

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE UN LABORATORIO DIDÁCTICO DE  
PRUEBA NO DESTRUCTIVA MEDIANTE  
CORRIENTES DE EDDY**

PRESENTADO POR:

**GERARDO VLADIMIR ZELAYANDÍA TORRES**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2021

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIA GENERAL :

**M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO :

**Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR INTERINO :

**Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**PROPUESTA DE UN LABORATORIO DIDÁCTICO DE  
PRUEBA NO DESTRUCTIVA MEDIANTE  
CORRIENTES DE EDDY**

Presentado por :

**GERARDO VLADIMIR ZELAYANDÍA TORRES**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

San Salvador, noviembre de 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## DEDICATORIA

A mi querida madre, a mi abuela y a mi demás familia, en especial a los Zelayandía Gaitán quienes siempre me han apoyado y me han impulsado a seguir adelante y nunca rendirme, y quienes me han forjado como la persona que soy actualmente.

*Gerardo Zelayandía*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre por el gran sacrificio que hizo para lograr sacarme adelante como una buena persona y un buen profesional, y así como también creer en mí hasta el final a pesar de los altos y bajos, le agradezco todo lo que ella ha hecho por mí y espero poder devolverle mucho más.

A mi abuela por siempre preocuparse por mí y siempre estar en sus oraciones, y por siempre darme para los “frescos”, le agradezco por todo el amor incondicional que me ha dado y espero ser un buen profesional en el cual se sienta orgullosa.

A mi novia Nancy Molina por ser mi confidente y siempre estar a mi lado a pesar de todo, por estar conmigo en todo este proceso que no ha sido tan fácil el llegar hasta aquí y por siempre brindarme su amor sin pedir nada a cambio y que siempre me brindo los ánimos para seguir.

A toda mi familia que de alguna manera fue parte de esto, especialmente a mi Tio Ever y a los Zelayandía Gaitán que a pesar del tiempo que demore nunca dejaron de creer en mí.

Gracias a mi gran amiga Esmeralda Mejía (La reina del sur) por ser parte de este proceso y que hasta el final siempre me demostró su apoyo y sus palabras de aliento para seguir adelante.

A todos mis compañeros de estudio Leif, Lara y Julio (EL cartel de los sapos) por ser parte de esto y siempre apoyarnos los unos a los otros para poder resolver todos los fusiles que conseguíamos jajaja. También, a todos los compañeros de la ASEIM que me brindaron su ayuda para llegar hasta aquí, y también por los “Pactos de caballeros” donde nos desestresábamos de todo lo vivido en el ciclo.

A mi tutor de tesis, Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por haberme guiado, en la elaboración de este trabajo, y también a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para culminar este trabajo de

graduación. A todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica por desarrollarme como la persona que soy ahora.

*Gerardo Zelayandia*

# **PROPUESTA DE UN LABORATORIO DIDÁCTICO DE PRUEBA NO DESTRUCTIVA MEDIANTE CORRIENTES DE EDDY**

Estudiante: Br. Gerardo Vladimir Zelayandía Torres <sup>1</sup>

Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz<sup>2</sup>

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## **RESUMEN**

Se ha recopilado información bibliográfica sobre las definiciones de los diferentes ensayos no destructivos, los conceptos básicos y campos de acción de cada uno de los métodos esenciales, se agrupan los métodos de ensayo en superficiales y volumétricos con el fin de presentar la diferenciación entre los diferentes métodos y sus aplicaciones. Luego, se presenta una propuesta de un laboratorio de ensayos no destructivos mediante corrientes de Eddy, y se listan el equipo y utensilios necesarios; además se hace la propuesta de adecuar uno de laboratorios existentes en el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de esta Escuela, para poder implementar dichas prácticas; también se fundamenta la necesidad de certificación del docente que será el encargado del uso del equipo. Posteriormente, se presentan guías de práctica de manejo y aplicación de la técnica de corrientes de Eddy. Finalmente, se concluye que el costo para la implementación del laboratorio de corrientes de Eddy está relacionado con la adquisición del equipo y la necesidad de capacitación y certificación del docente encargado de dichas prácticas de laboratorio.

Palabras claves: Eddy Current. Ensayos no destructivos

---

1 adoniszeldo@gmail.com

2 jaberriosortiz@gmail.com

# ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. Marco teórico.....	2
1.1. Historia y desarrollo.....	2
1.1.1. Descubrimiento de las corrientes de eddy.....	4
1.1.2. Antecedentes de las pruebas por corrientes de eddy.....	5
1.2. Discontinuidades: orígenes y clasificación.....	6
1.3. Ensayos o pruebas no destructivas.....	9
1.3.1. Condiciones de efectividad en pruebas no destructivas.....	11
1.3.2. Clasificación de métodos de ensayo no destructivos.....	13
1.4. Métodos de ensayos volumétricos.....	13
1.4.1. Método de ensayo por ultrasonido.....	13
1.4.2. Método de ensayo por radiografía.....	17
1.5. Métodos de ensayo superficiales.....	19
1.5.1. Método de ensayo visual.....	20
1.5.2. Método de ensayo por líquidos penetrantes.....	22
1.5.3. Método de ensayo por partículas magnéticas.....	25
1.5.4. Método de ensayo por corrientes de Eddy.....	28
1.6. Ley de inducción electromagnética.....	35
1.6.1. Ley de Lenz.....	35
1.6.2. Corrientes inducidas.....	37
1.7. Factores que afectan las corrientes parásitas.....	40
1.7.1. Consideraciones prácticas.....	40
2. INSTRUMENTACIÓN.....	46
2.1. Principios y características básicas de las sondas de corriente inducidas.....	46
2.1.1. Función de inducción y recepción.....	46
2.1.2. Medida absoluta y diferencial.....	49
2.1.3. Tipos de sondas.....	52
2.2. Distribución de las corrientes de foucault en relación con la posición de la bobina.....	54
2.2.1. Campo generado por bobina inductora sin carga.....	55
2.2.2. Trayectoria de las corrientes parásitas en una pieza según su posición con respecto a la bobina del inductor.....	56
2.2.3. Influencia de la distancia en el acoplamiento en varias formas.....	57
2.2.4. Método de enfoque.....	59
2.3. Reacción de diferentes tipos de sondas según el diseño de la bobina.....	60
2.3.1. Reacción a pequeños defectos.....	60
2.3.2. Reacción a defectos prolongados.....	61

	Pág.
2.3.3. Reacción a defectos continuos.....	61
2.4. Tecnología y características prácticas de las sondas.....	62
2.4.1. Tecnología de diseño.....	62
2.4.2. Tecnología de fabricación.....	63
2.4.3. Parámetros eléctricos.....	64
2.4.4. Mantenimiento.....	65
2.5. Función principal y ajuste del equipo.....	65
2.5.1. Oscilador.....	66
2.5.2. Dispositivo de energización.....	66
2.5.3. Sistema de medición.....	67
2.5.4. Equilibrio.....	68
2.5.5. Amplificador y filtro.....	69
2.5.6. Desmodulación.....	70
2.5.7. Pantalla.....	71
2.5.8. Rotación de fase.....	78
2.5.9. Filtro de salida.....	79
2.6. Diferentes tipos de equipos de corrientes parásitas.....	79
2.6.1. Equipo monoparámetro, monocanal y especializado.....	80
2.6.2. Equipo multiparamétrico y multicanal.....	83
2.7. Dispositivos auxiliares.....	84
2.7.1. Dispositivos auxiliares para la adquisición de señales.....	85
2.7.2. Dispositivos auxiliares para reducción de ruido.....	87
2.7.3. Equipo para almacenamiento de señales.....	88
2.7.4. Sistema de procesamiento automático de señales.....	89
3. PROPUESTA DE LABORATORIO DE PRUEBA NO DESTRUCTIVA POR CORRIENTES PARÁSITAS.....	92
3.1. Justificación.....	92
3.2. Delimitación y descripción de la población.....	93
3.3. Equipo e insumos de laboratorio.....	93
3.3.1. Equipos.....	94
3.3.2. Insumos.....	94
3.3.3. Herramientas.....	95
3.4. Naturaleza del laboratorio.....	95
3.5. Evaluación y selección del sitio del laboratorio.....	96
3.6. Diseño arquitectónico del laboratorio.....	97
3.7. Certificación, calificación y capacitación en ensayos no destructivos.....	98
3.7.1. Normativa y certificación.....	99
3.7.2. Calificación y capacitación.....	101
3.7.3. Organismos de capacitación.....	103
3.7.4. Recertificación.....	105
3.7.5. Costos de la certificación.....	105

