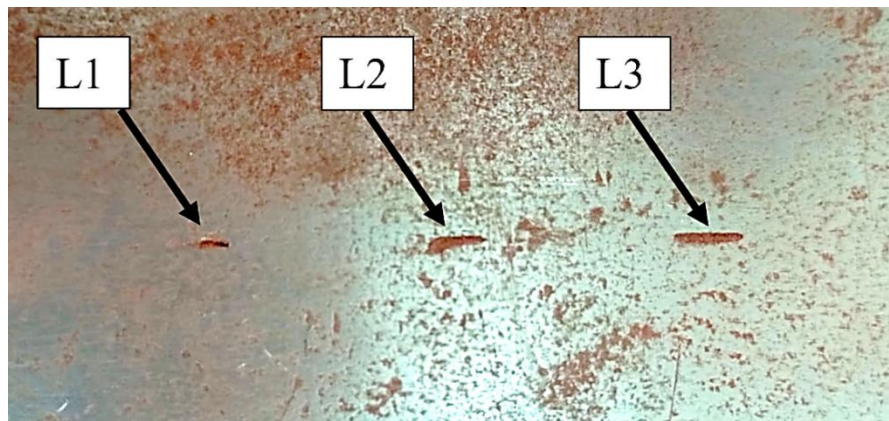
discontinuidades planares subsuperficiales de longitud reducida, las cuales por diseño se aproximaron a valores críticos de detección del método en general. Esto indica que la sensibilidad no alcanza en ningún caso de estudio a detectar una discontinuidad planar subsuperficial, 5.4 mm de profundidad, de 8.9 mm de longitud y 2.6 milímetros de profundidad para el caso menos crítico, L3.

En la Figura 12 se muestra la superficie de la placa con partículas fluorescentes dispersas, destacando por brillo verde uniforme sin acumulaciones lineales en las zonas de las entallas artificiales. La flecha indica el pie gauge, que confirma la presencia de un campo magnético efectivo mediante las indicaciones lineales. Sin embargo, bajo inspección con este sistema de inspección no se evidenció la presencia de ninguna indicación.

En la Figura 13 se muestra el resultado de inspección al aplicar la corrida 1, la cual consiste en 5 pulgadas de separación con el yugo, ubicado sobre la superficie mecanizada, con partículas magnéticas secas, como ensayo rápido adicional de verificación del sistema de inspección. Las acumulaciones lineales de partículas magnéticas en las zonas de las entallas artificiales, evidencian la detección efectiva de discontinuidades superficiales. Sin embargo, la ausencia de indicaciones para defectos subsuperficiales sugiere una limitación en profundidad de penetración del campo magnético longitudinal generado por el yugo.

Figura 13.

Indicaciones superficiales detectadas con yugo electromagnético utilizando partículas secas



Tras la aplicación de la técnica de inspección con puntas de contacto, y en contraste con los resultados obtenidos mediante el yugo electromagnético, se evidenciaron indicaciones de las discontinuidades en varias corridas, lo que demuestra una mayor sensibilidad en la detección de entallas artificiales subsuperficiales. De las doce corridas totales realizadas con las puntas utilizando partículas 14A, se observaron detecciones definidas para la entalla L3, la de mayor longitud en todos los casos de inspección efectuados. Por lo contrario, las entallas L1 y L2 presentaron una detección variable en función de las configuraciones aplicadas, como se detalla a continuación.

A continuación, en la Tabla 4. Se presenta el resumen de los resultados de detección, indicando las corridas en las que la técnica si detecta o no detecta para cada entalla artificial. Se emplea una codificación binaria donde, SI es la detección de la discontinuidad, NO es la ausencia total de detección, bajo las condiciones evaluadas con las partículas 14A, permitiendo una comparación cuantitativa de la sensibilidad de la técnica. Se evidenció en el trabajo la diferencia de sensibilidad de la base en la que se encuentran las partículas húmedas, evidenciando una menor sensibilidad de las partículas magnéticas húmedas base oleosa de referencia 14AM, donde en ninguno de los casos logró detectar las discontinuidades mecanizadas.

Tabla 4.

