

Desarrollo de una bobina electromagnética de bajo costo para inspección no destructiva por partículas magnéticas para fines académicos.

Juan Camilo Carreño Romero

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero metalúrgico

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla

Doctor en ciencia de materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por todas sus bendiciones y por darme la fortaleza para culminar esta etapa. A mi madre, Rocio Romero, por su apoyo incondicional y por creer en mí incluso cuando otros no lo hicieron. A mi padre, Jairo Moreno, por su esfuerzo diario y sacrificio, que hicieron posible mi formación académica. A mi hermana, Maria José, por estar siempre presente y confiar en mí. A mi novia, María Fernanda, por ser un pilar fundamental de apoyo emocional y motivación durante este proceso.

Agradezco especialmente al profesor Galán, por su valiosa orientación y consejos a lo largo del desarrollo de este proyecto. Al técnico Oscar, por su colaboración y disposición, sin la cual la realización de los ensayos no habría sido posible.

Finalmente, extiendo mi gratitud a la Universidad Industrial de Santander, por brindarme una formación académica y humana que ha sido clave en mi desarrollo personal y profesional; y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por el acompañamiento, la guía y el compromiso de sus docentes en mi proceso de formación.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1 Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2 Marco teórico	14
2.1 Fundamentación teórica	14
2.1.1 Partículas magnéticas.	17
2.1.2 Procedimiento del ensayo por partículas magnéticas MT utilizando bobinas.	17
2.1.3 Factor de llenado.	18
3 Metodología	20
3.1 ETAPA 1. Revisión bibliográfica.	20
3.2 ETAPA 2. Realización de los cálculos necesarios y diseño de la bobina con software 3D.	21
3.3 ETAPA 3. Fabricación de la bobina.	21
3.4 ETAPA 4. Evaluar la sensibilidad de la bobina con alto y bajo factor de llenado.	22
3.5 ETAPA 5. Análisis de resultados.	22
3.6 ETAPA 6. Redacción y presentación del documento final.	23
4 Resultados	23
4.1 Cálculos de funcionamiento y diseño de la bobina a fabricar.	23

4.1.1 Corriente de magnetización.	23
4.1.2 Longitud del cable	26
4.1.3 Parámetros de la bobina.	27
4.1.4 Modelación 3D de la bobina.	28
4.1.5 Fabricación de la bobina.	29
4.2 Evaluación de la sensibilidad de la bobina.	30
4.2.1 Ensayo partículas magnéticas secas.	30
4.2.2 Ensayo partículas magnéticas húmedas.	37
4.2.3 Ensayo de partículas magnéticas secas y húmedas sub-superficiales.	42
4.3 Sensibilidad de la bobina.	44
4.4 Desarrollo de programa Python.	47
5 Conclusiones	47
6 Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices	53

Lista de Figuras

Figura 1	Comportamiento del campo magnético por una discontinuidad en el material	14
Figura 2	Barra magnetizada con dirección de campo magnético longitudinal.	16
Figura 3	Esquema sobre factor de llenado de una bobina, elaboración propia.	19
Figura 4	Esquema de la metodología del proyecto	20
Figura 5	Gráfica de valores de amperaje de la bobina con 5-6 espiras.	26
Figura 6	Modelamiento y planos de la bobina con la base de madera.	28
Figura 7	Fabricación de la bobina electromagnética.	30
Figura 8	Bobina comercial presente en el laboratorio de ensayos no destructivos (Magna-flux glenview type L-10, 110V, 60Hz).	31
Figura 9	Resultado de sensibilidad con partículas secas a placa soldada.	32
Figura 10	Resultado de sensibilidad con partículas secas a medidor pay.	33
Figura 11	Resultado de sensibilidad con partículas secas a una junta homocinética.	35
Figura 12	Resultado de sensibilidad con partículas secas a una junta homocinética.	36
Figura 13	Resultado de sensibilidad con partículas secas a un cigüeñal.	37
Figura 14	Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a placa soldada.	38
Figura 15	Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a medidor pay.	39
Figura 16	Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a una junta homocinética.	40

Figura 17	Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a una junta homocinética.	41
Figura 18	Resultado de sensibilidad con partículas secas a pieza con entallas.	43
Figura 19	Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a pieza con entallas.	44
Figura 20	Certificado otorgado por la presentación de una ponencia relacionada con el desarrollo de la bobina fabricada en el marco del presente proyecto.	57

Lista de Tablas

Tabla 1	Ecuaciones utilizadas para el cálculo de intensidad de corriente en función del factor de llenado y ubicación de la pieza en el interior de la bobina.	24
Tabla 2	Valores de amperaje requerido por la bobina según el factor de llenado y la ubicación de la pieza.	25
Tabla 3	Parámetros de la bobina fabricada.	27
Tabla 4	Resultados de inspección a las piezas de prueba.	45

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A Programa para uso de la bobina	53
Apéndice B Productos de conocimiento.	57

Resumen

Título: Desarrollo de una bobina electromagnética de bajo costo para inspección no destructiva por partículas magnéticas para fines académicos. *

Autor: Juan Camilo Carreño Romero **

Palabras Clave: Ensayos no destructivos, electromagnetismo, bobina, amperaje, partículas magnéticas.

Descripción: El ensayo de partículas magnéticas (MT) dentro de las pruebas no destructivas para realizar inspección a materiales metálicos ferromagnéticos es de gran importancia a nivel académico como industrial. En la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales se tienen bobinas fijas (diámetro fijo) para la inspección de piezas de diferentes tamaños, esto puede causar que en ciertas piezas no se detecten ciertas discontinuidades y que no se puedan estudiar los efectos de ciertos parámetros de inspección sobre los resultados, fundamentales en los procesos de formación, adicionalmente, en los casos de bajo factor de llenado provoca una poca estabilidad y fuerza del campo magnético generado por la bobina fija. Ante esa necesidad, se establece el desarrollo de una bobina de diámetro variable que pueda detectar con una alta sensibilidad las discontinuidades de piezas de tamaño variable como una alternativa de análisis. Con ese fin, se realiza la investigación correspondiente acudiendo al uso de normas, como lo son la ASTM E709-21 y ASTM E1444, los cálculos de acuerdo a los parámetros establecidos, el diseño mediante software 3D y la fabricación de la bobina. Para el sistema de magnetización haciendo uso de la norma ASTM E1444, se estableció un parámetro de máximo 1285 Amperes, siendo para magnetización longitudinal. Posterior a la construcción de la bobina electromagnética se hicieron pruebas de sensibilidad a piezas disponibles en el laboratorio de ensayos no destructivos con partículas magnéticas secas y húmedas, comparando los resultados de la bobina fabricada respecto a la bobina comercial disponible en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Industrial de Santander.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Programa académico. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. Doctor en ciencia de materiales. Codirector: Darío Yesid Peña Ballesteros. Doctor en corrosión

Abstract

Title: Development of a low-cost electromagnetic coil for nondestructive magnetic particle inspection for academic purposes. *

Author: Juan Camilo Carreño Romero **

Keywords: Non-destructive testing, electromagnetism, coil, amperage, magnetic particles.

Description: Magnetic particle testing (MT) within the non-destructive testing for inspection of ferromagnetic metallic materials is of great importance at both academic and industrial level. In the school of Metallurgical Engineering and Materials Science there are fixed coils (fixed diameter) for the inspection of parts of different sizes, this can cause that in certain parts certain discontinuities are not detected and that the effects of certain inspection parameters on the results, fundamental in the formation processes, cannot be studied, additionally, in cases of low filling factor causes a low stability and strength of the magnetic field generated by the fixed coil. In view of this need, the development of a variable diameter coil that can detect with high sensitivity the discontinuities of parts of variable size is established as an alternative of analysis. To this end, the corresponding research was carried out using standards such as ASTM E709-21 and ASTM E1444, the calculations according to the established parameters, the design using 3D software and the manufacture of the coil. For the magnetization system using the ASTM E1444 standard, a maximum parameter of 1285 Amperes was established for longitudinal magnetization. After the construction of the electromagnetic coil, sensitivity tests were performed on parts available in the nondestructive testing laboratory with dry and wet magnetic particles, comparing the results of the coil manufactured with respect to the commercial coil available in the nondestructive testing laboratory of the Universidad Industrial de Santander.

* Degree Work

** School of Physical-Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Advisor: Carlos Andrés Galán Pinilla, Ph.D. ; Darío Yesid Peña Ballesteros, Ph.D.

Introducción

Una de las definiciones que tiene los ensayos no destructivos (NDT, por su sigla en inglés); es un exámen, una prueba o una evaluación realizada sobre cualquier tipo de material para obtener información o la presencia de discontinuidades u otras características que puedan afectar la actitud de tal forma que no modifique sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas (Singh (2020)). Desde tiempos antiguos en la historia de la humanidad hasta el día de hoy se han utilizado los ensayos no destructivos, cómo método para verificar la utilidad de un producto. Por ejemplo, los herreros usaban las pruebas visuales y de sonido, para determinar la calidad a las hojas forjadas de las espadas (Herrera (2016)). La mayoría de los END que conocemos hoy día empezaron su aparición en los años 1930, como consecuencia de la segunda guerra mundial. En 1920 ya se tenía un conocimiento de ensayos con partículas magnéticas (MT, por su siglas en inglés) (Cáceres y Gálvez (2018)). En la clasificación de inspección superficial los métodos más usados industrialmente se encuentran el ensayo visual, ensayo con líquidos penetrantes, ensayo por corrientes inducidas y ensayos por partículas magnéticas (Cartz (1996)). Siendo el ensayo por partículas magnéticas quien destaca sobre otros por la combinación de costo y la alta sensibilidad para obtener información relacionada con la presencia de grietas superficiales y sub-superficiales de materiales ferromagnéticos. El método MT es aplicable para prevención, análisis de falla o mantenimiento de las piezas examinadas previo a entrar a servicio o estando en servicio (Lampman, Mulherin, y Shipley (2022)). El ensayo por partículas magnéticas en la actualidad es ampliamente

utilizado en la industria, esto crea la necesidad a los Ingenieros Metalúrgicos e inspectores de tener un completo dominio sobre esta técnica y de sus respectivos equipos.

Dada esta importancia, en el laboratorio de END de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander, actualmente, para el proceso de formación y para investigación cuenta con tres bobinas comerciales, las cuales son de versatilidad reducida al no permitir cambios en sus parámetros. Ante esta necesidad académica y para fines didácticos, se planteó la posibilidad de fabricación de una bobina electromagnética de bajo costo, para el uso de ensayos no destructivos por partículas magnéticas de tal forma que sea de mayor versatilidad y económica, para uso con fines académicos y de extensión para la escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Con base en lo anterior, surge la pregunta de investigación: ¿Es factible desarrollar una bobina versátil de bajo costo para el uso de ensayos no destructivos por partículas magnéticas para fines académicos y de extensión de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales?. Para tal fin, se propuso diseñar, fabricar y evaluar experimentalmente una bobina siguiendo los criterios de la norma ASTM E709 (ASTM (2021)).

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Desarrollar una bobina electromagnética de bajo costo y segura para inspección no destructiva por partículas magnéticas de uso libre de los estudiantes de la escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

1.2. Objetivos específicos

Diseño de la bobina electromagnética de bajo costo basada en los criterios de la Norma ASTM E709-21.

Fabricar la bobina electromagnética para inspección con partículas magnéticas con los parámetros de funcionamiento diseñados.

Evaluar la sensibilidad de la bobina fabricada mediante la inspección de piezas disponibles en el laboratorio de Ensayos No Destructivos.