	Pág.
3.8. Parámetros de investigación y desarrollo de las pruebas de laboratorio.....	106
3.8.1. Parámetros de investigación para ensayos no destructivos.....	107
3.9. Determinación de pruebas y ensayos básicos del laboratorio.....	107
3.9.1. Ensayos no destructivos.....	108
3.10. Propósito y alcance de las pruebas del laboratorio.....	108
3.11. Diseño de las guías de laboratorio.....	109
3.11.1. Guías de laboratorio de ensayos no destructivos.....	110
3.12. Propuesta para presentar informes de laboratorio.....	111
3.12.1. Procedimiento propuesto para presentar el informe.....	111
3.13. Normas de seguridad dentro del laboratorio.....	112
3.13.1. Normas de seguridad en caso de incendio.....	113
3.13.2. Normas de seguridad en caso de terremoto.....	113
3.14. Costo de equipos.....	114
3.15. Mantenimiento.....	114
CONCLUSIONES.....	115
BIBLIOGRAFÍA.....	116
ANEXOS.....	117
Anexo A: Prácticas propuestas para el uso del equipo.....	117
Anexo B: Cotización del equipo.....	134
Anexo C: Ficha técnica del equipo.....	136

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Resumen de los principales métodos de pruebas no destructivas.....	34
Tabla 2.1. Comparación entre sondas absolutas y diferenciales.....	52
Tabla 3.1. Costos de las certificaciones de los ensayos no destructivos, impartidos por la asociación española de ensayos no destructivos (AEND).....	105
Tabla 3. 2 Costo de los equipos.....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Ley de Faraday-Lenz.....	5
Fig. 1.2. Rechupes o cavidades de contracción y porosidades o cavidades gaseosas. (Moldeo).....	8
Fig. 1.3. Grietas de forja / Estampa (Procesos secundarios).....	8
Fig. 1.4. Grietas y poros (Soldadura).....	8
Fig. 1.5. Grietas de rectificado y grietas debido a tratamiento térmico.....	9
Fig. 1.6. Grietas por fatiga térmica y golpes en aeronaves.....	9
Fig. 1.7. Ejemplo de ensayos por impulso-eco con 0° para medición de espesor.....	16
Fig. 1.8. Tipos de escaneo.....	16
Fig. 1.9. Ejemplos de palpadores.....	16
Fig. 1.10. Ejemplos radiografías de discontinuidades en soldadura.....	19
Fig. 1.11. Ángulo mínimo para pruebas visuales típicas.....	21
Fig. 1.12. Diferentes galgas empleadas en inspección visual ..	22
Fig. 1.13. Proceso o secuencia de operaciones del ensayo de líquidos penetrantes..	24
Fig. 1.14. Discontinuidades en piezas de materiales metálicos por medio de líquidos penetrantes.....	24
Fig. 1.15. Proceso o secuencia de operaciones del ensayo de partículas magnéticas.....	28
Fig. 1.16. Discontinuidades detectadas en piezas de materiales metálicos, mediante partículas magnéticas.....	28
Fig. 1.17. Tipos de bobina.....	32
Fig. 1.18. Equipo de corrientes inducidas detector de discontinuidades con sonda tipo lápiz.....	32
Fig. 1.19. Diferentes tipos de sondas: tipo lápiz, sondas rotatorias para inspección de taladros y sondas array.....	32
Fig. 1.20. Indicación generada por grietas superficiales.....	32
Fig. 1.21. Comportamiento de la pieza en ausencia de discontinuidad. Se generan corrientes inducidas al someter la pieza a un campo magnético generado en una bobina.....	33
Fig. 1.22. Comportamiento de la pieza en presencia de discontinuidad. Las corrientes inducidas generadas sobre la pieza por el campo magnético generado por la bobina son alteradas por la presencia de una discontinuidad, como se observa en la imagen, se genera una señal distinta al pasar sobre ella.....	33
Fig. 1.23. Equipo básico de pruebas de corrientes de Foucault.....	37
Fig. 1.24. Campo generado por las corrientes parásitas.....	39

	Pág.
Fig. 2.1. Circuito de envío-recepción.....	48
Fig. 2.2. Disposición absoluta de bobina simple.....	49
Fig. 2.3. Disposición absoluta de doble bobina.....	49
Fig. 2.4. Arreglo diferencial de autocomparación de una sola bobina.....	51
Fig. 2.5. Disposición diferencial de comparación externa de bobina simple.....	51
Fig. 2.6. Arreglo diferencial de autocomparación de doble bobina.....	51
Fig. 2.7. Disposición diferencial de comparación externa de doble bobina.....	52
Fig. 2.8. Bobina interna.....	53
Fig. 2.9. Bobina circundante.....	53
Fig. 2.10. Sonda de superficie típica.....	54
Fig. 2.11. Campo magnético de una bobina.....	55
Fig. 2.12. Propiedades direccionales de una sonda de superficie.....	57
Fig. 2.13. Propiedades direccionales de una sonda de superficie para un tamaño de grieta determinado.....	57
Fig. 2.14. Efecto de la longitud de defecto.....	60
Fig. 2.15. Efecto del diámetro de la sonda.....	61
Fig. 2.16. Diagrama de bloques del instrumento de corrientes parásitas.....	66
Fig. 2.17. Circuito de puente común.....	68
Fig. 2.18. Arreglo de prueba común.....	69
Fig. 2.19. Efecto de la frecuencia en la curva no normalizada.....	74
Fig. 2.20. Efecto de la frecuencia en la curva normalizada.....	74
Fig. 2.21. Efecto de la conductividad en la curva normalizada.....	75
Fig. 2.22. Efecto del despegue y de la manipulación de la sonda en la curva normalizada.....	76
Fig. 2.23. Efecto de la geometría en la curva normalizada.....	77
Fig. 2.24. Efecto de la permeabilidad en la curva normalizada.....	78
Fig. 2.25. Efecto de la discontinuidad en la curva normalizada. Nota: la señal de despegue es horizontal, tal como en una inspección típica.....	78
Fig. 2. 26. Circuito simplificado de un detector de grietas.....	81

## SÍMBOLOS Y SIGLAS

ASTM: Sociedad Americana de ensayos y materiales (ASTM, por sus siglas en ingles)

END: Ensayos no destructivos

$E_{ind}$ : Voltaje inducido

$f$ : Frecuencia

$I$ : Corriente

$L$ : Inductancia

$t$ : Tiempo

$R$ : Resistencia

$X_L$ : Reactividad inductiva

$Z$ : Impedancia

$\Delta I$ : Cambio de corriente

$\theta$ : Ángulo de fase

$\mu$ : Permeabilidad

$\sigma$ : Conductividad

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación se centra en la propuesta de un laboratorio en la Escuela de Ingeniería Mecánica de esta Universidad, para el apoyo didáctico de los estudiantes y docentes en ensayos no destructivos mediante corrientes de Eddy. Este laboratorio pretende ser dotado de todas las herramientas necesarias para el desarrollo y la comprensión de los temas pertinentes a las áreas a las que está enfocado y a su vez, brindar servicios agregados de investigación, capacitación, consultorías e innovación, que represente un valor agregado con respecto a los laboratorios con los que ya se disponen el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

La práctica de ensayos no destructivos en el sector industrial y tecnológico actual es crucial, ya que estos procedimientos determinan muchos de los protocolos de seguridad y fiabilidad de los productos en variedad de sectores industriales, tales como la construcción, petroquímica, industria automotriz, aeronáutica, plantas generadoras o de manufacturas, las cuales terminan por tener una repercusión directa en la actividad cotidiana de todos los ciudadanos.