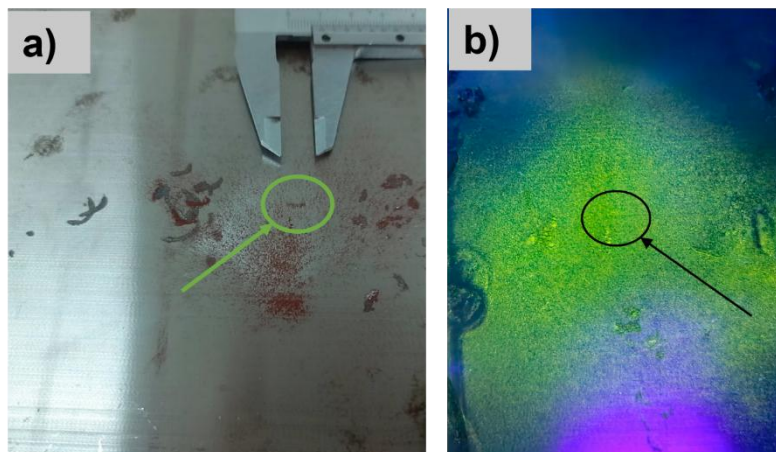
Resultados de inspección de las tres entallas con la técnica de puntas de contacto

Corrida	Sp	Tp	L1	L2	L3
1	Sp1	Tp1	NO	SI	SI
2	Sp1	Tp2	NO	SI	SI
3	Sp2	Tp2	SI	SI	SI
4	Sp2	Tp1	NO	NO	SI

En la Figura 14 se muestran los resultados de las primeras corridas realizadas sobre la entalla L1, las más pequeña, con puntas de contacto. En la imagen 14a), correspondiente a la corrida 1, se observa una leve acumulación lineal de partículas magnéticas en la cual se señala con un círculo verde, confirmando en este caso la detección de la discontinuidad, indicando que, aunque el contraste es bajo, y la acumulación de las partículas es baja, se logra identificar. Sin embargo, en condiciones de alta rugosidad superficial o partículas de bajo contraste podría no identificarse. Por otra parte, en la imagen 14b), se presenta la corrida 2, se indica con el círculo negro en la zona donde se ubica la entalla, caso donde visualmente no se logró ver alguna evidencia de acumulación de las partículas magnéticas húmedas fluorescentes base agua o base oleosa.

Figura 14.

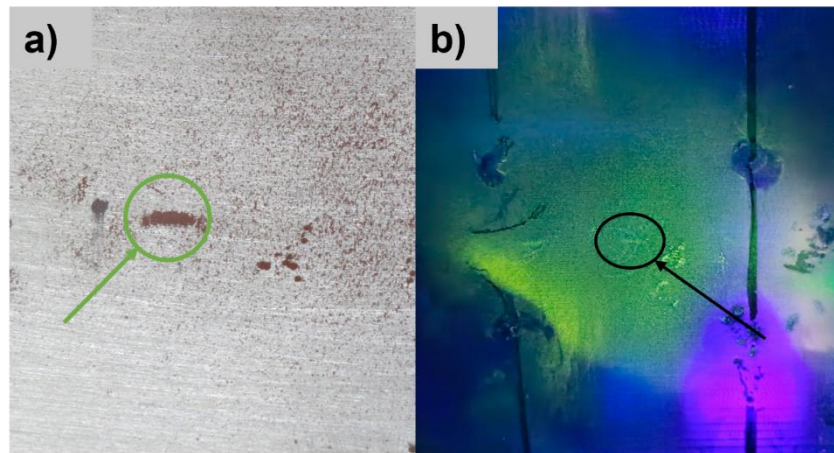
Indicaciones obtenidas en la entalla L1 con puntas de contacto en las corridas 1 y 2



En la Figura 15. se ilustran los resultados de las corridas 1 y 2 sobre la entalla L2 utilizando puntas de contacto. En la imagen 15a), correspondiente a la corrida 1, se observa una indicación lineal de a entalla por la agrupación de las partículas, con un contraste definido, resaltada con circulo verde, confirmado la detección bajo esta configuración. En comparación, a la imagen 15b), de la corrida 2, se muestra una indicación de muy bajo contraste encerrada en el círculo, sin que pueda llegarse a apreciar con claridad, resultado similar tanto para las partículas húmedas base agua, como para las partículas húmedas base aleosa respecto a las partículas secas para una entalla de las características dimensionales de L2.

Figura 15.