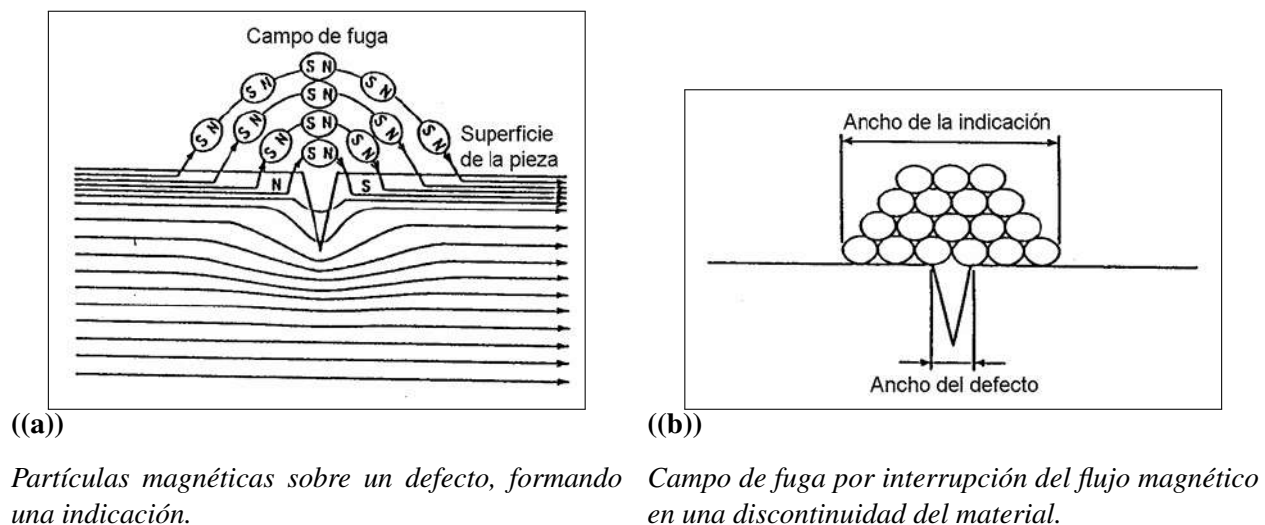
2. Marco teórico

2.1. Fundamentación teórica

La base de conocimiento y el contexto actual en que se desarrolla el ensayo por partículas magnéticas mediante el uso de bobinas electromagnéticas parten de antecedentes investigativos regidos en su mayoría por normas, criterios y códigos (ASTM (2016)), (ASTM (2021)). El ensayo por partículas magnéticas es utilizado en materiales ferromagnéticos al cuál se magnetiza el área a examinar. Si en la dirección en que viaja el flujo del campo magnético choca con una discontinuidad, se produce un escape de flujo llamado *campo de fuga*, como se logra visualizar en la Figura 1(a).

Figura 1

Comportamiento del campo magnético por una discontinuidad en el material



Partículas magnéticas sobre un defecto, formando una indicación.

Campo de fuga por interrupción del flujo magnético en una discontinuidad del material.

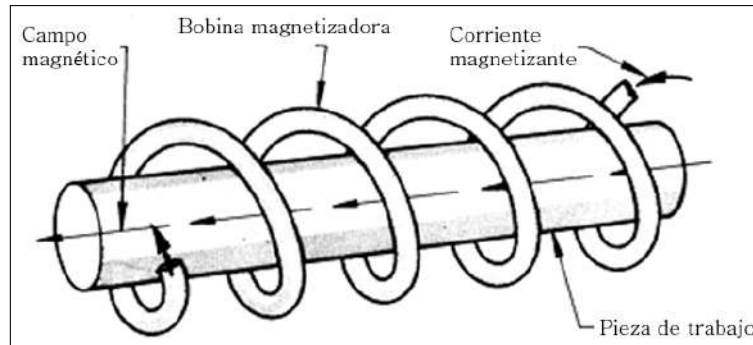
Para poder visualizar estas fugas se utiliza partículas magnetizables las cuales se aplican adecuadamente en el área a inspeccionar mientras esta se encuentra magnetizada (ASTM (2016)). De esta forma, las partículas se acumularán en las fugas ilustrando la ubicación superficial y sub-superficial de las discontinuidades del área inspeccionada, cómo se evidencia en la figura 1(b). La intensidad del campo de fuga producido determinará la cantidad de partículas magnéticas que se reunirán para formar indicaciones (Zolfaghari, Zolfaghari, y Kolahan (2018)).

Si bien existen variaciones en el método de partículas magnéticas, todas dependen del principio de que las partículas magnéticas serán retenidas en los lugares de fuga de flujo magnético. La cantidad de fuga de flujo en las discontinuidades del área inspeccionada depende principalmente de la densidad de flujo en el material y tamaño, orientación y proximidad a la superficie de una discontinuidad al igual que del tipo de corriente utilizada (ASTM (2021)). La dirección del campo magnético es de suma importancia en el ensayo de partículas magnéticas. La dirección del campo magnético en un circuito electromagnético está controlado por la dirección del flujo de corriente a través de la pieza a magnetizar. Las líneas de fuerza magnéticas siempre formarán un ángulo de 90 grados con la dirección del flujo de corriente, como se muestra en la Figura 2 (International (2001)). La forma más usada para recordar la dirección del campo magnético es usando la regla de la mano derecha. En los ensayos no destructivos por partículas magnéticas (MT), existen diversos tipos de equipos para magnetizar piezas y componentes ferromagnéticos. Todos los equipos usados en la industria requieren de una fuente energética capaz de brindar la corriente necesaria para generar el campo magnético óptimo para la inspección. Siendo esta corriente utilizada la que determina el tamaño de los cables y rectificadores (ASTM (2021)). Tanto la corriente alterna (CA) como la

corriente continua (CC) son adecuadas para magnetizar las piezas a inspeccionar por MT.

Figura 2

Barra magnetizada con dirección de campo magnético longitudinal.



Sin embargo, la dirección, fuerza y distribución de los campos magnéticos son afectados por el tipo de corriente utilizada para la magnetización (Motukisi (2012)). Los campos magnéticos producidos por corriente continua generalmente penetran la sección transversal de la pieza, permitiendo ver indicaciones de discontinuidades en la sub-superficie de la pieza, mientras que los campos magnéticos producidos por corriente alterna está únicamente confinados a la superficie de la pieza, por ende solo son aplicables para buscar discontinuidades de la superficie de la pieza a inspeccionar (Dean (1970)).

La interpretación es la etapa final de un ensayo por partículas magnéticas, pero ciertas decisiones de interpretación se toman al inicio del ensayo. La decisión más importante que se debe plantear antes de cualquier inspección; ¿la técnica de magnetización es apropiada para el objeto de prueba?. Si el objeto de prueba cumple con las características para realizar inspección por partículas magnéticas, se realiza el ensayo y posteriormente se detecta e interpreta indicaciones de partículas magnéticas. Si representan discontinuidades se determina su gravedad y efecto en servicio acorde

a las normas técnicas (O. y for Nondestructive Testing (2008)).

2.1.1. Partículas magnéticas.

El ensayo por partículas magnéticas se centra en la detección de indicaciones sobre la pieza inspeccionada que puedan determinarse como defectos acorde a las normas establecidas. La determinación de las ubicaciones de estos defectos es mediante las partículas magnéticas. Las partículas magnéticas se clasifican según el tipo de pigmentación:

1. **Visibles:** Partículas constituidas por una variedad de tamaños y formas, tienen menor sensibilidad que las partículas fluorescentes y se usan en un entorno de luz natural o luz blanca. Su aplicación se realiza normalmente por corriente alterna (AC) o corriente directa (DC) (ASNT (2008)).
2. **Fluorescentes:** Son partículas aplicadas mediante un medio líquido como el queroseno, agua o derivados del petróleo, permitiendo que sean partículas mucho más finas y de gran sensibilidad. Se encuentran en un rango de tamaño de (5-20 μm). Su aplicación se realiza normalmente por corriente directa (DC). Para la revelación de las indicaciones se hace uso de Luz negra o UV (Breit (2014)).

2.1.2. Procedimiento del ensayo por partículas magnéticas MT utilizando bobinas.

Las etapas para el correcto desarrollo del ensayo MT son: Se empieza realizando una limpieza de la pieza a inspeccionar mediante el uso de agua y jabón o limpieza según ASTM E165 (*Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry* (2023)) con el fin de eliminar imperfecciones como grasas, aceite pintura, etc. A continuación, se conecta la bobina a la fuente de

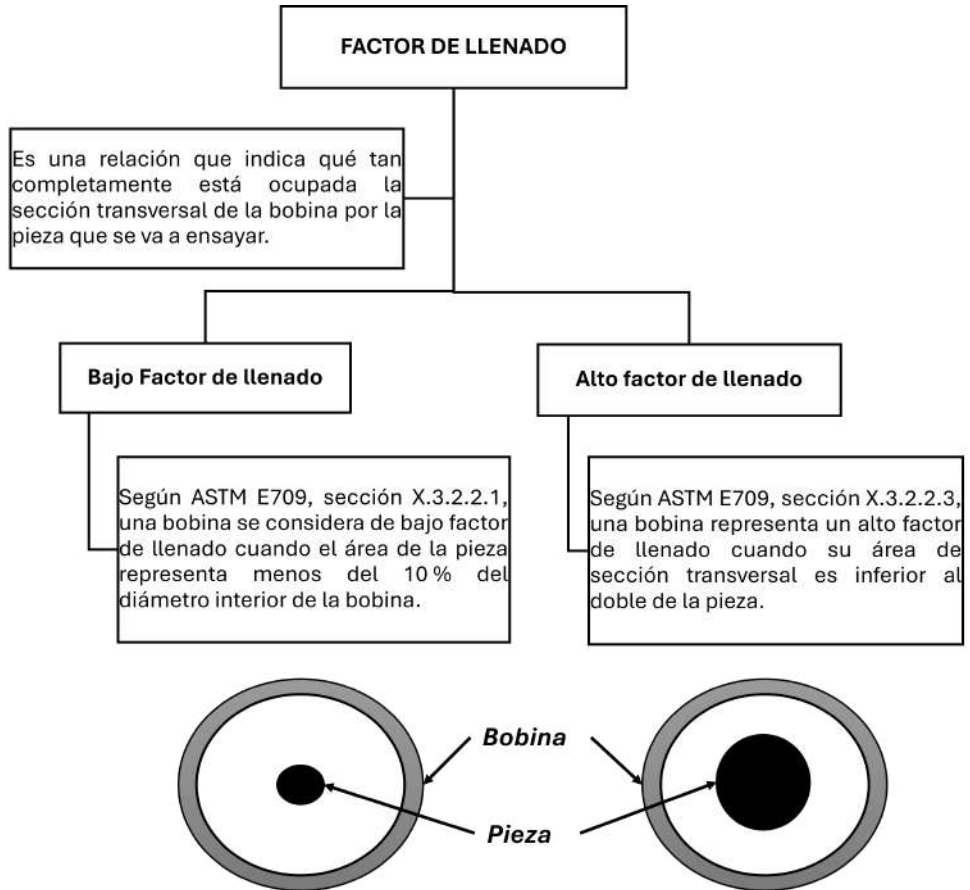
potencia, se oprime el interruptor para el paso de corriente. Para el método de magnetización continuo se procede a aplicar las partículas magnéticas sobre la pieza manteniendo encendida la bobina, removiendo el exceso de partículas aplicando aire a baja presión. Se procede a cerrar el paso de corriente, se examina y registra las indicaciones en la pieza. Por último, se desconecta la bobina de la fuente de potencia y se limpia la pieza (Standard (2023)).

2.1.3. Factor de llenado.

Se refiere a la relación entre el área de la pieza y el área interior de la bobina; el alto factor de llenado genera un campo magnético más fuerte y uniforme en la pieza, mejorando la detección de defectos. Un bajo factor de llenado ocurre cuando la pieza es pequeña en comparación con la bobina. En este caso, el campo magnético es menos eficiente y más disperso, lo que requiere mayor amperaje de la bobina para generar un campo magnético más fuerte. En la figura 3, se evidencia un esquema referente al factor de llenado en una bobina para ensayos no destructivos por partículas magnéticas.

Figura 3

Esquema sobre factor de llenado de una bobina, elaboración propia.