Las prácticas de Laboratorio constituyen el soporte a los conceptos teóricos que el estudiante de Ingeniería Mecánica aprende en las materias de procesos de fabricación o de técnicas eléctricas o en aquellas asignaturas en las cuales se hace necesaria la intervención de experiencias básicas para la captación de los temas concernientes a los ensayos.

De esta manera, la implementación de un Laboratorio de ensayos no destructivos constituye precisamente el complemento para la formación de los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, pues es allí donde se ejecutan las experiencias básicas que dan origen al entendimiento mismo de las áreas que se desarrollan a lo largo de la carrera y se logran establecer los parámetros de desarrollo de los investigadores en su proceso inicial en su carrera profesional.

## **1. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se presenta la historia y el desarrollo que han tenido las pruebas no destructivas, en particular las corrientes parásitas y los campos inducidos con el fin de sentar la base para la investigación planteada en este trabajo de graduación.

Se define el concepto de ensayos no destructivos. En el mismo, se da un concepto básico de cada uno de los métodos o técnicas esenciales que se presentan en la práctica de dichos ensayos, así como también algunas de sus ventajas y limitaciones que cada uno tiene.

### **1.1. HISTORIA Y DESARROLLO**

Es imposible identificar una fecha específica que indique exactamente cuándo comenzaron las pruebas no destructivas, tal como se conocen actualmente.

En la antigüedad, el anillo audible de una espada de Damasco sería una indicación de cuán fuerte sería el metal en combate. Los herreros utilizaron esta misma técnica sonora durante décadas mientras escuchaban el anillo de diferentes metales que se estaban formando.

Se dice que la harina y el aceite eran usados por los romanos para encontrar grietas en las losas de mármol. Durante siglos, los herreros usaron pruebas no destructivas del tipo auditivo al escuchar el ruido producido por diferentes metales mientras eran golpeados para darles forma.

Las pruebas visuales, aunque no se consideraban oficialmente como parte de la tecnología de pruebas no destructivas temprana, habían estado en uso durante muchos años para una amplia gama de aplicaciones. La detección de calor se usó para monitorear los cambios térmicos en los materiales, y las

pruebas sonoras se realizaron mucho antes de que se usara el término prueba no destructiva.

Uno de los primeros registros del uso de las pruebas no destructivas fue en 1868, cuando el inglés S.H. Saxby utilizó las propiedades magnéticas de una brújula para encontrar grietas en el cañón de las armas [1].

En el año de 1941 se fundó la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNT, por sus siglas en inglés), la cual es la sociedad técnica más grande en el mundo de pruebas no destructivas. Es también creadora de estándares y servicios para la Calificación y Certificación de personal que realiza ensayos no destructivos, bajo el esquema americano [1].

Algunos de los eventos clave en la cronología de las pruebas no destructivas y las personas que fueron los principales responsables de estos desarrollos, se tienen [1]:

- ✓ 1868 primer intento de trabajar con los campos magnéticos,
- ✓ 1879 David Hughes estableció un campo de prueba,
- ✓ 1879 David Hughes estudió las Corrientes Eddy,
- ✓ 1895 Wilhelm Röntgen estudió el tubo de rayos catódicos,
- ✓ 1895 Wilhelm Röntgen descubrió los Rayos X,
- ✓ 1896 Henri Becquerel descubrió los Rayos gamma,
- ✓ 1900 inició de los líquidos penetrantes en FFCC,
- ✓ 1911 ASTM estableció el comité de la técnica de MT,
- ✓ 1928 uso industrial de los campos magnéticos,
- ✓ 1930 Theodore Zuschlag patentó las Corrientes Eddy,
- ✓ 1931 primer sistema industrial de Corrientes Eddy instalado,
- ✓ 1941 desarrollaron los líquidos fluorescentes,
- ✓ 1945 Dr. Floy Firestone trabajó con Ultrasonido, y
- ✓ 1947 Dr. Elmer Sperry aplicó el UT en la industria.

Ciertamente, hubo muchos otros individuos que han hecho contribuciones significativas al crecimiento de END, aunque es imposible nombrarlos a todos.

Desde finales de la década de 1950 hasta la actualidad, las pruebas no destructivas han visto un desarrollo, innovación y crecimiento sin precedentes a

través de nuevos instrumentos y materiales. La capacidad de interconectar gran parte de los últimos equipos con computadoras ha tenido un impacto dramático en esta tecnología. La capacidad de almacenar grandes cantidades de datos con capacidad de archivo casi instantánea ha llevado a las pruebas no destructivas a un nivel que sólo una vez se imaginó, aunque la tecnología de pruebas no destructivas aún está en desarrollo [1].

Esta cronología continuará creciendo a medida que se presenten nuevos desafíos a través de la expansión tecnológica y desarrollos de materiales únicos. La búsqueda para detectar e identificar pequeñas discontinuidades no terminará hasta que las fallas catastróficas ya no puedan estar relacionadas con la existencia de fallas de materiales.

### **1.1.1. DESCUBRIMIENTO DE LAS CORRIENTES DE EDDY**

Las corrientes de Eddy (también llamadas corrientes de Foucault) son bucles de corriente eléctrica inducida dentro de los conductores por un campo magnético cambiante en el conductor de acuerdo con la ley de inducción de Faraday [1].

La primera persona en observar corrientes de Foucault fue François Arago (1786 - 1853), el veinticincoavo primer ministro de Francia, que también era matemático, físico y astrónomo. En 1,824 observó lo que se ha llamado magnetismo rotatorio, y que la mayoría de los cuerpos conductores se podrían magnetizar; estos descubrimientos fueron completados y explicados por Michael Faraday (1791 – 1867) [1].

En 1834, Heinrich Lenz declaró la Ley de Lenz (ver, Fig. 1.1), que dice que la dirección del flujo de corriente inducida en un objeto será tal que su campo magnético se opondrá al cambio de flujo magnético que causó el flujo de corriente. Las corrientes de Foucault producen un campo secundario que cancela

una parte del campo externo y hace que parte del flujo externo evite el conductor [2].

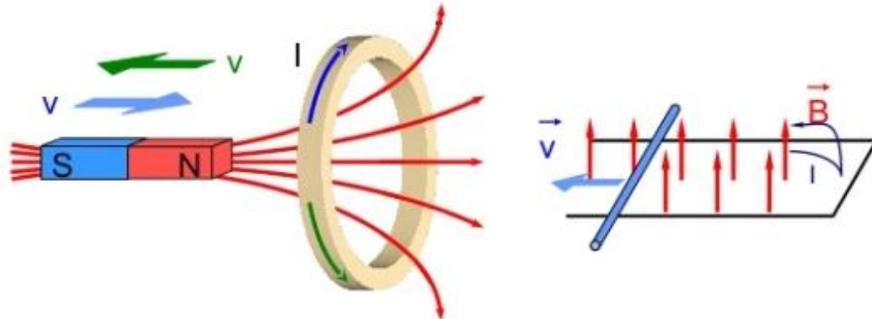


Fig. 1.1. Ley de Faraday-Lenz.

Al físico francés Léon Foucault (1819 – 1868) se le atribuye haber descubierto las corrientes de Foucault. En septiembre de 1,855, descubrió que la fuerza requerida para la rotación de un disco de cobre aumenta cuando se hace girar con su borde entre los polos de un imán, al mismo tiempo que el disco se calienta por la corriente de Foucault inducida en el metal. El primer uso de la corriente de Foucault para pruebas no destructivas ocurrió en 1879 cuando David E. Hughes utilizó estos principios para realizar pruebas de clasificación metalúrgica [2].

### 1.1.2. ANTECEDENTES DE LAS PRUEBAS POR CORRIENTES DE EDDY

Las pruebas por corriente de Eddy, es uno de los métodos de prueba no destructiva más antiguos. Sin embargo, no fue hasta las últimas décadas del siglo XX que el método de corrientes de Eddy comenzó a alcanzar su verdadero potencial en el mercado. Una razón para esto es que los instrumentos de corrientes parásitas fáciles de usar y de uso general son un fenómeno relativamente reciente [2].