Indicaciones obtenidas en la entalla L2 con puntas de contacto en las corridas 1 y 2

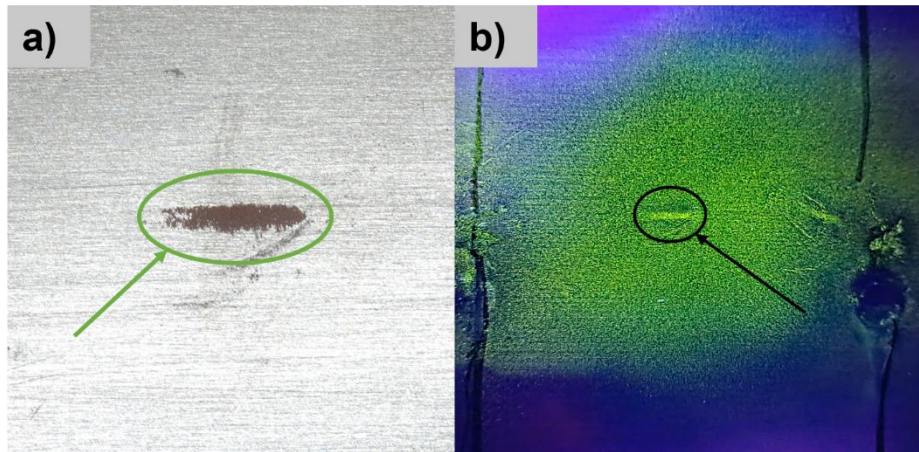


En la Figura 16 se aprecian los resultados de las corridas 1 y 2 sobre la entalla L3. En la imagen 16a), correspondiente a la corrida 1, se observa la indicación lineal de la entalla por la agrupación de las partículas, resaltada con circulo verde, confirmando la detección bajo esta configuración. En la imagen 16b), se señala la indicación de la entalla L3, sin embargo, el contraste es bajo y la detección en condiciones reales de campo podría verse reducida, resultado que

evidencia las desventajas de las partículas magnéticas húmedas al momento de detectar discontinuidades subsuperficiales respecto al uso de partículas secas.

Figura 16.

Indicaciones obtenidas en la entalla L3 con puntas de contacto en las corridas 1 y 2



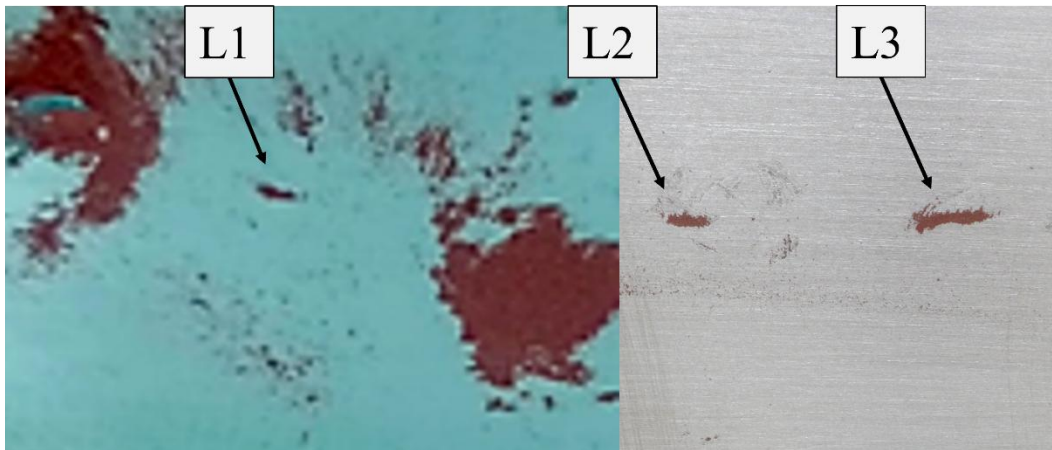
La Figura 16 compara los resultados de inspección obtenidos con partículas magnéticas secas y húmedas base acuosa. Se observa que las partículas húmedas detectan la discontinuidad con un contraste deficiente, mientras que la detectabilidad es nula al emplear partículas húmedas de base oleosa, comportamiento que fue consistente en todos los ensayos. Cabe destacar que el registro fotográfico bajo luz ultravioleta presenta limitaciones técnicas que dificultan la captura fiel de la fluorescencia; por lo tanto, la evaluación de los END se fundamenta en la inspección directa de la pieza y no en la evidencia fotográfica

En la Figura 17 se evidencia la detección simultánea de indicaciones en las tres entallas artificiales mediante una sola aplicación del campo magnético para la corrida 3. Esta imagen corresponde a una única aplicación del campo magnético circular con una separación máxima de 5,9 in, con la que se inspeccionaron las tres discontinuidades en un solo paso al cubrir el área efectiva de inspección las tres entallas. Las acumulaciones lineales resaltan las fugas magnéticas

de cada entalla, demostrando la capacidad de la técnica para cubrir múltiples discontinuidades superficiales en un área extensa con una sola magnetización.