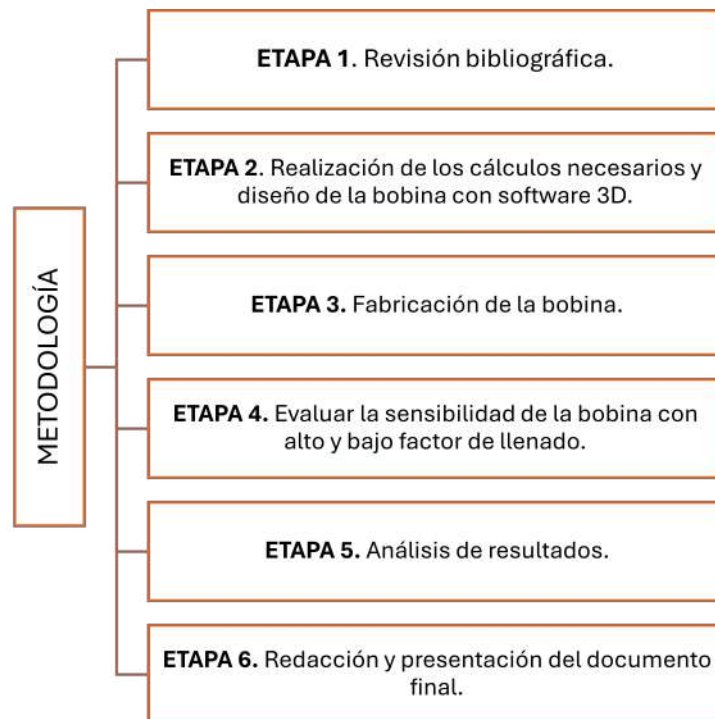


3. Metodología

El procedimiento de la realización de la bobina para uso de END por partículas magnéticas comprende seis etapas, cómo se puede ver en la Figura 4. Seguidamente se describe cada una de ellas.

Figura 4

Esquema de la metodología del proyecto



3.1. ETAPA 1. Revisión bibliográfica.

El estudio abarcó la revisión de artículos científicos, normas técnicas nacionales e internacionales, libros, páginas web de la base de datos de la Universidad industrial de Santander. Se hizo

énfasis en el funcionamiento de la bobina y en los parámetros y requisitos indicados en las normas para el diseño del funcionamiento de una bobina electromagnética de ensayos no destructivos.

3.2. ETAPA 2. Realización de los cálculos necesarios y diseño de la bobina con software 3D.

En esta etapa se realizaron todos los cálculos requeridos para el diseño posterior de la bobina electromagnética. Se determinó el amperaje $[A]$ requerido para realizar la magnetización correcta de las piezas con un bajo y alto factor de llenado teniendo en cuenta una bobina con número de espiras variable de cinco a seis y un diámetro reducible de 20 a 15 [cm]. Se establecieron los parámetros de funcionamiento de la bobina, corriente, amperaje máximo $[A]$, voltaje $[V]$, frecuencia $[f]$ de la corriente generada por el transformador y los parámetros de diseño, diámetro, número de espiras, tamaño y materiales de las partes de la bobina. Acorde a los parámetros fijados se realizó el modelado 3D de la bobina. Los cálculos se realizaron utilizando las ecuaciones recomendadas por las normas ASTM E709 (ASTM (2021)) y ASTM E1444 (ASTM (2016)), los cuales son presentados en el capítulo 5.

3.3. ETAPA 3. Fabricación de la bobina.

En esta etapa se fabricó la bobina electromagnética, y se buscó que fuera económica y que cumpliera con los parámetros establecidos. Para tal fin, se fabricó la bobina haciendo uso del transformador *magnaflux testing*. La base de la bobina se fabricó de madera con uniones mediante tornillos haciendo uso del taladro, también se usaron tornillos para apretar y asegurar el cable de la bobina el cual es de hilos de cobre, siendo el cable de un calibre 4/0 AWG. También se hace uso de una pistola con la cual se da paso a la corriente de la bobina.

3.4. ETAPA 4. Evaluar la sensibilidad de la bobina con alto y bajo factor de llenado.

Se realizaron ensayos no destructivos mediante la bobina comercial (magnaflux testing, 1000A, 100V) y la bobina fabricada a cinco piezas del laboratorio de END; una placa soldada (14,9 x 10,1 x 0,8 cm), una junta homocinética (8,15 x 2,6 cm), el medidor pay magnaflux (2,8 x 0,5 cm), un cigüeñal (20 x 13,7 cm) y una pieza tipo placa (30 x 4,9 x 1,8 cm) con entallas pasantes fabricadas mediante corte por electroerosión con hilo a diferente profundidad a la superficie de la pieza (0.5, 1.5, 2.7, 3.75 y 5 mm). Se hizo uso de partículas secas (Magnaflux CAS#07439-89-6) y partículas húmedas (14 AM Magnaflux) para los ensayos. Al ser una técnica que acumula las partículas magnéticas sobre la indicación, el dimensionamiento consiste en medir la longitud de la aglomeración. Sin embargo se tubo en cuenta la cantidad de partículas acumuladas, las cuales se compararon cualitativamente por medio de fotos, con lo cual se pudo determinar la sensibilidad de la bobina fabricada, considerando en este caso la sensibilidad como las dimensiones menor o mayor que logra medir la aglomeración de partículas magnéticas para la misma pieza de analisis.

3.5. ETAPA 5. Análisis de resultados.

Acorde a los resultados que se obtuvieron en los ensayos a las piezas del laboratorio mediante la bobina comercial y la bobina fabricada, se hicieron comparaciones entre las longitudes de las indicaciones obtenidas con los dos casos de inspección, bobina comercial y bobina fabricada. Adicionalmente, se comparo cualitativamente mediante registro fotografico la cantidad de particulas magneticas secas que se agruparon en cada discontinuidad estudiada. Esto se hizo para cinco piezas ensayadas mediante partículas magnéticas secas y cuatro piezas mediante partículas

húmedas.

3.6. ETAPA 6. Redacción y presentación del documento final.

Por último se redactaron las conclusiones del diseño, establecimiento de los parámetros, fabricación y los resultados obtenidos de la bobina fabricada. También se realiza la presentación del proyecto final a la Escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

4. Resultados

4.1. Cálculos de funcionamiento y diseño de la bobina a fabricar.

De acuerdo a la metodología anteriormente mostrada, a continuación, se muestran los resultados obtenidos.

4.1.1. Corriente de magnetización.

La corriente de magnetización se determinó mediante el uso de las ecuaciones de la tabla 1, tomadas de ASTM E709. Siendo: N: Número de vueltas en la bobina, I: Corriente de la bobina a utilizar (Amperios), L: Longitud de la pieza (pulgadas), R: Radio de la bobina (pulgadas), D: Diámetro máximo de la pieza (Pulgadas), NI: Amperios vuelta, K: constantes establecidas.

Tabla 1

Ecuaciones utilizadas para el cálculo de intensidad de corriente en función del factor de llenado y ubicación de la pieza en el interior de la bobina.

Factor de llenado	Colocadas cerca de la pared de la bobina (K:45000)	Colocadas en el centro bobina (K:43000)	Norma
<i>Bajo factor de llenado</i>	$NI = \frac{K}{\frac{L}{D}} (\pm 10\%)$	$NI = \frac{KR}{(6(\frac{L}{D}) - 5)} (\pm 10\%)$	<i>Acorde a ASTM E709-21 en la sección X.3.2.2.1</i>
<i>Alto factor de llenado (K: 35000)</i>	$NI = \frac{K}{((\frac{L}{D}) + 2)} (\pm 10\%)$		<i>Acorde a ASTM E709-21 en X3.2.2.3</i>

El diseño de la bobina a fabricar consta de la técnica de magnetización longitudinal por bobina de núcleo de aire de cinco espiras con posibilidad hasta seis espiras y un diámetro interno variable entre 20 y 15 *cm*. Acorde a las fórmulas mostradas anteriormente se determinó la corriente óptima para el diseño de la bobina, de tal forma que la intensidad del campo magnético fuera adecuada a las piezas que se inspeccionaron. En dado caso si la corriente es muy alta, se genera una sobreaglomeración de partículas en las indicaciones por el fuerte campo magnético generado, y, si es muy baja, el campo magnético será muy débil e inestable y las indicaciones no se formarán correctamente. En la tabla 2, se muestran los valores de corriente, amperaje requerido en función del número de espiras, la ubicación de la pieza dentro de la bobina y el factor de llenado obtenido usando las ecuaciones de la tabla 1.

Tabla 2

Valores de amperaje requerido por la bobina según el factor de llenado y la ubicación de la pieza.

20 cm de diámetro		Amperaje requerido [A]		
5 espiras	Bobinas de bajo factor de llenado		Bobina de alto factor de llenado	
	Relación L/D	Ubicada cerca de la pared [A]		Ubicada en el centro [A]
7	1285	915	777	
8	1125	787	700	
9	1000	690	636	
10	900	615	583	

(a) Valores de amperaje para una bobina de 5 vueltas.

6 espiras	Bobinas de bajo factor de llenado		Bobina de alto factor de llenado
	Relación L/D	Ubicada cerca de la pared [A]	
7	1071	762	648
8	937	656	583
9	833	575	530
10	750	513	486

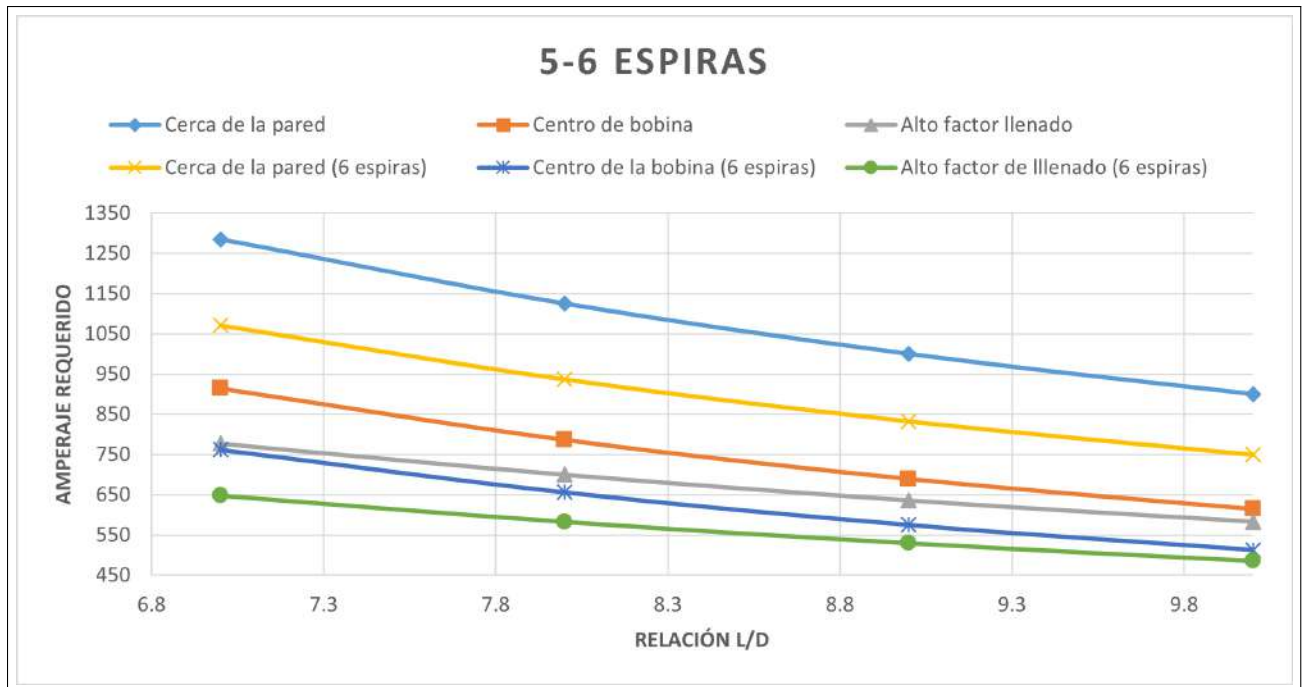
(b) Valores de amperaje para una bobina de 6 vueltas.