Mientras que los instrumentos ultrasónicos portátiles que ofrecen una versatilidad considerable han estado disponibles desde la década de 1960, los

instrumentos portátiles de corrientes parásitas comparables solo estuvieron disponibles en la década de 1,980. Además, es sólo recientemente que la teoría de la corriente parásita llegó a ser ampliamente entendida por los profesionales de pruebas no destructivas. A principios de la década de 1,980, en particular, se produjo un excelente material explicativo que hizo que la teoría de la corriente parásita fuera comprensible para personas sin antecedentes técnicos avanzados.

## **1.2. DISCONTINUIDADES: ORÍGENES Y CLASIFICACIÓN**

Los materiales estructurales están compuestos de átomos y moléculas que idealmente tienen una continuidad del material que se extiende hacia la escala microscópica. Se desea la uniformidad del material y las propiedades del material para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. Los ingenieros de diseño asumen cierto nivel de continuidad estructural, homogeneidad y definición de las propiedades del material. Sin embargo, la homogeneidad absoluta y la continuidad nunca existen en ningún componente de ingeniería [3].

Las desviaciones espacialmente agudas de la homogeneidad y continuidad del material dentro de un componente en cualquier nivel de aumento se denominan discontinuidades. Los materiales de ingeniería siempre poseen algunas discontinuidades, aunque pueden ser muy pequeños y pueden o no ser aceptables. Los ejemplos de estas discontinuidades incluyen huecos, inclusiones, vueltas, pliegues, grietas, segregación química y cambios locales en la microestructura [3].

Las transiciones bruscas en la homogeneidad, continuidad y contorno de la superficie también se consideran “discontinuidades” en las superficies de los componentes. Las discontinuidades de la superficie geométrica incluyen ángulos agudos, muescas, gubias, rasguños, desgarros, desgastes, picaduras y rebajes de soldadura. Las discontinuidades en las estructuras de ingeniería son inaceptables cuando degradan el rendimiento o la durabilidad de la estructura por

debajo de las expectativas de diseño y cuando desafían la operatividad, la confiabilidad y la vida útil de un componente. El objetivo principal del examen no destructivo para las discontinuidades en los materiales de ingeniería es determinar si la continuidad y la homogeneidad de un componente son adecuadas para su uso [3].

Las discontinuidades identificadas se evalúan como condiciones rechazables o no rechazables en una parte. Una evaluación generalmente se hace en referencia a una base de diseño y puede incluir un código o criterios basados en reglas para la aceptación y el rechazo. La evaluación de una discontinuidad generalmente requiere una medición adecuada de su tamaño y ubicación e identificación de su carácter. Las discontinuidades se evalúan por completo determinando su ubicación, número, forma, tamaño, orientación y tipo [3].

El origen y los tipos de discontinuidades dependen principalmente de los procesos de fabricación y los historiales de servicio de los componentes de ingeniería. En algunos casos, el entorno operativo puede inducir el crecimiento y el desarrollo de discontinuidades preexistentes. Las discontinuidades en las estructuras se pueden originar en cualquier etapa de fabricación y se pueden introducir durante el uso, el mantenimiento y la reparación de los componentes [3].

Las discontinuidades se pueden clasificar según la etapa del procesamiento en la que se introducen. Una "discontinuidad inherente" es aquella que se genera en la producción original de un material de aleación. Las discontinuidades que ocurren en las primeras etapas de formación de una aleación primaria se denominan "discontinuidades de procesamiento primario", y cualquier discontinuidad que ocurra en etapas posteriores de conformado y acabado se denomina "discontinuidades de procesamiento secundario". Las discontinuidades que se crean durante el uso de un componente se denominan "discontinuidades de servicio" [3].

Las discontinuidades también se pueden clasificar en términos del proceso de formación que las causó. Por ejemplo, cualquier discontinuidad causada por

la fundición se puede llamar "discontinuidades de fundición", a las discontinuidades generadas por rechupes o cavidades de contracción se denominan "Discontinuidades de moldeo" (ver, Fig. 1.2), y las discontinuidades generadas en la forja obviamente serían "discontinuidades de forja" (ver, Fig. 1.3), las discontinuidades generadas durante la soldadura se denominan "discontinuidades de soldadura" (ver, Fig. 1.4), las discontinuidades generadas por tratamiento térmico se denominan "discontinuidades de tratamiento térmico" (ver, Fig. 1.5) [3].

En la Fig. 1.6 también se pueden observar discontinuidades por fatiga.



Fig. 1.2. Rechupes o cavidades de contracción y porosidades o cavidades gaseosas. (Moldeo).

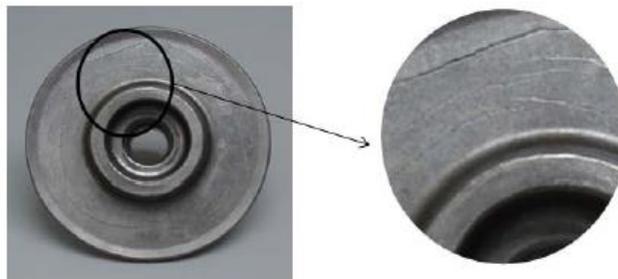


Fig. 1.3. Grietas de forja / Estampa (Procesos secundarios).



Fig. 1.4. Grietas y poros (Soldadura).

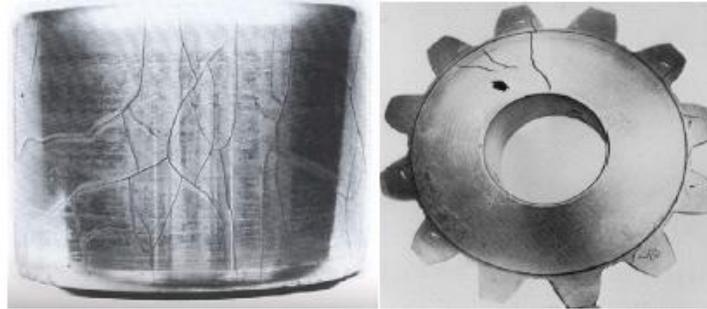


Fig. 1.5. Grietas de rectificado y grietas debido a tratamiento térmico.

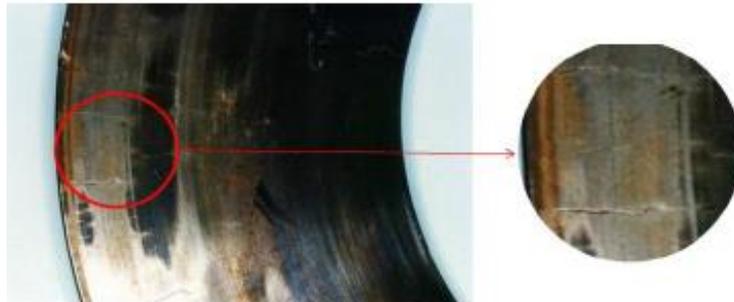


Fig. 1.6. Grietas por fatiga térmica y golpes en aeronaves.

### 1.3. ENSAYOS O PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

Una prueba no destructiva es el examen, prueba o evaluación realizada de un objeto sin cambiar o alterar ese objeto de ninguna manera, para determinar la ausencia o presencia de condiciones o discontinuidades que pueden tener efecto sobre la utilidad o capacidad de servicio de ese objeto, en cualquier forma que no impida su utilidad futura. Aunque en la mayoría de los casos, las pruebas no destructivas no dan una medición directa de las propiedades mecánicas, son muy valiosas para localizar defectos en los materiales que podría afectar el funcionamiento de una pieza de una máquina cuando entra en servicio.

Las pruebas no destructivas también se pueden realizar para medir otras características del objeto de prueba, como son el tamaño, dimensión,

configuración o estructura, el contenido de aleación, dureza, tamaño de grano, etc.

Las pruebas no destructivas también se utilizan para hacer productos más confiables, seguros y económicos. Aumentar la confiabilidad mejora la imagen pública del fabricante, que conduce a mayores ventas y ganancias. Además de lo anterior, los fabricantes recurren a estas pruebas para mejorar y controlar los procesos de fabricación [5].