Figura 17.

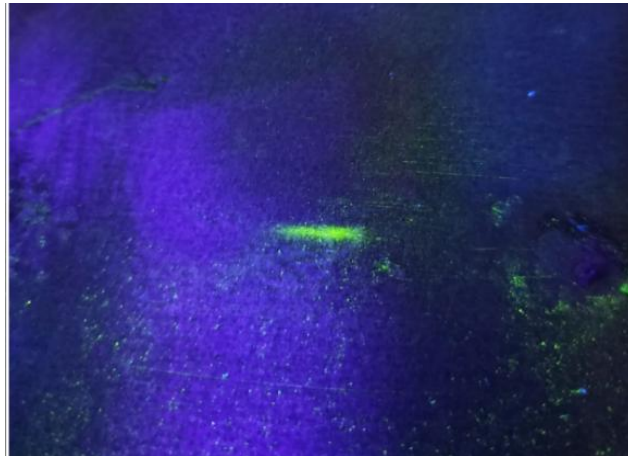
Indicaciones detectadas en las entallas L1, L2 y L3 durante la corrida 3.



En la Figura 18 se presenta la corrida 4 realizada con partículas húmedas fluorescentes de base acuosa. Esta imagen corresponde a una única aplicación del campo magnético circular separación máxima de 5,9 in, con la que se inspeccionaron las tres discontinuidades en un solo paso. En esta configuración únicamente se observó una indicación clara en la entalla L3, mientras que las entallas L1 y L2 no generaron ninguna indicación detectable. Se aprecia una acumulación lineal de partículas fluorescentes de alta intensidad y excelente contraste que resalta la fuga de flujo magnético correspondiente a la entalla L3.

Figura 18.

Indicaciones detectadas en la corrida 4 en las entallas L1, L2 y L3 con partículas húmedas fluorescentes acuosas.



En el Apéndice F. (pág. 53) se muestran los resultados de la corrida 4 realizada con partículas húmedas fluorescentes de base oleosa. En esta inspección no se detectó ninguna indicación en las tres entallas artificiales. La superficie muestra una distribución uniforme de partículas sin acumulaciones lineales. En la figura se señalan las zonas correspondientes a las entallas (L1, L2 y L3), donde deberían observarse las indicaciones

Los resultados evidencian una clara diferencia en la sensibilidad de detección según el tipo de campo magnético aplicado. En el caso del yugo electromagnético, que genera un campo longitudinal, no produjo indicaciones detectables en ninguna de las 12 corridas, independientemente de la separación entre polos y del tipo de partículas, debido a las características de la distribución del campo magnético, a que la pieza no hace parte del circuito dada la magnetización indirecta, aspectos que pueden conducir a que la penetración de intensidad resulte ser insuficiente para la inspección, siendo en este caso menor a 2.2 milímetros. En contraste, la inspección con las puntas de contacto, al generar una magnetización directa, donde existe un flujo de corriente por la pieza, se garantiza la existencia de un campo asociado a ese flujo de corriente, con campo circular, y al control de intensidad de corriente, lo que conduce a detectar indicaciones bajo las configuraciones de estudio, mostrando que este sistema de magnetización

tiene mayor sensibilidad para discontinuidades planares subsuperficiales utilizando tanto partículas secas como partículas húmedas fluorescentes. Según los casos mostrados. En este sentido es posible indicar, que las puntas logran magnetizaciones con intensidad efectiva a profundidad de hasta 2.2 milímetros.

Respecto al tipo de partículas, las húmedas fluorescentes ofrecieron mayor contraste y visibilidad superior a las secas. Sin embargo, las de base oleosas generaron indicaciones de contraste deficiente, limitando la captura con cámara fotográfica en cuarto oscuro bajo luz UV, mientras que las de tipo acuosas presentaron mayor intensidad y contraste, facilitando su identificación con iluminación UV, al igual que su registro fotográfico más fácil. Por su parte, las partículas magnéticas secas mostraron un mejor desempeño. Su mayor movilidad permitió una distribución más uniforme y una acumulación más efectiva en las fugas de flujo magnético generadas por las entallas. Esta característica resultó en indicaciones más definidas y con menor ruido de fondo en comparación con las partículas húmedas fluorescentes.