Acorde a los valores de la tabla 2, se tiene que la bobina debería ser diseñada para soportar 1285[A]. De acuerdo a los valores obtenidos en la tabla 2 se realizó la gráfica de la figura 5, relación L/D con respecto al amperaje requerido, donde se tienen las curvas de los valores obtenidos cerca de la pared, centro de la bobina y alto factor de llenado para cinco y seis espiras (6). Se observa que a medida que aumenta el número de vueltas y la relación L/D, se necesita menor amperaje

para magnetizar la pieza, mientras que un amperaje mayor es necesario cuando la pieza tiene un bajo factor de llenado.

Figura 5

Gráfica de valores de amperaje de la bobina con 5-6 espiras.



4.1.2. Longitud del cable

Para determinar la longitud del cable que se utilizará en la bobina que constará de un diámetro máximo de 20 [cm] y un máximo de seis espiras se utiliza la fórmula (4) y (5). Siendo: L: Longitud del cable, D: Diámetro de la bobina, N: Número de vueltas de la bobina.

$$L = \pi * D * N \quad (1)$$

$$L = \pi * 20 * 6 = 377[cm] \quad (2)$$

Realizando los cálculos respectivos, tenemos que la longitud del cable de la bobina será aproximadamente de 377 [cm], pero se debe incluir un metro de seguridad y cómo uso para las conexiones, por ende, el total sería de 477 [cm]. Este cálculo se realizó para garantizar que el cable especial que tiene el laboratorio pueda ser utilizado para este fin.

4.1.3. Parámetros de la bobina.

La norma ASTM E709-21 (ASTM (2021)), establece que para el ensayo por partículas magnéticas mediante bobina se desarrolla por corriente alterna (AC), el voltaje de alimentación y la frecuencia está dada por el transformador de corriente (magnaflux testing). Los parámetros de la bobina se encuentran reunidos en la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros de la bobina fabricada.

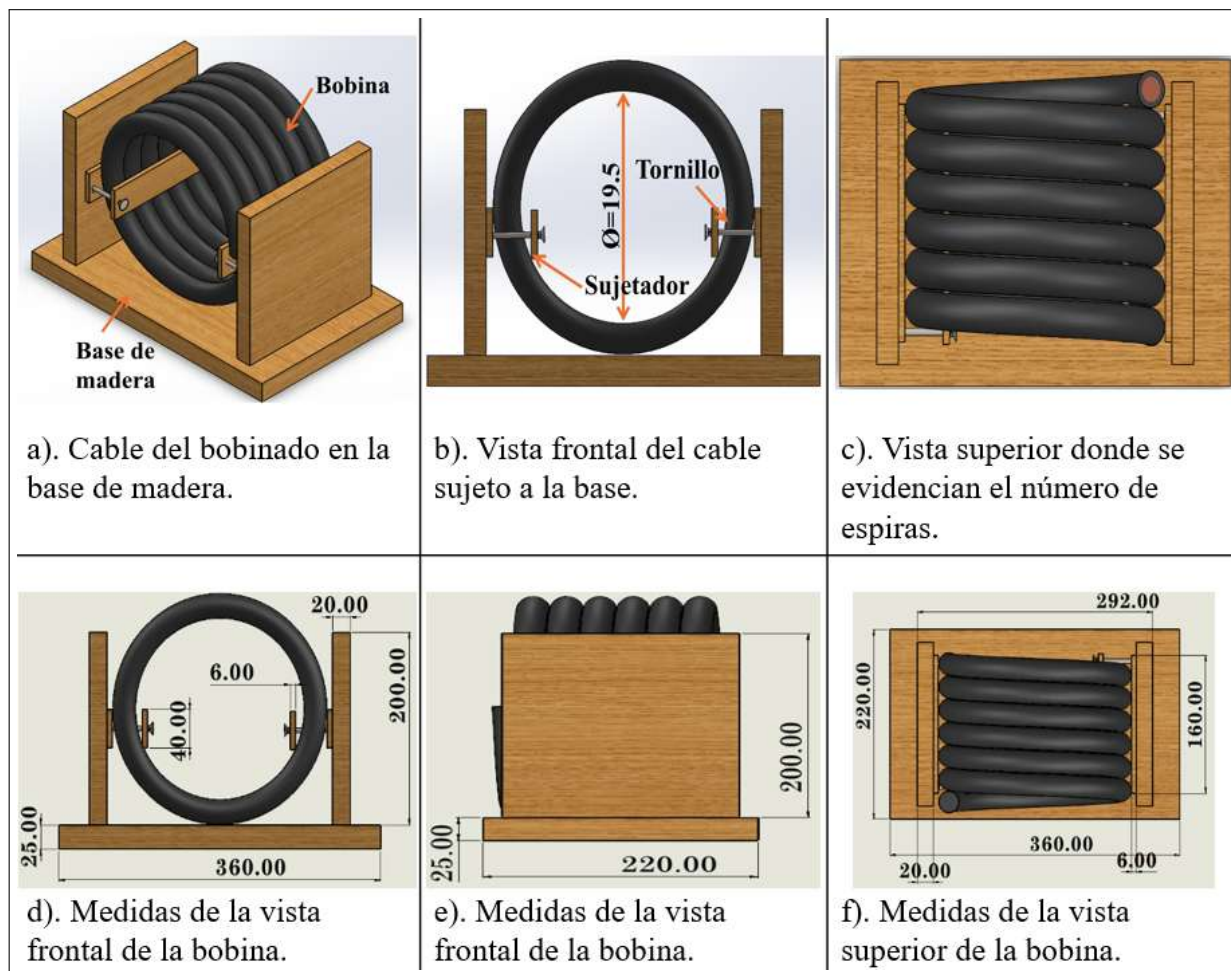
Parámetro	Valor
Corriente	AC
Amperaje máximo	1285 A
Voltaje de alimentación	115 V
Frecuencia	60 Hz
Espiras	5 - 6
Diámetro	15 - 20 cm
Transformador	Magnaflux testing (1000 A, 110 V, 60 Hz)
Sistema de encendido	Pistola de arranque
Partículas	Secas (Magnaflux CAS#07439-89-6) y húmedas (Magnaflux)
Cable	Cobre (calibre 4/0 AWG)

4.1.4. Modelación 3D de la bobina.

Mediante software 3D se realizó el diseño de la bobina, teniendo en cuenta los materiales y los parámetros establecidos anteriormente. En las figuras 6 (a), (b) y (c) se evidencian las vistas del diseño 3D de la bobina, así como en (d), (e) y (f) podemos determinar los planos.

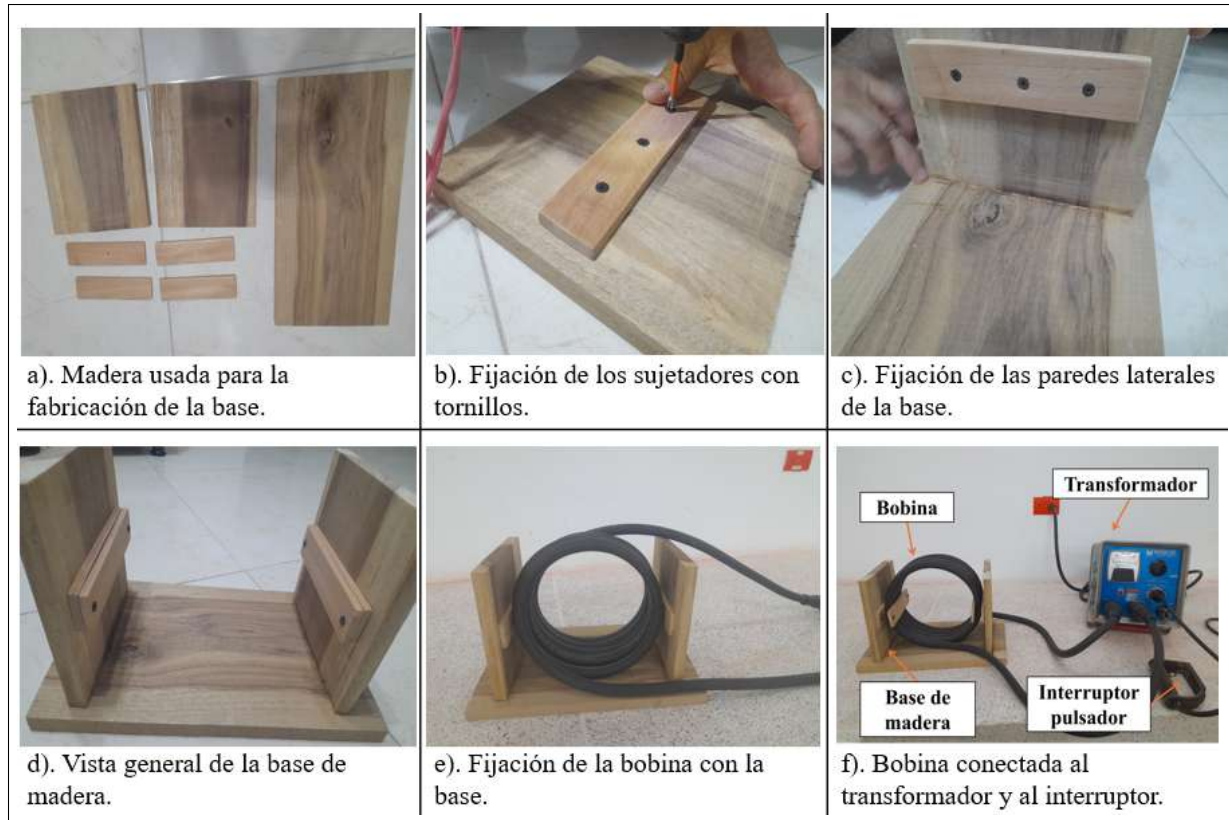
Figura 6

Modelamiento y planos de la bobina con la base de madera.



4.1.5. Fabricación de la bobina.

Se realizó la fabricación manual de la bobina, haciendo uso de los materiales establecidos, cumpliendo con las dimensiones de los planos determinados en el diseño de la bobina (para que resista el montaje del cable) y con los parámetros determinados según los cálculos realizados. Finalmente se realizó el montaje como se ve en la figura 7.

Figura 7*Fabricación de la bobina electromagnética.*

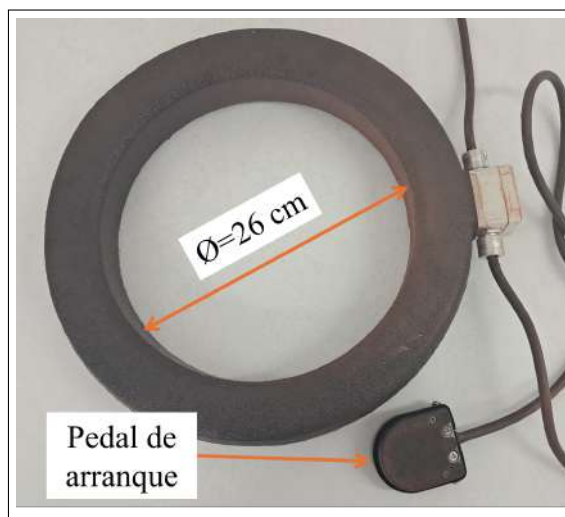
4.2. Evaluación de la sensibilidad de la bobina.

4.2.1. Ensayo partículas magnéticas secas.

Se realizaron ensayos a piezas del laboratorio de ensayos no destructivos, y se evaluó la sensibilidad de la bobina fabricada comparando los resultados con la bobina comercial que se usa en el laboratorio. En la figura 8 se presenta la bobina comercial disponible en el laboratorio de ensayos no destructivos, tiene un diámetro de 26 cm, marca Magnaflux testing type L10, generando un campo de fuerza de 3600 ampere-espira (Magnaflux (s.f.)).