El examen no destructivo, la inspección no destructiva y la evaluación no destructiva, también son expresiones comúnmente utilizadas para describir esta tecnología. Aunque esta tecnología se ha utilizado de manera efectiva durante décadas, la persona promedio en general la desconoce.

Las pruebas no destructivas se han convertido en una parte integral, en general, de todos los procesos en la industria, donde la falla del producto puede provocar accidentes o lesiones corporales. Depende de una u otra forma en prácticamente todas las principales industrias que existen actualmente [5].

En la industria, las pruebas no destructivas, aunque se pueden utilizar para muchas aplicaciones, estas por lo general se usan efectivamente para:

- ✓ Examen de materias primas antes del procesamiento;
- ✓ Evaluación de materiales durante el procesamiento como medio de control del proceso;
- ✓ Examen de productos terminados; y
- ✓ Evaluación de productos y estructuras una vez que se hayan puesto en servicio.

Existen cinco elementos básicos en cualquier prueba no destructiva, estos son:

- ✓ Fuente: Una fuente que proporciona un medio de sondeo, es decir, algo que se puede usar con el fin de obtener información del artículo bajo prueba;
- ✓ Modificación: Este medio de sondeo debe cambiar o ser modificado como resultado de las variaciones o discontinuidades dentro del objeto sometido a prueba;

- ✓ Detección: Un detector que puede determinar los cambios en el medio de sondeo.
- ✓ Indicación: Una forma de indicar o registrar las señales del detector
- ✓ Interpretación: Un método de interpretar estas indicaciones.

En resumen, las pruebas no destructivas son una tecnología valiosa que puede proporcionar información útil sobre la condición del objeto que se examina una vez que se consideran todos los elementos esenciales de la prueba, se siguen los procedimientos aprobados y los exámenes son realizados por personal calificado [5].

### **1.3.1. CONDICIONES DE EFECTIVIDAD EN PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS**

Existen muchas variables asociadas con las pruebas no destructivas que se deben controlar y optimizar. Los factores importantes que se deben considerar para que una prueba no destructiva sea efectiva, son los siguientes.

- 1) El producto debe ser "comprobable": Existen limitaciones inherentes a cada uno de los métodos de prueba no destructivos y es esencial que se conozcan estas limitaciones para que se aplique el método apropiado en función de las variables asociadas con el objeto de prueba. Por ejemplo, sería muy difícil proporcionar una prueba ultrasónica significativa en una fundición pequeña con formas muy complejas y superficies rugosas. En este caso, sería mucho más apropiado considerar la radiografía. En otro caso, el objeto puede ser extremadamente grueso y de alta densidad, lo que hace que la radiografía sea poco práctica. Las pruebas ultrasónicas, por otro lado, pueden ser muy efectivas. Además de que el objeto de prueba es "comprobable", también debe ser accesible [4].
- 2) Se deben seguir los procedimientos aprobados: Es esencial que todos los exámenes no destructivos se realicen siguiendo los procedimientos que se han desarrollado de acuerdo con los requisitos o especificaciones que se

aplican. Además, es necesario calificar o "probar" el procedimiento para asegurar que detectará las discontinuidades o condiciones aplicables y que la parte puede ser examinada de una manera que satisfaga los requisitos. Una vez que el procedimiento ha sido calificado, una persona certificada en pruebas no destructivas u otra persona de control de calidad que esté calificado para evaluar adecuadamente la idoneidad del procedimiento debe aprobarlo [4].

- 3) El equipo funciona correctamente: Todos los equipos a utilizar deben estar en buenas condiciones de funcionamiento y estar debidamente calibrados. Además, se deben realizar verificaciones de control periódicamente para asegurar que el equipo y los elementos accesorios funcionen correctamente. Por lo general, se requieren calibraciones anuales, aunque es necesaria una verificación "funcional" como requisito previo para el rendimiento real de la prueba [4].
- 4) La documentación está completa: Es esencial que se complete la documentación adecuada de la prueba al finalizar el examen. Esto debería abordar todos los elementos clave del examen, incluidos los datos de calibración, la descripción del equipo y la pieza, el procedimiento utilizado, la identificación de las discontinuidades si se detectan, etc. Todos estos son elementos claves. Además, la documentación de la prueba debe ser legible. Han sucedido casos en los que el examen se realizó correctamente y, sin embargo, la documentación fue tan difícil de interpretar que arrojó dudas sobre los resultados y generó dudas con respecto a la validez de todo el proceso [4].
- 5) El personal está calificado: Dado que las pruebas no destructivas son una tecnología "práctica" y dependen en gran medida de las capacidades de las personas que realizan los exámenes, el personal no sólo debe estar calificado, sino también debidamente certificado. La calificación implica la capacitación planificada formalizada, las pruebas y la experiencia definida.

### **1.3.2. CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVOS**

Los métodos de ensayo no destructivos se pueden clasificar inicialmente en dos métodos de ensayos, los cuales son: volumétricos y superficiales.

### **1.4. MÉTODOS DE ENSAYOS VOLUMÉTRICOS**

Estos métodos son utilizados para la detección de discontinuidades tanto superficiales como también las que se localizan dentro del material sujeto a ensayo.

Los métodos de ensayos utilizados actualmente son: por ultrasonido y por radiografía industrial.

#### **1.4.1. MÉTODO DE ENSAYO POR ULTRASONIDO**

Este se fundamenta en el fenómeno de la reflexión de las ondas acústicas cuando se encuentran con discontinuidades en su propagación (ver, Fig. 1.7). La onda será reflejada hasta su fuente de generación si la discontinuidad se encuentra en una posición normal en relación al haz incidente.

El ensayo ultrasónico se basa en el hecho de que la presencia de una discontinuidad o un cambio en la densidad del material actuará como si fuese un reflector de propagaciones de alta frecuencia impuesto allí mismo.

El equipo de ultrasonido posee un cabezal o palpador de cuarzo o cualquier otro material piezoeléctrico (ver, Fig. 1.8); cuando una diferencia de potencial se aplica, el cristal o palpador vibra a alta frecuencia y al ponerlo en contacto con la pieza sujeta a ensayo, esta vibración es transmitida a dicha pieza, viajando a través de la misma, hasta encontrar una discontinuidad o cambio de densidad.

En este punto, parte de esta energía (vibración) es reflejada de vuelta, llegando nuevamente al palpador y transmitiendo la misma al cristal del elemento piezoeléctrico, la cual se transformará en pulsos eléctricos que, a la vez, podrán ser visualizados en la pantalla de un osciloscopio.

También, no existe un método de prueba no destructivo que sea una solución a todo tipo de problema. Cada método tiene sus ventajas y limitaciones. Se trata de seleccionar el método de prueba que ofrezca el enfoque más efectivo para resolver el problema del examen. Al determinar si el ultrasonido es el método de prueba más apropiado, se debe considerar lo siguiente:

- ✓ Parte y geometría a examinar;
- ✓ Tipo de material;
- ✓ Espesor del material;
- ✓ Procesamiento del material: fundido, forjado, etc.;
- ✓ Tipo de discontinuidades a detectar;
- ✓ Tamaño mínimo de discontinuidad a detectar;
- ✓ Ubicación de las discontinuidades: ruptura de superficie o interna;
- ✓ Orientación de las discontinuidades (muy importante al seleccionar una técnica de prueba);
- ✓ Accesibilidad a áreas de interés;
- ✓ Condiciones de superficie; y
- ✓ Tipo de registro de examen requerido.

El método de ensayo presenta muchas ventajas, entre las cuales se pueden citar:

- ✓ Alto poder de penetración, el cual permite la identificación de discontinuidades en grandes espesores;
- ✓ Alta sensibilidad del ensayo, permitiendo la detección de discontinuidades muy pequeñas;
- ✓ Portabilidad del equipo;
- ✓ Control considerable sobre las variables de prueba;
- ✓ Variedades de técnicas que están disponibles para los diversos modos de onda;

- ✓ El examen a alta temperatura es posible con el equipo correcto;
- ✓ Inspección de partes enterradas; y
- ✓ Técnicas precisas de dimensionamiento para roturas de superficie y discontinuidades internas.