Los resultados experimentales permiten establecer un umbral de sensibilidad para la técnica de puntas de contacto, evidenciando que es capaz de detectar discontinuidades planares subsuperficiales de al menos ~9 mm de longitud, L3, a una profundidad aproximada 2.2 mm desde la cara sana. En contraste, discontinuidades de menor longitud, como L1 y L2, presentan una respuesta variable o incluso no detectable bajo ciertas configuraciones, lo que sugiere la existencia de un rango crítico de dimensiones por debajo del cual la técnica pierde efectividad. Este resultado permite no solo confirmar la mayor sensibilidad de las puntas de contacto frente al yugo electromagnético, sino también definir condiciones límite de detectabilidad relevantes para aplicaciones industriales.

5. Conclusiones

El presente trabajo de grado cumplió con el objetivo general planteado, comparar la sensibilidad de las técnicas de magnetización con yugo electromagnético y puntas de contacto en la detección de entallas artificiales de longitud controlada y a partir de los datos recopilados, se presentan las siguientes conclusiones:

Los resultados evidenciaron que la técnica de puntas de contacto posee una sensibilidad superior a la del yugo electromagnético bajo las condiciones experimentales evaluadas. Mientras que el yugo no permitió obtener indicaciones confiables en ninguna de las doce inspecciones, las puntas de contacto lograron una detectabilidad del 66% del total de las pruebas. Se destaca que la entalla L3 fue identificada consistentemente en todas las configuraciones, mientras que la detección en las entallas L1 y L2 presentó una variabilidad condicionada principalmente por la distancia entre puntas y el tipo de partículas empleadas.

El medio de suspensión oleoso o acuoso de las partículas húmedas fluorescentes desempeñó un papel determinante en la sensibilidad del ensayo. Mientras que las de base oleosa (14AM) no permitieron obtener indicaciones nítidas bajo las condiciones evaluadas, el uso de partículas de base acuosa (14A) mejoró significativamente el contraste y la definición. De esta forma mostraron mayor sensibilidad, al igual que el registro fotográfico.

Se evidenció que la longitud de las entallas influye directamente en la sensibilidad de detección del ensayo. La entalla L3, a pesar de presentar la mayor dificultad de inspección al tener la mayor profundidad desde la cara sana entre las tres entallas, fue detectada de manera sistemática en todas las corridas con las puntas de contacto. En contraste, las entallas de menor longitud mostraron detección variable o limitada según las configuraciones evaluadas. Por el contrario, la

técnica de yugo electromagnético no logró detectar ninguna entalla independientemente de su longitud, lo que refuerza la superioridad de las puntas de contacto para la detección de defectos subsuperficiales de morfología planar.

El análisis del diseño experimental permitió establecer que las condiciones más adecuadas de inspección corresponden a la técnica de puntas de contacto, especialmente el uso de partículas secas, debido a su mayor sensibilidad para detectar discontinuidades subsuperficiales. En contraste, el yugo electromagnético no presentó detección bajo ninguna configuración evaluada, evidenciando su limitada capacidad para este tipo de discontinuidades, por lo que se sugiere la selección de puntas de contacto con corriente HWDC en el caso de requerir sensibilidad para discontinuidades subsuperficiales. Si bien las partículas húmedas ofrecieron mejor contraste visual, las secas mostraron un mejor desempeño en términos de detectabilidad de las entallas bajo superficie.

Se obtuvo una probeta de acero ASTM A36 con tres entallas artificiales mecanizadas mediante electroerosión (EDM). La geometría de estas discontinuidades, caracterizada por puntas agudas en lugar de planas, permitió simular defectos planares de carácter subsuperficial. El uso de esta probeta como recurso experimental validó que el cumplimiento de los parámetros de la norma ASTM E1444 es insuficiente para garantizar la detección con yugo y corriente directa defectos de baja longitud, evidenciando que la técnica de puntas de contacto con corriente HWDC posee una capacidad de penetración superior bajo estas condiciones críticas.