Figura 8

Bobina comercial presente en el laboratorio de ensayos no destructivos (Magnaflux glenview type L-10, 110V, 60Hz).

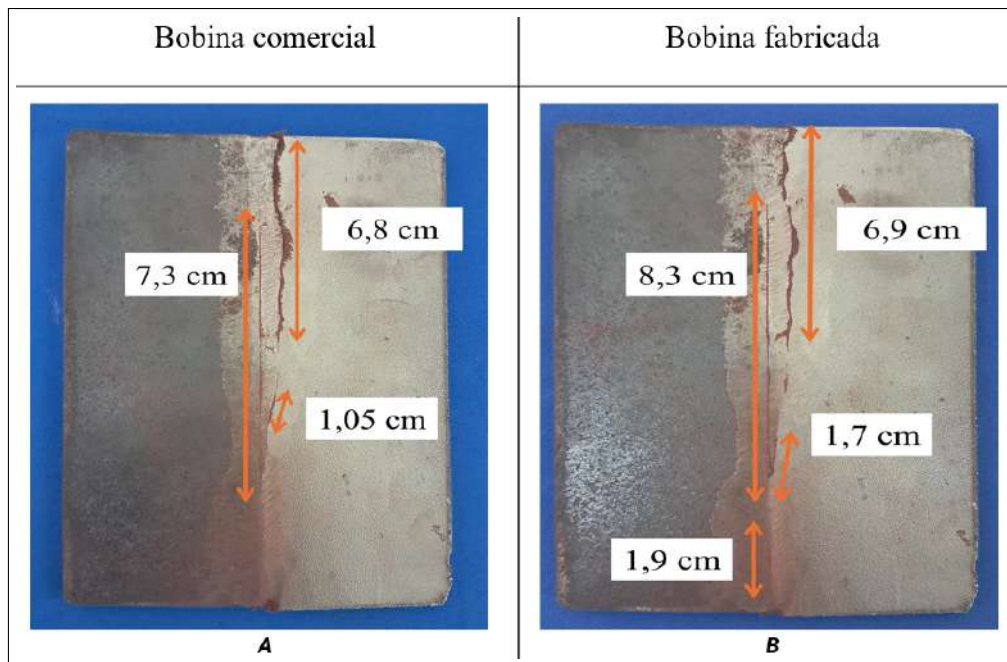


En la figura 9 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a una pieza soldada bimetalica con dimensiones (14.9x10.1x0.8) cm, la cual esta formada por un acero ASTM A36 en el lado izquierdo y acero AISI 316 en el lado derecho (Santiago (2019)), con el refuerzo de la soldadura eliminado por esmerilado, ubicando para los dos casos la pieza en el centro de la bobina. En la figura 9a, se muestran los resultados obtenidos con la bobina comercial y en la figura 9b, los obtenidos con la bobina fabricada, esquema de presentación que se repetirá para todos los casos de análisis mostrados a lo largo del documento, mostrando siempre la bobina comercial en la figura a. y la bobina fabricada en la figura b. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3750 Ampere-espira, utilizando partículas magnéticas secas. En la figura 9 se indica para los dos casos con flechas en color naranja la longitud de las indicaciones, incluyendo la longitud en centímetros, este esquema de indicación se repetirá para todos los resultados de sensibilidad

mostrados a lo largo del documento indicando la longitud con las dimensiones en centímetros o milímetros, según corresponda.

Figura 9

Resultado de sensibilidad con partículas secas a placa soldada.



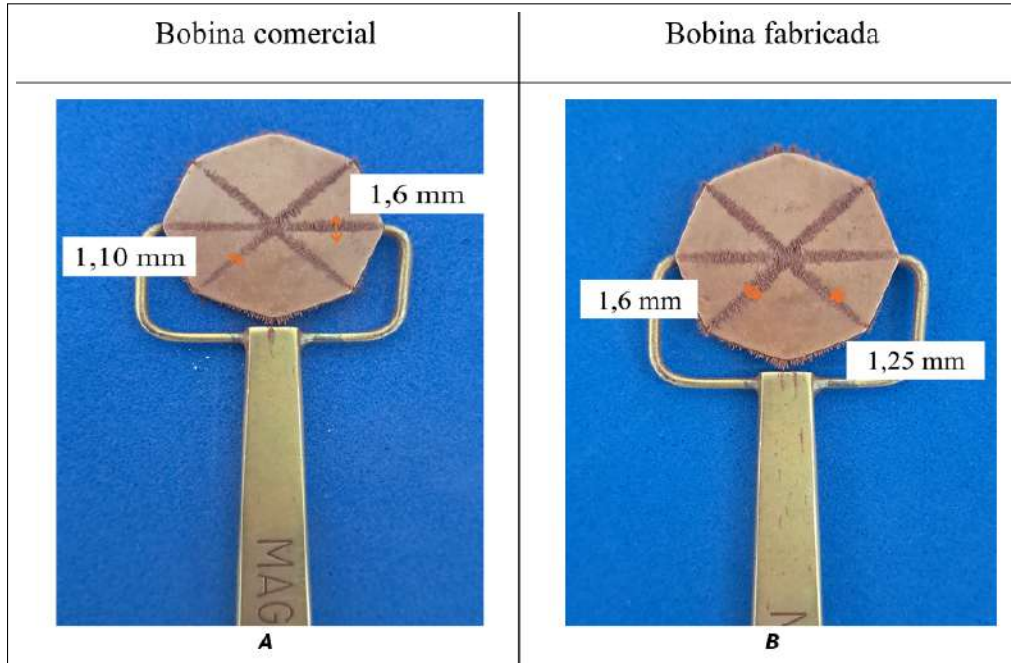
En la figura 9a y b, se evidencia que las longitudes de las indicaciones difieren, siendo mayores para todos los casos en la bobina fabricada. Por ejemplo, la indicación de longitud 7,3 cm obtenida con la bobina comercial, se detecta con una longitud de 8,3 cm en la bobina fabricada, 1 cm más grande. Se evidencia una indicación más en la bobina fabricada que en la bobina comercial, la cual hace parte de una discontinuidad asociada a cambios en la permeabilidad magnética de la junta soldada generado por la dilución del material de aporte de la soldadura y el material base no ferromagnético. La diferencias en la longitud de las indicaciones es debido a una posible mayor

sensibilidad de la bobina fabricada al aplicar un nivel de corriente exacto o estimado en particular para la pieza soldada. Aspecto que favorece la inspección respecto a la bobina comercial que aplica una corriente específica genérica de 3600 ampere-espira, mientras que la bobina fabricada aplica un nivel de corriente de 3750 ampere-espira.

En la figura 10 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a un medidor pay marca Magnaflux con dimensiones (2.8x0.5) cm, hecho de ocho segmentos ferrosos en una sola pieza, ubicando para los dos casos la pieza cerca de la pared interior de la bobina con un bajo factor de llenado. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3650 Ampere-espira, utilizando partículas secas.

Figura 10

Resultado de sensibilidad con partículas secas a medidor pay.

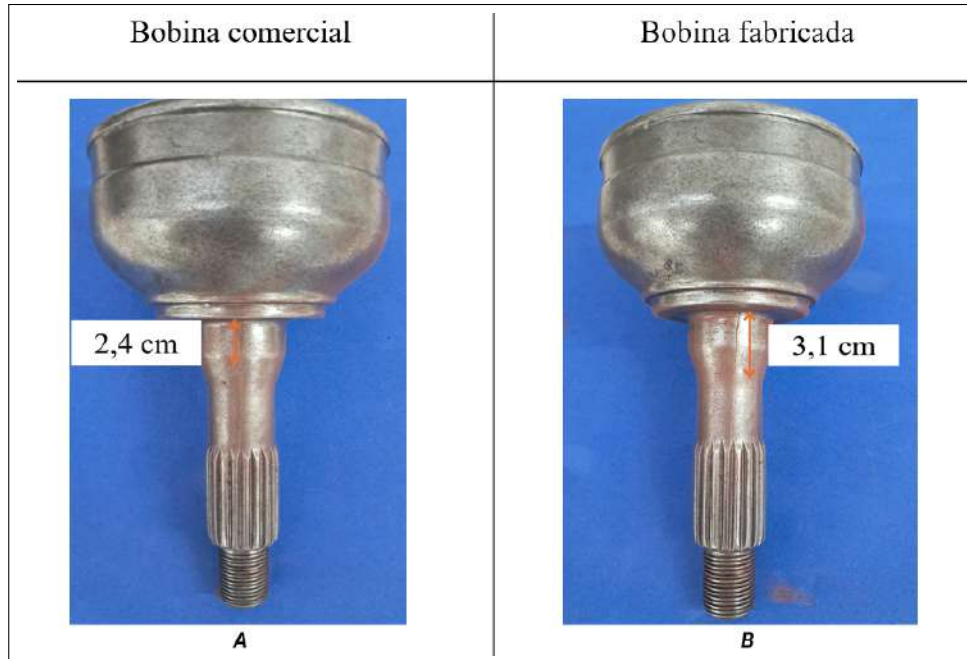


En la figura 10a y b, se evidencia el patrón de estrella de discontinuidades no ferrosas, sin embargo el espesor de las indicaciones difieren, teniendo menor espesor la detectada por la bobina comercial siendo aproximadamente 1 mm, a diferencia de la detectada por la bobina fabricada con un espesor aproximadamente de 1,5 mm, lo que indica una mayor cantidad de partículas magnéticas atraídas y retenidas por el campo de fuga. Este indicador es un dispositivo que permite comparar o definir cualitativamente la intensidad del campo magnético, aspecto que se nota con mayor evidencia en las indicaciones que están a 45°, las cuales se ven con mayor continuidad en los resultados obtenidos con la bobina fabricada.

En la figura 11 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a una junta homocinética con dimensiones (8.15x2.6) cm, ubicando en los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un bajo factor de llenado para la bobina comercial y un alto factor de llenado para la bobina fabricada, dado que para este caso se redujo el diámetro de la bobina fabricada a 16cm para aumentar el factor de llenado, utilizando seis espiras y una corriente de magnetización de 4320 Ampere-espira, haciendo uso de partículas secas. Se inspeccionó una grieta paralela al campo magnético, esto con el fin de evaluar si las pequeñas ramificaciones y morfología irregular en la propagación permitía al menos su detección, aspecto que se puede evidenciar en la figura 11.

Figura 11

Resultado de sensibilidad con partículas secas a una junta homocinética.

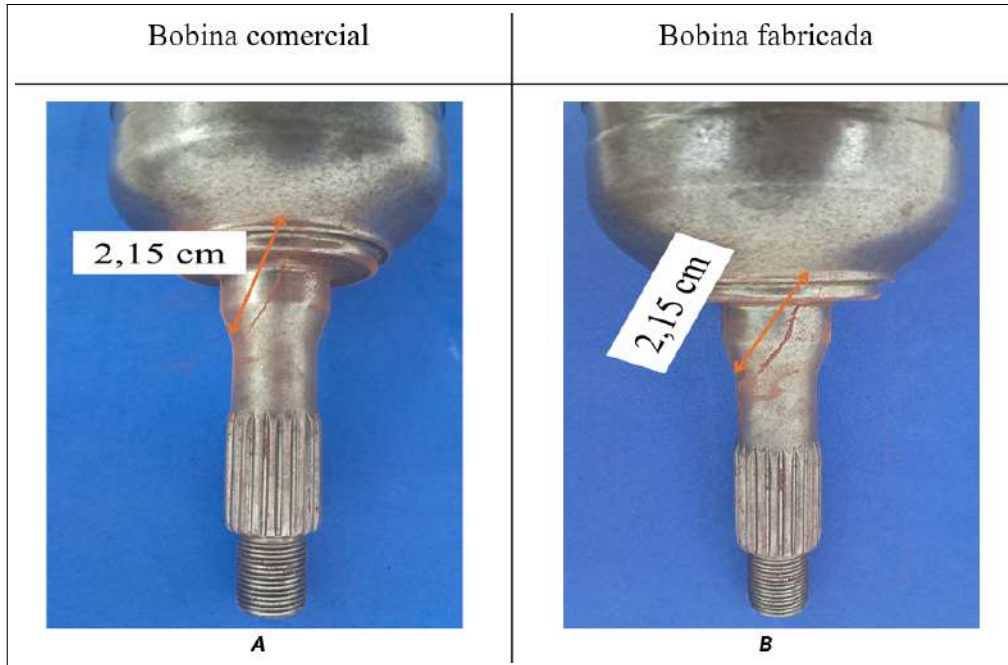


En la figura 11 a y b, se evidencia una indicación debido a una grieta, cuya orientación es predominantemente paralela al campo magnético, sin embargo, se pueden observar claramente las partes orientadas transversalmente al campo magnético. Las indicaciones difieren en el tamaño de la longitud de la indicación, siendo la bobina comercial la cual determinó mayor tamaño, 3,1 cm, por otro lado, la bobina fabricada determinó una indicación de longitud 2,4 cm.