Dentro de las desventajas se pueden citar:

- ✓ La aplicación del método de ensayo requiere conocimientos y experiencia profundos por parte del operador;
- ✓ Discontinuidades que se presenten muy próximas a la superficie pueden no ser detectadas; y
- ✓ Requiere siempre de la calibración del equipo; esta no siempre es de ejecución simple.

Algunas de las limitaciones del examen ultrasónico son:

- ✓ Las discontinuidades que están orientadas en paralelo con la energía del haz generalmente no se detectarán. La orientación de la discontinuidad (reflector) es el factor más importante en la detección de discontinuidades.
- ✓ Las discontinuidades que son similares o más pequeñas que la estructura de grano del material pueden no ser detectadas.
- ✓ Las secciones delgadas pueden presentar problemas de resolución o requerir la implementación de técnicas especiales.
- ✓ Las superficies de escaneo desiguales pueden reducir la efectividad de la prueba.
- ✓ Las señales se pueden malinterpretar. Esto incluye señales falsas de conversión de modo o redirección de haz.
- ✓ Este método requiere un alto nivel de habilidad y entrenamiento.
- ✓ El registro permanente de los resultados del examen no es típico. Los registros se limitan a la documentación física en lugar de una reproducción real de la prueba.

En la Fig. 1.9 se presenta algún ejemplo de palpadores para los equipos de ultrasonido.

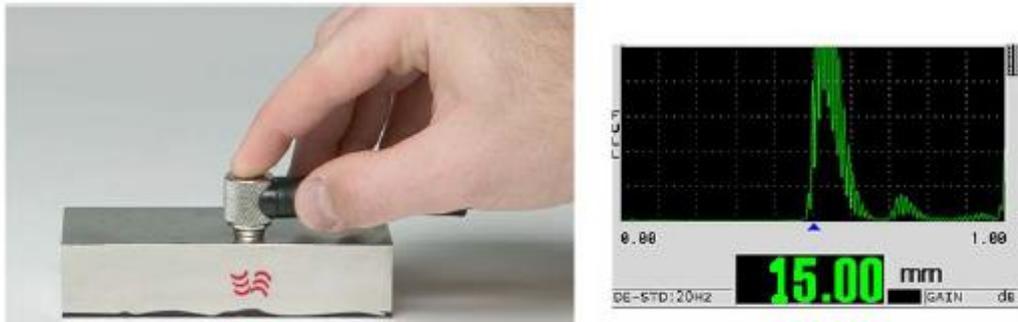


Fig. 1.7. Ejemplo de ensayos por pulso-eco con 0° para medición de espesor.

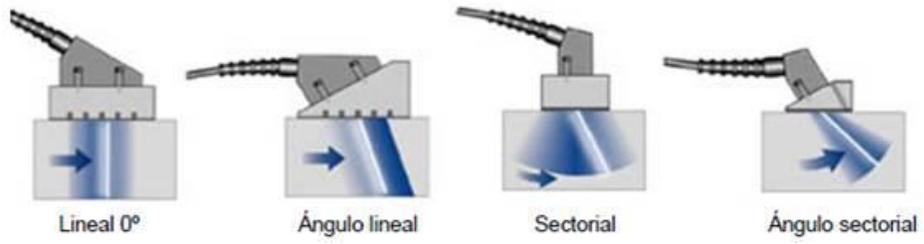


Fig. 1.8. Tipos de escaneo.



Fig. 1.9. Ejemplos de palpadores.

## 1.4.2. MÉTODO DE ENSAYO POR RADIOGRAFÍA

El método de ensayo por radiografía se puede realizar por medio de rayos X o gamma, estos rayos electromagnéticos son de longitud de onda corta capaces de atravesar espesores de metal relativamente grandes.

Los rayos gamma se pueden obtener ya sea de un material radiactivo natural (como el radio) o de un isotopo radioactivo (como el cobalto 60). La radiación gamma es más penetrante que los rayos X, aunque su sensibilidad inferior limita su aplicación. No hay forma de que la fuente se pueda regular para examinar espesores variables o con contrastes, y generalmente requiere mucho más tiempo de exposición que el método de rayos X [5].

Los rayos X se producen cuando la materia es bombardeada por un haz de electrones que se mueven rápidamente. Cuando los electrones se detienen de repente por la materia, parte de su energía cinética se convierte en energía de radiación o rayos X [5].

Las condiciones esenciales para la generación de rayos X son:

- a) Un filamento (cátodo) que proporciona la fuente de electrones que se dirigen hacia el objetivo.
- b) Un objetivo (ánodo) localizado en la trayectoria de los electrones.
- c) Una diferencia de voltaje entre el cátodo y el ánodo, con lo que se regulará la velocidad de los electrones que inciden sobre el objetivo, regulando la longitud de onda de rayos X producidos.
- d) Un medio de regular la corriente del tubo para controlar el número de electrones que chocan contra el objetivo.

Los rayos X son peligrosos y se deben emplear medidas de seguridad adecuadas para proteger el personal que los maneja.

Una radiografía es una fotografía sombreada de un material más o menos transparente a la radiación. Los rayos X oscurecen la película, de modo que las regiones de menor densidad que permiten fácilmente la penetración de éstos aparecen oscuras en el negativo, comparadas con las regiones de mayor densidad que absorben más radiación (ver, Fig. 1.10).

La radiación de la fuente se ve influida por el material sometido a prueba. Conforme el espesor aumenta, la intensidad de radiación que alcanza al detector disminuye. Si la respuesta del detector es calibrada con base en espesores conocidos, la lectura del detector se puede usar para indicar el espesor del material revisado [5].

Los usos de la radiografía están limitados solo por los principios inherentes al proceso y la mente humana. Los muchos desarrollos e innovaciones recientes de la radiografía incluyen la tomografía computarizada industrial, radiografía en tiempo real, imágenes con flash (alta velocidad), radiografía de movimiento, radiografía de microfoco, imagen digital y la luminiscencia fotostimulable, también conocido como placas de fósforo de almacenamiento, para capturar imágenes radiográficas [5].

También, las pruebas radiográficas tienen muchas ventajas, algunas de las más importantes se presentan a continuación:

- ✓ Proporciona un registro extremadamente preciso y permanente.
- ✓ Es muy versátil y se puede usar para examinar muchas formas y tamaños.
- ✓ Es bastante sensible, suponiendo que la discontinuidad causa una reducción razonable del grosor de la sección transversal.
- ✓ Permite caracterización de discontinuidad.
- ✓ Es ampliamente utilizado y probado en el tiempo.

Dentro de las limitaciones se puede numerar algunas:

- ✓ Existen riesgos de seguridad con el uso de dispositivos de radiación.
- ✓ Las pruebas radiográficas tienen limitaciones de espesor, basadas en la densidad del material y la energía utilizada.
- ✓ Las pruebas radiográficas pueden llevar mucho tiempo
- ✓ Las pruebas radiográficas son muy costosas en equipos iniciales y materiales fungibles.
- ✓ También depende mucho de la orientación de la discontinuidad.
- ✓ Las pruebas radiográficas requieren una amplia experiencia y capacitación del personal que toma las radiografías y también para su interpretación