Referencias Bibliográficas

- Alvarado, J. W. V., García, L. F. C., Neira, M. T., & Flores, J. W. V. (2024). PROBABILITY OF DEFECTS DETECTION IN WELDED JOINTS USING THE MAGNETIC PARTICLE METHOD. *Archives of Metallurgy and Materials*, 69(2), 607–612. <https://doi.org/10.24425/amm.2024.149789>
- American Society for Metals. (1989). *ASM Metals Handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control* (9th edition). ASM International.
- ASTM E709. (2021). *ASTM E709: Guide for Magnetic Particle Testing*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0709-21>
- ASTM E1444. (2025). *ASTM E1444: Practice for Magnetic Particle Testing for Aerospace*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E1444_E1444M-25
- ASTM E3024. (2022). *ASTM E3024: Practice for Magnetic Particle Testing for General Industry*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E3024_E3024M-22A
- Bubela, A. I., & Babak, K. Yu. (2022). Influence of various factors on sensitivity of magnetic powder control. *Glavnyj Mekhanik (Chief Mechanic)*, (1), 8–14. <https://doi.org/10.33920/pro-2-2201-01>
- Carvalho, A. A., Rebello, J. M. A., Souza, M. P. V., Sagrilo, L. V. S., & Soares, S. D. (2008). Reliability of non-destructive test techniques in the inspection of pipelines used in the oil industry. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(11), 745–751. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.05.001>
- Deepak, J. R., Bupesh Raja, V. K., Srikanth, D., Surendran, H., & Nickolas, M. M. (2021). Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and

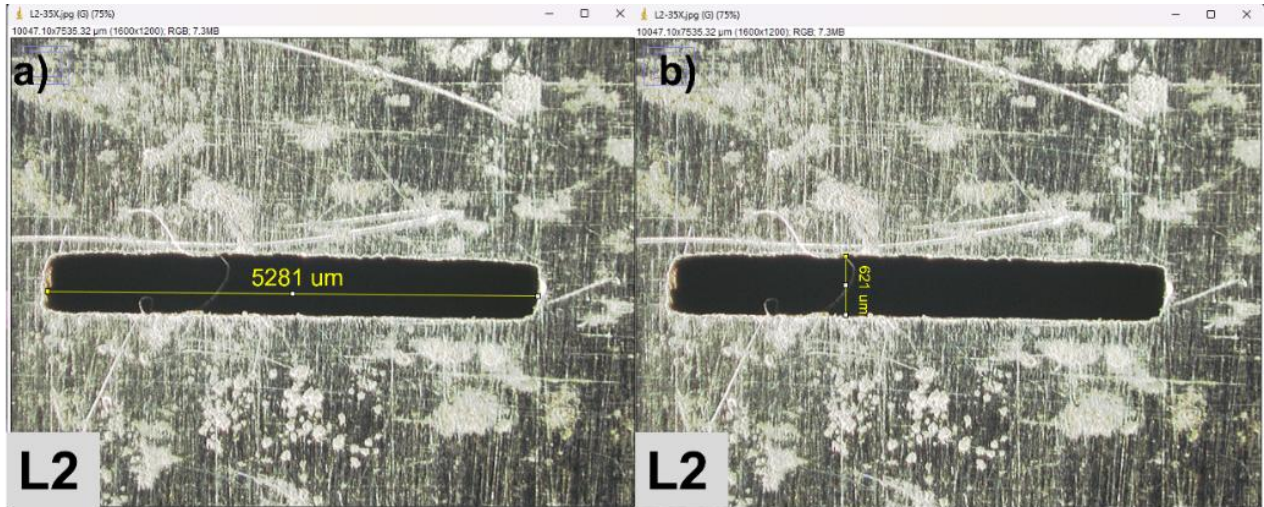
- experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3732–3737.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.578>
- Ferreira, R. F., Da Costa Teixeira, R., Gomes, L. S., Ogawa, M., Botega, S. P., Moreira, A. B., De, R., & Carneval, O. (2012). *Study of Probability of the Detection of Defects in Welded Joints of the Techniques of Magnetic Particle and Penetrant Testing*. www.ndt.net/?id=15550
- García Tapias, J. A. (2025a). *SENSIBILIDAD DE DETECCIÓN CON YUGO ELECTROMAGNÉTICO 2 Dedicatoria*.
- García Tapias, J. A. (2025b). *SENSIBILIDAD DE DETECCIÓN CON YUGO ELECTROMAGNÉTICO 2 Dedicatoria*.
- Katoh, M., Masumoto, N., Nishio, K., & Yamaguchi, T. (2003). Modeling of the yoke-magnetization in MFL-testing by finite elements. *NDT and E International*, 36(7), 479–486.
[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00051-3)
- Katoh, M., Nishio, K., & Yamaguchi, T. (2000). *FEM study on the influence of air gap and specimen thickness on the detectability of flaw in the yoke method*.
www.elsevier.com/locate/ndteint
- Lee, J. Y., Lee, S. J., Jiles, D. C., Garton, M., Lopez, R., & Brasche, L. (2003). Sensitivity Analysis of Simulations for Magnetic Particle Inspection Using the Finite-Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(6), 3604–3606. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2003.816152>
- Magnetic-Particle Inspection. (2018). In *Nondestructive Evaluation of Materials* (pp. 96–123). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v17.a0006468>
- Massa, G. M. (1976). *Finding the optimum conditions for weld testing by magnetic particles*.
- Moore, P. O. . (1998). *Nondestructive testing handbook*. American Society for Nondestructive Testing.