En la figura 12 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a otra grieta presente en la misma junta homocinética de 11, ubicando en los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un bajo factor de llenado, usando cinco espiras la bobina fabricada. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3700 Ampere-espira, utilizando partículas secas.

Figura 12

Resultado de sensibilidad con partículas secas a una junta homocinética.

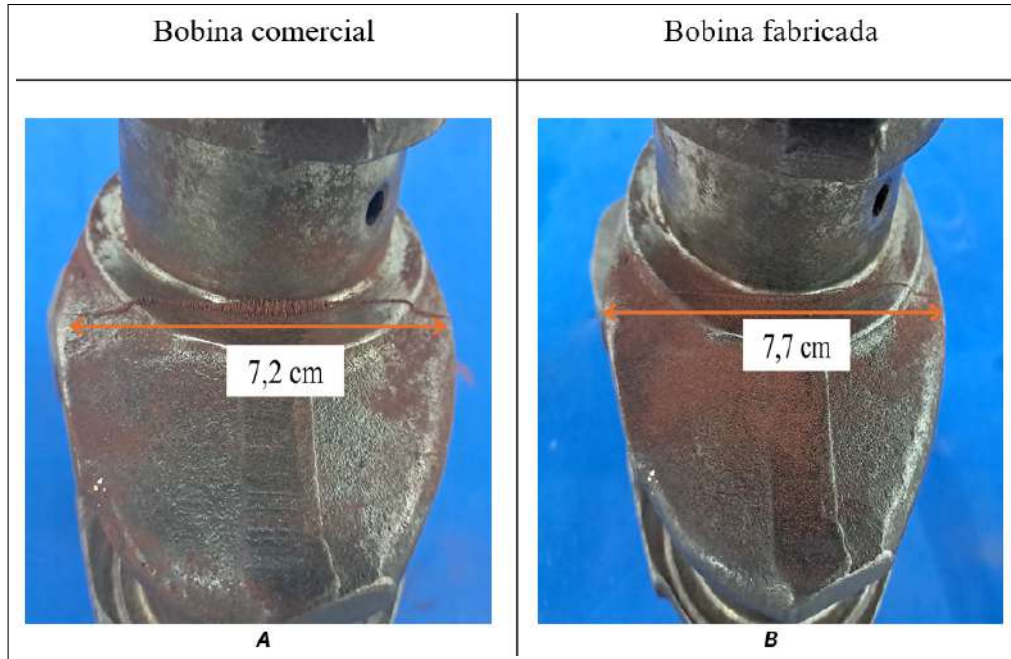


En la figura 12 a y b, se evidencia una indicación debido a una grieta presente en la pieza inspeccionada, obteniéndose el mismo tamaño de longitud de la indicación para ambas bobinas, 2,15 cm.

En la figura 13 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a un cigüeñal con dimensiones (20x13.7) cm. Ubicando en los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un alto factor de llenado. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3800 Ampere-espira, utilizando partículas secas.

Figura 13

Resultado de sensibilidad con partículas secas a un cigüeñal.



En la figura 13 a y b, se evidencia una indicación debido a una grieta que atraviesa la sección inspeccionada, sin embargo, difieren en el tamaño de la longitud de la indicación, siendo la bobina fabricada la cual determinó mayor tamaño, 7,7 cm, a su vez, la bobina comercial determinó una indicación de longitud 7,2 cm, debido a la fuerza del campo magnético generado por la bobina comercial. En la figura 13 también se evidencia una mayor agrupación de partículas en la indicación con la bobina comercial.

4.2.2. Ensayo partículas magnéticas húmedas.

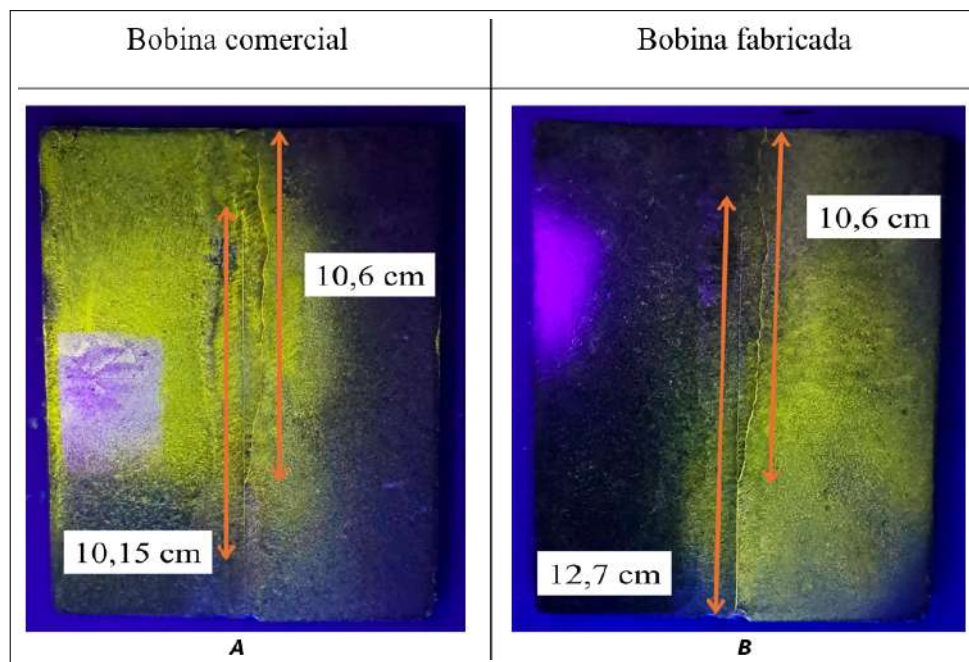
Se comparó la sensibilidad de la bobina fabricada respecto a la comercial con el método de partículas magnéticas húmedas a las mismas piezas evaluadas con partículas secas que se muestra-

ron en la sección anterior.

En la figura 14 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a la misma pieza soldada bimetálica inspeccionada en la figura 14, con un bajo factor de llenado. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3650 Ampere-espira, utilizando partículas magnéticas húmedas.

Figura 14

Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a placa soldada.



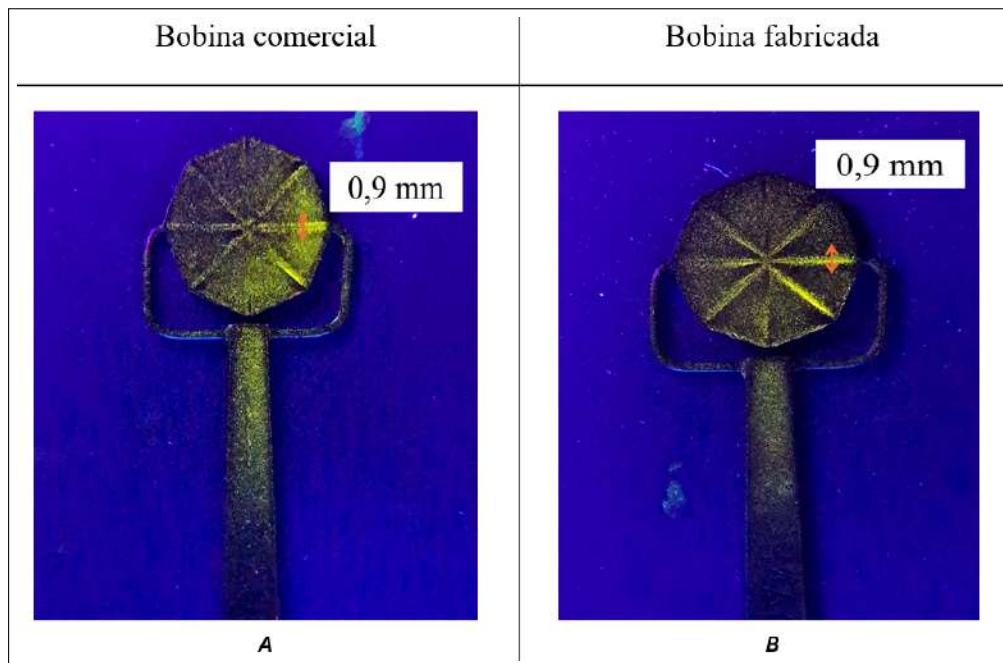
En la figura 9a y b, se evidencia que las longitudes de una indicación difieren, siendo mayor en la bobina fabricada. Dado que, la indicación de longitud 10,15 cm obtenida con la bobina comercial, se detecta con una longitud de 12,7 cm en la bobina fabricada, 2,55 cm más grande. Las diferencias en las longitudes de las indicaciones es debido a una posible mayor sensibilidad de la bobina fabricada al aplicar un nivel de corriente exacto o estimado en particular para la pieza

soldada. Aspecto que favorece la inspección respecto a la bobina comercial que aplica una corriente específica genérica de 3600 ampere-espira, mientras que la bobina fabricada aplica un nivel de corriente de 3650 ampere-espira.

En la figura 15 se presentan los resultados obtenidos de la inspección al mismo medidor pay ensayado en la figura 15, ubicando para los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un bajo factor de llenado. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3650 Ampere-espira, utilizando partículas húmedas.

Figura 15

Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a medidor pay.



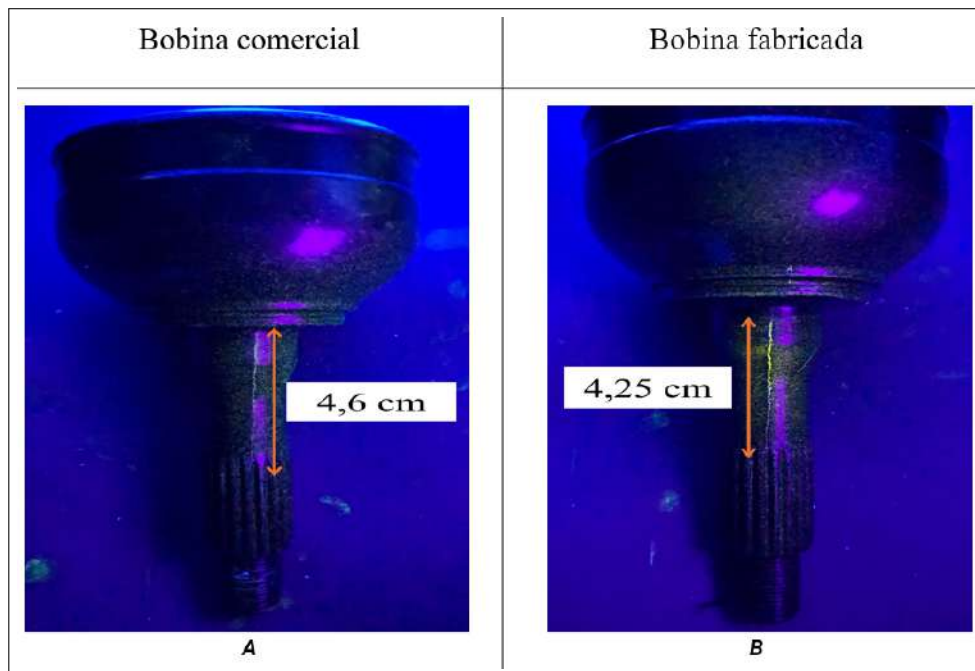
En la figura 15a y b, se evidencia el patrón de estrella de discontinuidades ferrosas, presentando el mismo espesor de las indicaciones en ambas bobinas, 0,9 mm, sin embargo, se observa

con más brillo y contraste la fabricada respecto a la comercial.