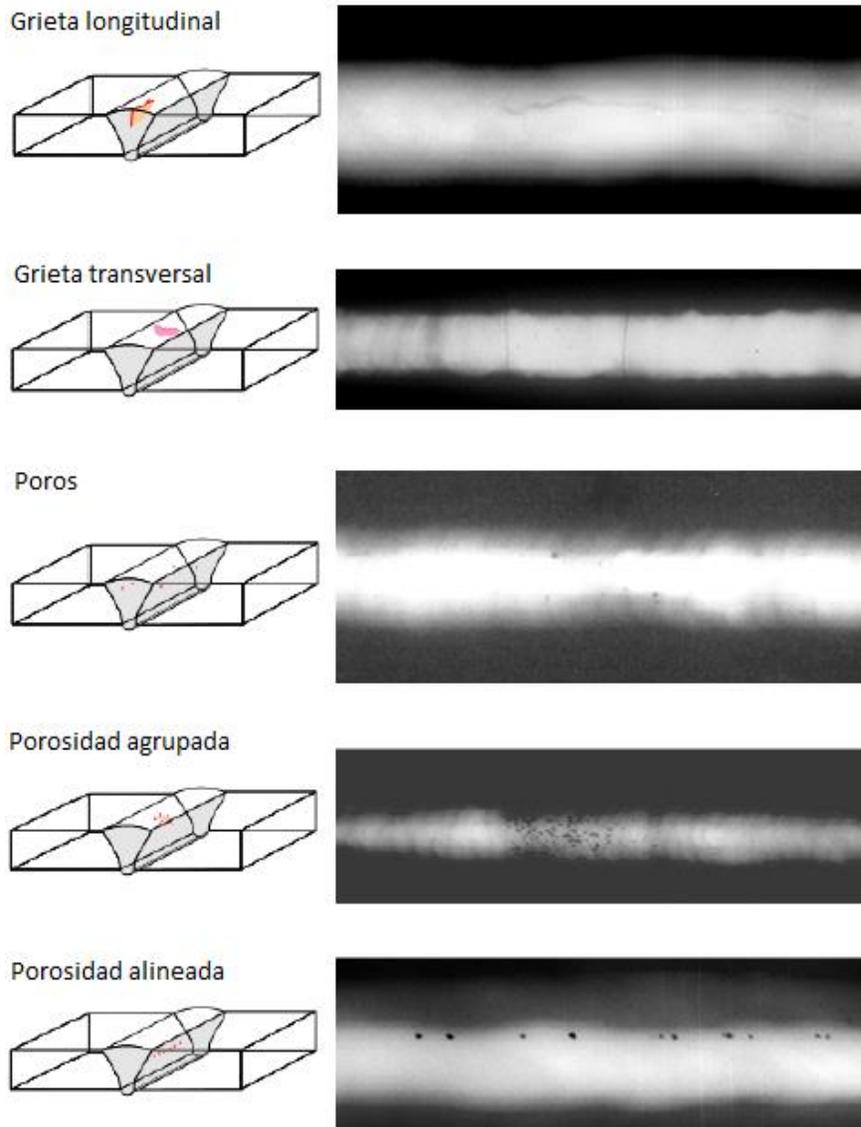


Fig. 1.10. Ejemplos radiografías de discontinuidades en soldadura.

## 1.5. MÉTODOS DE ENSAYO SUPERFICIALES

Estos métodos son utilizados para la detección de discontinuidades superficiales; es decir, las que están en la superficie de la pieza sujeta a examen. Cabe aclarar que discontinuidad es toda irregularidad detectada por algún método de ensayo; defecto es toda aquella discontinuidad que es rechazada por los requerimientos mínimos de un código, norma o especificación.

Dentro de estos métodos, los más comunes en cuanto a su utilización se pueden citar: ensayo visual, por líquidos penetrantes, por partículas magnéticas, y por corrientes de Eddy.

### **1.5.1. MÉTODO DE ENSAYO VISUAL**

Este es el método más simple y ampliamente utilizado; sin embargo, tiene su metodología y sigue un procedimiento ordenado. Genera resultados rápidos y normalmente tiene costos bajos. Los resultados obtenidos en la inspección visual pueden auxiliar en mucho, la aplicación posterior de otros ensayos no destructivos.

El principio básico del ensayo visual es la iluminación adecuada de la pieza, en la región a inspeccionar; esta será examinada directamente al ojo humano (ver, Fig. 1.11) o por medio de un accesorio tal como un boroscopio o una lupa, además de una buena limpieza de la pieza sujeta a inspección, antes de ser examinada.

Dentro del equipo básico necesario para aplicar adecuadamente el ensayo visual se pueden tener la lupa, el espejo de dentista, la regla metálica, el metro, el calibrador vernier, el micrómetro, una lámpara [5].

El examen visual directo tiene una ventaja sobre otras técnicas, ya que generalmente ofrece una vista más clara de la superficie de inspección. La vista directa dará como resultado el procesamiento del espectro completo de longitudes de onda de luz que están disponibles para el ojo y el cerebro para formar una imagen. El inspector observa directamente todos los colores, sombras, texturas y atributos visuales que generalmente existen. La limitación es que la mejora artificial de la imagen no siempre es posible y las restricciones de acceso pueden limitar la vista. Los extremos ambientales que son peligrosos para el personal de inspección pueden limitar el tiempo de visualización o la visualización de la imagen por completo.

Una ventaja de la fotografía es que es una excelente técnica de mantenimiento de registros. Las cámaras digitales proporcionan resolución y detalles excepcionales. La cámara digital permite almacenar y descargar múltiples imágenes en otra cámara, monitor de TV o medio de almacenamiento de la computadora. Una vez archivadas, las imágenes se pueden recuperar e importar a un informe. La limitación puede ser la calidad de la imagen, es decir, el grado de resolución y claridad, dependiendo del equipo utilizado. También puede haber limitaciones en el espacio de almacenamiento o memoria disponible. Esto puede limitar la calidad o cantidad de las imágenes almacenadas.

En general, la principal limitación para las pruebas visuales es el acceso. La imagen del objeto debe ser entregada a la vista. Esa imagen es siempre de la superficie de un objeto. La prueba visual es capaz de examinar la superficie de un objeto a menos que el material sea translúcido. El desafío sigue siendo comprender completamente "qué" está examinando el inspector y "cómo" se entrega la imagen a la vista. A medida que los diseñadores hacen que el paquete de recopilación de imágenes sea cada vez más pequeño, las limitaciones de acceso se reducirán aún más. En la Fig. 1.12 se observa las diferentes galgas empleadas en inspecciones visuales.

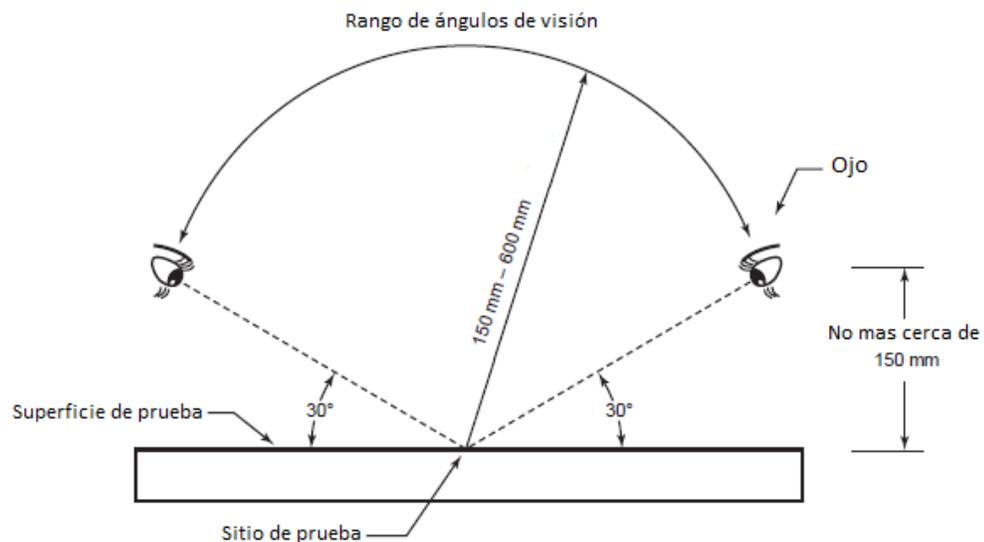


Fig. 2.11. Ángulo mínimo para pruebas visuales típicas.



Fig. 3.12. Diferentes galgas empleadas en inspección visual.

### 1.5.2. MÉTODO DE ENSAYO POR LÍQUIDOS PENETRANTES

Este es un método sensible no destructivo con el que se pueden detectar pequeñas discontinuidades como fisuras, contracciones y porosidades que afecten a la superficie de la pieza sujeta a examen.

El método puede ser considerado como una extensión de la inspección por ensayo visual ya que muchas de las discontinuidades podrían no ser detectadas a través de este último, aunque dicho ensayo debe ser llevado a cabo por un inspector experimentado.