- Stupakov, O., Tomáš, I., & Kadlecová, J. (2006). Optimization of single-yoke magnetic testing by surface fields measurement. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(2), 248–254. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/2/003>
- Torres, M. M., Migliano, A. C. C., & Neto, F. S. (1992). *Determination of Optimum Test Parameters for Magnetic Particle Inspection which Uses the Yoke Technique*.
- Wu, Q., Dong, K., Qin, X., Hu, Z., & Xiong, X. (2024). Magnetic particle inspection: Status, advances, and challenges — Demands for automatic non-destructive testing. *NDT and E International*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.103030>
- Yuan, F., Yu, Y., Li, L., & Tian, G. (2021). Investigation of DC Electromagnetic-Based Motion Induced Eddy Current on NDT for Crack Detection. *IEEE Sensors Journal*, 21(6), 7449–7457. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049551>

Apéndices

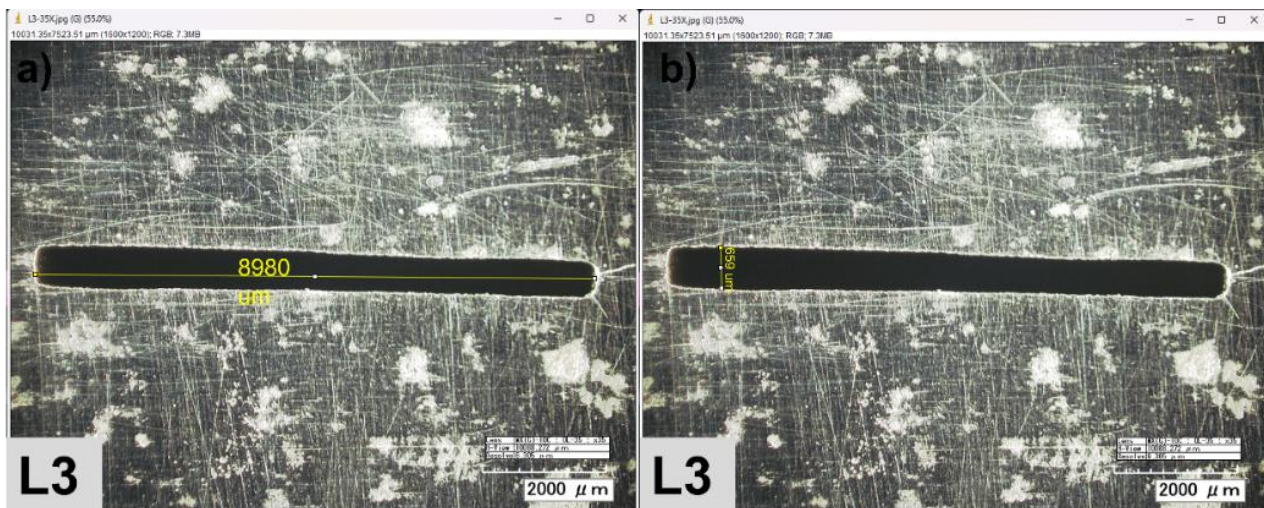
Apéndice A.

Dimensiones de referencia obtenidas de la entalla L2 con microscopía óptica utilizando un lente de 35X y realizando análisis con software ImageJ.