En la figura 16 se presentan los resultados obtenidos de la inspección la misma junta homocinética inspeccionada en 11. Ubicando en los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un bajo factor de llenado para la bobina comercial y un alto factor de llenado para la bobina fabricada, dado que se reduce el diámetro de la bobina a 16 cm y se usan seis espiras. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 4200 Ampere-espira, utilizando partículas húmedas.

Figura 16

Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a una junta homocinética.



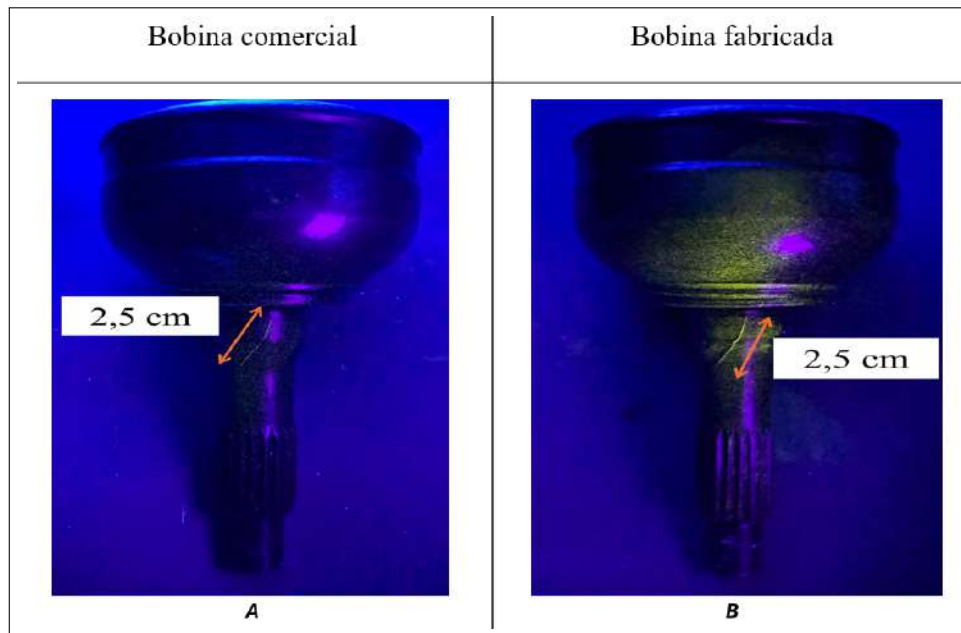
En la figura 16a y b, se evidencia una indicación debido a una grieta, cuya posición es mayormente paralela al campo magnético, sin embargo, se evidencia las partes que se encuentran transversales al campo magnético. Las indicaciones difieren en el tamaño de la longitud de la

indicación, siendo la bobina comercial la cual determinó mayor tamaño, 4,6 cm, mientras que la bobina fabricada determinó una indicación de longitud 4,25 cm. No obstante, la bobina fabricada revela una indicación con mayor contraste, lo que se debe a la mayor acumulación de partículas por efecto de un campo de fuga de mayor intensidad, aspecto favorable para la bobina fabricada.

En la figura 17 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a la misma junta homocinética inspeccionada en 12. Ubicando en los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un bajo factor de llenado. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3600 Ampere-espira, utilizando partículas húmedas.

Figura 17

Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a una junta homocinética.



En la figura 17a y b, se evidencia una indicación debido a una grieta presente en la pieza inspeccionada, obteniéndose el mismo tamaño de longitud de la indicación para ambas bobinas,

2,5 cm. Se logra evidenciar que la bobina fabricada revela una indicación con mayor contraste que la bobina comercial.

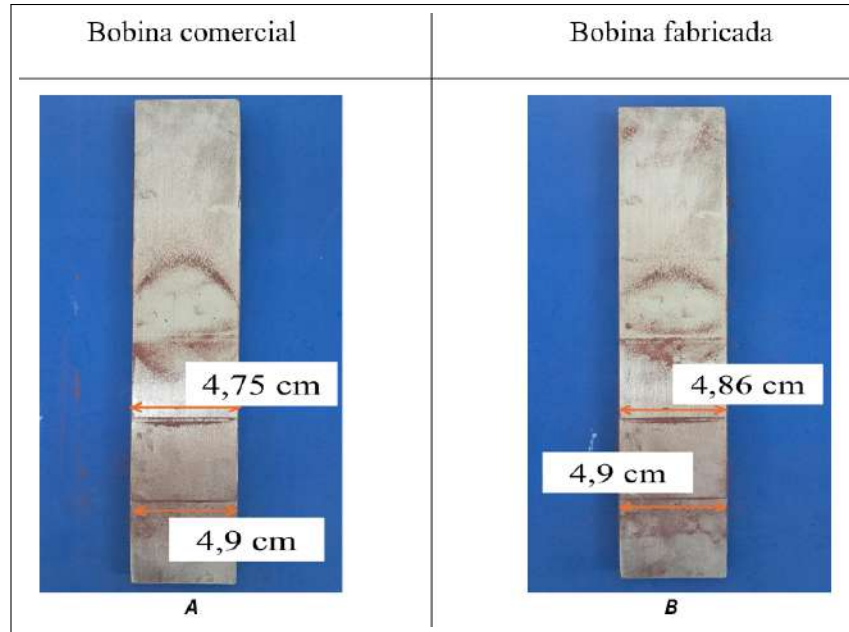
4.2.3. Ensayo de partículas magnéticas secas y húmedas sub-superficiales.

En la figura 18 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a un pieza de acero A36, con dimensiones (30x4.9x1.8) cm, con entallas fabricadas por electroerosion con hilo, EDM, a una distancia de la superficie inspeccionada de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,7 mm, 3,75 mm y 5 mm y la separación entre entallas es de 5 cm, configuración que representa una inspección de discontinuidades ideales sub-superficiales, aspecto desfavorable para la técnica dado que se esta utilizando corriente alterna, sin embargo, se logró la detección de algunas de ellas. Se ubicaron en los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un bajo factor de llenado. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3800 Ampere-espira, utilizando partículas secas.

En la figura 18a y b, se evidenciaron indicaciones debido a las entallas subsuperficiales, también, se evidencia que la longitud de la indicación generada por la entalla a 0,5 mm de la superficie es la misma para ambas bobinas, 4,9 cm, sin embargo en la indicación generada por la entalla a 1,5 mm de la superficie, difieren en longitud, la indicación de longitud 4,75 cm obtenida con la bobina comercial, se detecta con una longitud de 4,86 cm en la bobina fabricada, baja diferencia, 1,1 mm. Se alcanza a observar una leve acumulación de partículas en la tercera entalla, la cual hace parte de una discontinuidad asociada a la entalla a 2,7 mm de la superficie inspeccionada, sin embargo, no se registra dado que es difusa, y la acumulación de partículas es leve. En cambio, la entalla de 2,75 mm de la superficie inspeccionada, no se evidencia una formación aparente en la bobina comercial. Por último, ninguna de las dos bobinas pudo detectar las discontinuidades

Figura 18

Resultado de sensibilidad con partículas secas a pieza con entallas.

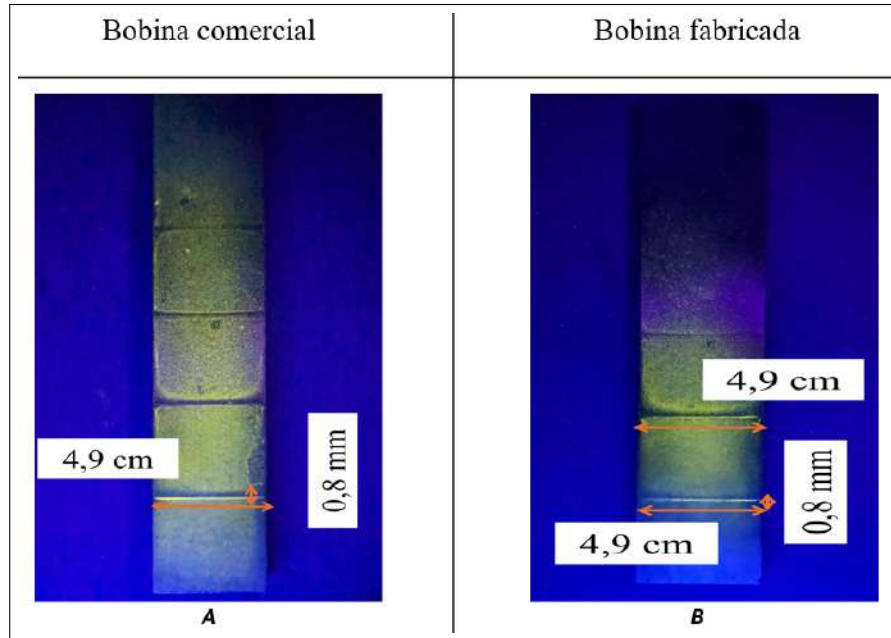


generadas por las entallas a 3,75 mm y 5 mm de la superficie. En la figura 19 se presentan los resultados obtenidos de la inspección a un pieza de acero A36 con entallas evaluadas en la figura 18. Se ubicaron en los dos casos la pieza en el centro de la bobina, con un bajo factor de llenado. La inspección realizada con la bobina fabricada se hizo con 3750 Ampere-espira, utilizando partículas húmedas.

En la figura 19a y b, se evidenciaron indicaciones debido a las entallas subsuperficiales, donde la longitud y el espesor de la indicación generada por la entalla a 0,5 mm de la superficie es la misma para ambas bobinas, 4,9 cm y 0,8 mm, respectivamente. En la figura 19 también se logra observar que la indicación generada por la entalla a 1,5 mm de la superficie, la bobina comercial no logra detectarla, a pesar de verse un cambio en el brillo de las partículas debido a su distribución

Figura 19

Resultado de sensibilidad con partículas húmedas a pieza con entallas.



heterogénea, no se logra observar que se refleje luz visible de la zona donde está la entalla. Caso contrario con la bobina fabricada, que logra detectarla con una longitud de 4,9 cm. Además, se logra evidenciar que ninguna de las dos bobinas pudo detectar las discontinuidades generadas por las entallas a 3,75 mm y 5 mm de la superficie.

4.3. Sensibilidad de la bobina.

En la tabla 4, se comparan los valores obtenidos en cada ensayo realizado a las piezas, con partículas secas y húmedas, esto en función de la pieza que se inspeccionó, el número de indicaciones y la longitud total, la cual corresponde a la suma de todas las longitudes de las indicaciones detectadas en cada caso. Se resaltan en negrilla los resultados asociados a la bobina fabricada.

Tabla 4*Resultados de inspección a las piezas de prueba.*

<i>Pieza</i>	<i>Bobina</i>	<i>Partículas</i>	<i>Espiras</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Indicaciones detectadas</i>	<i>Longitud total[cm]</i>
<i>Placa soldada</i>	comercial	secas	–	centro	3	15,15
	fabricada	secas	5	centro	4	18,8
	comercial	húmedas	–	centro	2	20,75
	fabricada	húmedas	5	centro	2	23,3
<i>Pye</i>	comercial	secas	–	pared	3	8,4
	fabricada	secas	5	pared	3	8,4
	comercial	húmedas	–	pared	3	8,4
	fabricada	húmedas	5	pared	3	8,4
<i>Junta homocinética</i>	comercial	secas	–	centro	1	2,4
	fabricada	secas	6	centro	1	3,1
	comercial	húmedas	–	centro	1	4,6
	fabricada	húmedas	6	centro	1	4,25
<i>Junta homocinética</i>	comercial	secas	–	centro	1	2,15
	fabricada	secas	5	centro	1	2,15
	comercial	húmedas	–	centro	1	2,5
	fabricada	húmedas	5	centro	1	2,5
<i>Cigüeñal</i>	comercial	secas	–	centro	1	7,2
	fabricada	secas	5	centro	1	7,7
<i>Barra con entallas</i>	comercial	secas	–	centro	2	9,65
	fabricada	secas	5	centro	2	9,76
	comercial	húmedas	–	centro	1	4,9
	fabricada	húmedas	5	centro	2	9,8

Acorde a la tabla 4, se establece que la bobina fabricada tiene mayor longitud total detectada para la mayoría de los ensayos realizados, 98,16 cm con 21 indicaciones, en comparación con la bobina comercial que fue de 86,1 cm con 19 indicaciones. La evaluación de la sensibilidad de la bobina fabricada mediante partículas magnéticas secas demostró resultados comparables e incluso superiores a los de la bobina comercial (Type L-10) en ciertos casos. Por ejemplo, en la inspección del cigüeñal y la junta homocinética, las indicaciones obtenidas con la bobina fabricada presentaron longitudes mayores, lo que indica una mayor acumulación de partículas y, por ende, una mayor sensibilidad. Sin embargo, en algunas pruebas, como la inspección del medidor Pay, las diferencias fueron mínimas, lo que confirma que la sensibilidad puede variar según la geometría y las características de la pieza inspeccionada que definen el nivel de corriente o condiciones de inspección específicas para cada caso, versatilidad que puede ser cubierta por la bobina fabricada. En los ensayos con partículas magnéticas húmedas, la bobina fabricada mostró un buen desempeño. Por ejemplo, en la placa soldada y en la junta homocinética, las indicaciones obtenidas con la bobina fabricada fueron más largas y con mayor contraste, lo que facilita la identificación de defectos. Estos resultados sugieren que la bobina fabricada, al permitir ajustes en el amperaje y el factor de llenado, puede optimizar la intensidad del campo magnético para adaptarse a diferentes tipos de piezas, mejorando así la detección de discontinuidades tanto superficiales, condición favorable para el tipo de corriente utilizado, CA, como subsuperficiales, condición desfavorable. Con los resultados obtenidos, fue posible evidenciar que la bobina fabricada presenta una sensibilidad equivalente o superior a la bobina comercial, por lo que su uso académico viable, complementando los equipos existentes en el laboratorio de ensayos no destructivos

4.4. Desarrollo de programa Python.

Con fines académicos y con el objetivo de facilitar el uso de la bobina fabricada por parte de los estudiantes en el laboratorio de ensayos no destructivos, se desarrolló un programa en lenguaje Python. Este software permite ingresar las dimensiones de la pieza a inspeccionar, específicamente su longitud y diámetro, con base en dichos datos, el programa determina automáticamente el amperaje adecuado y el número de espiras (cinco o seis) que se deben utilizar para ejecutar correctamente el ensayo por partículas magnéticas con la bobina fabricada. Este programa se puede evidenciar en el anexo A.

5. Conclusiones

Se diseñó y fabricó una bobina electromagnética versátil para el uso de ensayos no destructivos para partículas húmedas y secas de acuerdo a las normas ASTM E709 y ASTM E1444. La bobina consta de un amperaje máximo de 4560 Ampere-espira, sin embargo, para cada ensayo se usó un promedio de 3705 ampere-espira, un voltaje de alimentación de 115 [V], frecuencia de 60 [Hz], un diámetro reducible de 20 a 15 centímetros y un número de espiras reducible de seis a cinco. Se utilizó una base fabricada con madera, unida mediante tornillos y pegamento para madera para asegurar sus componentes. Además, se empleó un cable de cobre calibre 4/0 AWG, compuesto por múltiples hilos, como conductor para el bobinado.

Se realizaron pruebas de sensibilidad con la bobina fabricada usando cinco y seis espiras con res-

pecto a la bobina comercial del laboratorio de ensayos no destructivos de la Universidad Industrial de Santander. La sensibilidad de los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4, donde se evidencia que la bobina fabricada reconoció las discontinuidades de la mayoría de las piezas de prueba con igual o levemente mayor longitud que la bobina comercial debido a que la bobina fabricada permite hacer ajustes de parámetros según la pieza que se este inspeccionando, ajustando el factor de llenado o la intensidad del campo según la recomendación ASTM E709 y ASTM E1444.

También la bobina fabricada logró mejor sensibilidad a la hora de detectar discontinuidades sub-superficiales de la pieza con entallas de la figura 18, siendo una condición desfavorable dado que se realizó usando corriente alterna y se esperaba que no lograra detectar ninguna discontinuidad sub-superficial, sin embargo, la bobina fabricada logró detectar de manera más clara las entallas y generando una formación para la entalla de 2,7 mm de distancia a la superficie, que la bobina comercial no pudo detectar.

La bobina fabricada cumple con los estándares de sensibilidad y seguridad, logrando igualar o incluso superar la sensibilidad de la bobina comercial del laboratorio de ensayos no destructivos. De tal forma, la bobina es aplicable y disponible para uso de los estudiante de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales de la Universidad Industrial de Santander.

6. Recomendaciones

La bobina fabricada es muy versatil y de alta sensibilidad para la mayoría de dimensiones de piezas de prueba, sin embargo, se puede seguir modificando el diámetro, la intensidad con un

nuevo transformador, los materiales y el número de espiras a utilizar, de tal forma que la bobina sea más versátil y con una amplia variación de parámetros que la fabricada.

También se recomienda un manual físico en el cuál se informe las piezas de la bobina, el modo de uso e información de seguridad para el uso de la bobina.

Referencias

- ASNT. (2008). *Magnetic testing handbook nondestructive testing third edition* (Third ed., Vol. 8; M. G. David y M. O. Patrick, Eds.). American society for nondestructive testing, inc. Descargado de www.asnt.org
- ASTM. (2016). E1444-standard practice for magnetic particle testing. *American Society for Testing of Materials*.
- ASTM. (2021). *Astm e709 - standard guide for magnetic particle testing*.
- Breit, M. (2014, 10). Qualification, specification and standardization of uv-led-sources for fluorescent magnetic particle and penetrant inspection relevant practical basics and backgrounds marc breit managing director ril-chemie. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 19.
- Cartz, L. (1996). Nondestructive testing: radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current. *Choice Reviews Online*, 33. doi: 10.5860/choice.33-4518
- Cáceres, J. L. C., y Gálvez, G. C. S. (2018, 6). Los ensayos no destructivos (end) y su aplicación en la industria. *Campus*, 23, 59-65. Descargado de <http://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista25/articulo5.pdf> doi: 10.24265/campus.2018.v23n25.05
- Dean, D. (1970). Non-destructive testing handbooks. *Non-Destructive Testing*, 3. doi: 10.1016/0029-1021(70)90016-2
- Herrera, J. E. (2016). *Ensayos no destructivos e.n.d.*
- International, A. (2001). Nondestructive evaluation and quality control. *Technology*, 17.

Lampman, S., Mulherin, M., y Shipley, R. (2022). Nondestructive testing in failure analysis.

Journal of Failure Analysis and Prevention, 22. doi: 10.1007/s11668-021-01325-1

Magnaflux. (s.f.). *L-10 portable magnetic coil*. Descargado de [https://magnaflux.com/NA/](https://magnaflux.com/NA/EN/Products/Magnetic-Particle-Inspection/Accessories/Portable-Magnetic-Coils.htm)

[EN/Products/Magnetic-Particle-Inspection/Accessories/Portable-Magnetic-Coils.htm](https://magnaflux.com/NA/EN/Products/Magnetic-Particle-Inspection/Accessories/Portable-Magnetic-Coils.htm)

Motukisi, E. (2012, 4). Magnetic particle inspection: Characterisation of the magnetic field for various magnetization techniques. *18ª Conferencia Mundial sobre Ensayos No Destructivos*.

Descargado de www.saiw.co.za

O., D. G. P., y for Nondestructive Testing, A. S. (2008). *Nondestructive testing handbook* (Vol. 8).

Practice for liquid penetrant testing for general industry. (2023, 7). ASTM International.

Descargado de <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E165E165M-23> doi: 10.1520/E0165_E0165M-23

Santiago, V. T. (2019). *Evaluación a partir de las técnicas de ultrasonido y radiografía industrial de grietas y faltas de fusión inducidas en el proceso de soldadura de materiales disímiles* (Tesis Doctoral, Universidad Industrial de Santander). Descarga-

do de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/7fa31f14-bf30-449c-aec7-771fa7336e24/content>

Singh, R. (2020). 4 - magnetic particle testing. En R. Singh (Ed.), *Applied welding engineering (third edition)* (Third Edition ed., p. 331-338). Butterworth-

Heinemann. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128213483000240> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821348-3.00024-0>

Standard, A. (2023). *Nondestructive examination section v 2023 asme boiler and pressure vessel code an international code* (2023.^a ed.). The american Society of Mechanical Engineers.

Descargado de www.asme.org/cer

Zolfaghari, A., Zolfaghari, A., y Kolahan, F. (2018). Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 33. doi: 10.1080/10589759.2018.1428322

Apéndices

Apéndice A. Programa para uso de la bobina

Se desarrolló un programa en Python que permite ingresar los datos de longitud y diámetro de la pieza a inspeccionar. A partir de estos valores, el programa calcula el número de espiras requerido y la cantidad de ampere-espira necesaria para realizar el ensayo de partículas magnéticas secas o húmedas, utilizando la bobina fabricada para tal fin.

El uso del programa se realiza mediante este código:

Listing 6.1.

Programa en Python para calcular espiras y amperaje-espira

```
def calcular_parametros(longitud_cm, diametro_cm=None):  
  
    if diametro_cm is None:  
  
        diametro_cm = float(input("No se ingreso diametro. Ingrese  
                                un valor aproximado [cm]: "))  
  
    if diametro_cm == 0:  
  
        raise ValueError("El diametro no puede ser cero.")  
  
  
    relacion_LD = longitud_cm / diametro_cm
```

```
if relacion_LD > 2.9:
    espiras = 5
    amperaje = 45000 / (relacion_LD * 5)
else:
    espiras = 6
    amperaje = 45000 / (relacion_LD * 6)

return relacion_LD, espiras, round(amperaje, 2)

# Programa principal
if __name__ == "__main__":
    print("=====")
    print("Bienvenido al Calculador de Espiras y Amperaje")
    print("Este programa determina el numero de espiras y el
    amperaje-espira")
    print("recomendado segun la relacion Longitud / Diametro de una
    pieza.")
    print("=====\n")

    while True:
        try:
            L = float(input("Ingrese la longitud de la pieza [cm]: "))
```

```
    ))

D_input = input("Ingrese el diametro de la pieza [cm] (
                presione Enter si no lo tiene): ")

D = float(D_input) if D_input.strip() != "" else None

relacion, espiras, corriente = calcular_parametros(L, D)

print("\nResultados del calculo:")

print(f"Relacion L/D: {round(relacion, 2)}")

print(f"Numero de espiras recomendado: {espiras}")

print(f"Amperaje-espira a utilizar: {corriente} A\n")

except ValueError as e:

    print(f"Error: {e}\n")

while True:

    repetir = input("Desea realizar otro calculo? (s/n): ").
                strip().lower()

    if repetir in ["s", "si"]:

        print("\nIniciando nuevo calculo...\n")

        break
```

```
elif repetir in ["n", "no"]:  
    print("\nGracias por usar el calculador. Hasta la  
        proxima!")  
    exit()  
else:  
    print("Respuesta no valida. Por favor escriba 's' o  
        'n'.")
```

Copiar y pegar este código en la página ["https://www.online-python.com/"](https://www.online-python.com/) de esta forma podrás usar el programa.

Apéndice B. Productos de conocimiento.**Figura 20**

Certificado otorgado por la presentación de una ponencia relacionada con el desarrollo de la bobina fabricada en el marco del presente proyecto.