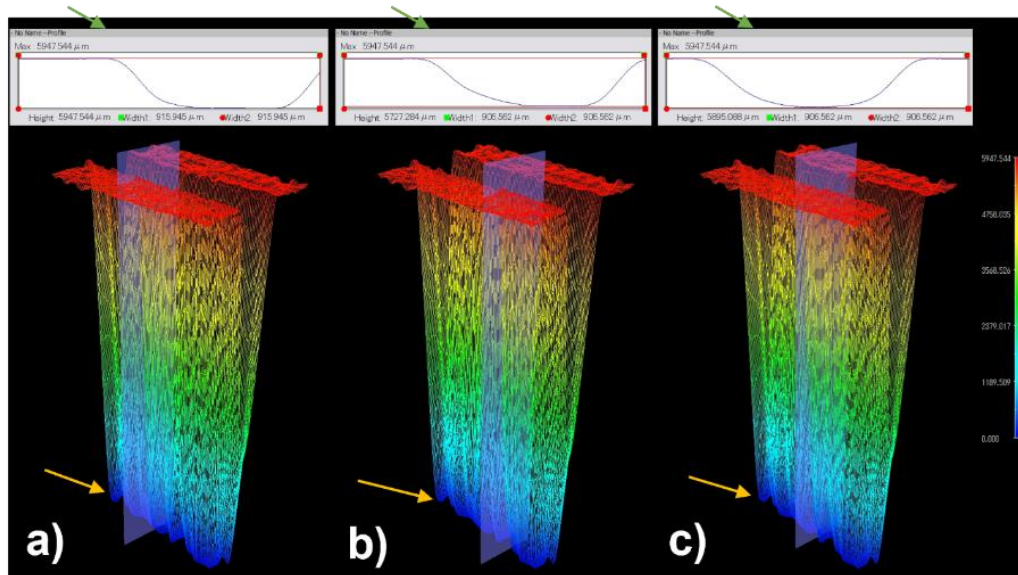
Apéndice B.

Dimensiones de referencia obtenidas de la entalla L3 con microscopía óptica utilizando un lente de 35X y realizando análisis con software ImageJ



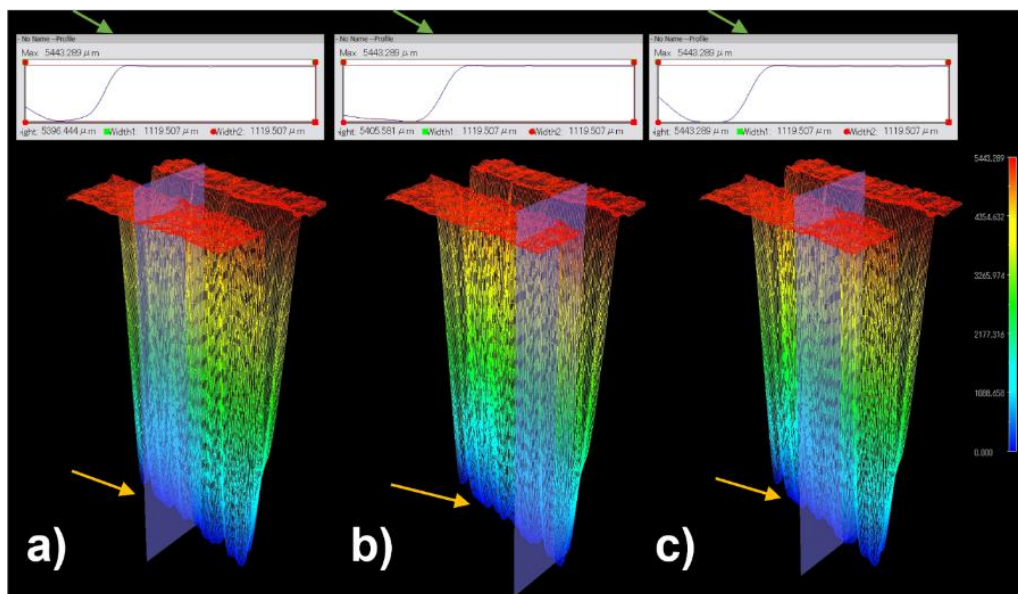
Apéndice C.

Análisis de la variación de profundidad de la entalla L2 a partir de reconstrucciones 3D en diferentes planos de corte



Apéndice D.

Análisis de la variación de profundidad de la entalla L3 a partir de reconstrucciones 3D en diferentes planos de corte.



Apéndice E.

Superficie de inspección libre de indicaciones mediante magnetización con yugo electromagnético y partículas secas.

**Apéndice F.**

Indicaciones detectadas en la corrida 4 en las entallas L1, L2 y L3 con partículas húmedas fluorescentes oleosas.