Aunque este método se puede aplicar tanto a materiales magnéticos como no magnéticos, se usa principalmente en materiales no magnéticos. Se puede recurrir a varias técnicas penetrantes para revisar cualquier material homogéneo que no sea poroso, como metales, vidrio, plástico y algunos materiales cerámicos [5].

Las partes que se van a probar se tratan primero con un trazador o colorante. Por lo general, los trazadores son líquidos ligeros, de apariencia aceitosa que se aplican a la prueba por inmersión, rociado o con una brocha o de alguna otra manera conveniente. El trazador es absorbido dentro de las fisuras y otras discontinuidades por una fuerte acción capilar. Después que el trazador ha tenido tiempo para que se filtre, los residuos restantes sobre la superficie se limpian o se lavan. Esto permite al trazador permanecer en todas las discontinuidades que afecten a la superficie [5].

A continuación, la pieza que se está revisando se trata con un polvo seco o una suspensión de polvo en un líquido. Este polvo o revelador actúa como una esponja que atrae al trazador fuera del defecto y aumenta el tamaño del área de indicación (ver, Fig. 1.13).

A fin de que el proceso de inspección sea eficaz, el trazador debe ser observado fácilmente en el polvo revelador. Un método para facilitar la inspección es usar colores contrastantes para el trazador y el revelador. Una combinación muy común es utilizar un revelador blanco y un colorante rojo (ver, Fig. 1.14).

Las principales ventajas de las pruebas penetrantes incluyen:

- ✓ Portabilidad;
- ✓ Costo (económico);
- ✓ Sensibilidad;
- ✓ Versátil: prácticamente cualquier material sólido no poroso puede ser inspeccionado;
- ✓ Efectivo para la inspección de producción; y
- ✓ No destructivo.

Entre las principales limitaciones incluyen:

- ✓ Sólo se pueden detectar discontinuidades abiertas a la superficie de la muestra de prueba;
- ✓ Se tienen muchas variables de procesamiento que se deben controlar;
- ✓ Efectos de variación de temperatura;
- ✓ Condición de superficie y configuración; t
- ✓ La preparación de la superficie es necesaria.

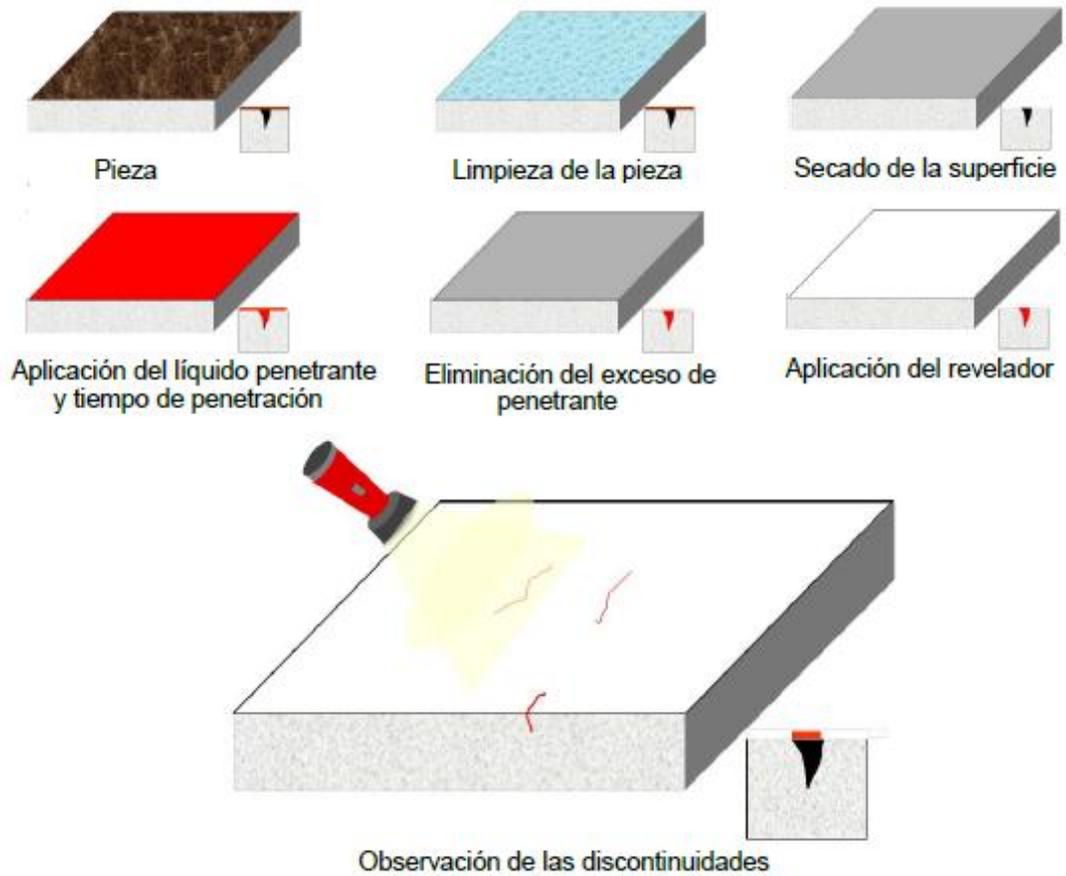


Fig. 4.13. Proceso o secuencia de operaciones del ensayo de líquidos penetrantes.

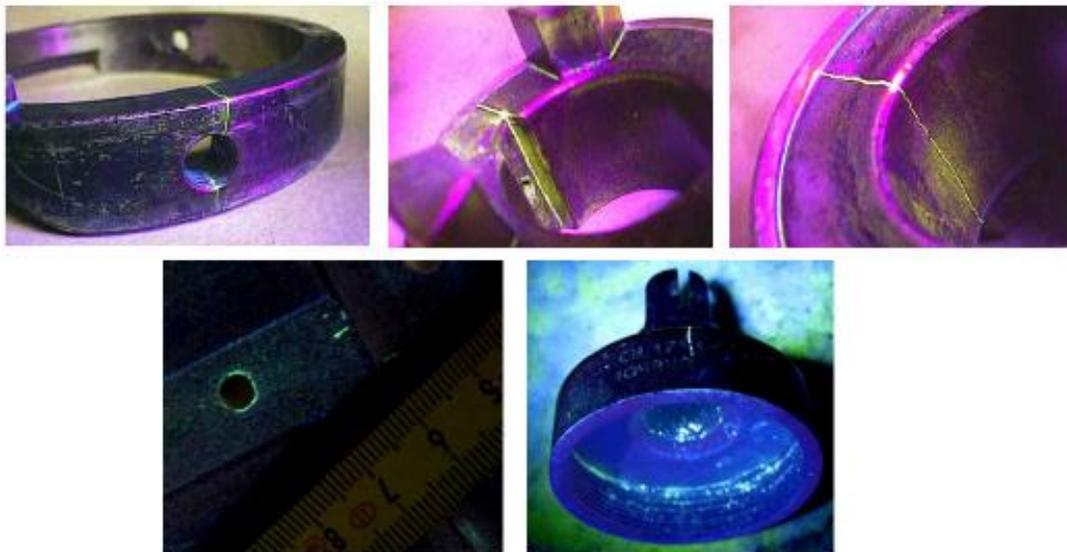


Fig. 5.14. Discontinuidades en piezas de materiales metálicos por medio de líquidos penetrantes.

### 1.5.3. MÉTODO DE ENSAYO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Este es un método para detectar la presencia de fisuras, recubrimientos, rasgones, inclusiones y discontinuidades semejantes en materiales ferromagnéticos como el hierro y el acero. El método detecta discontinuidades de la superficie demasiado fina para que se aprecien a simple vista y también detecta discontinuidades ligeramente por debajo de la superficie. No es aplicable a materiales no magnéticos [5].

La inspección por partículas magnéticas e puede realizar en diversas formas:

- ✓ Método residual: La pieza que se va a inspeccionar se puede magnetizar y luego se debe cubrir con finas partículas magnéticas (polvo de hierro).
- ✓ Método continuo: La magnetización de las partículas se puede hacer simultáneamente.
- ✓ Método húmedo: Las partículas magnéticas se pueden mantener en suspensión en un líquido que se vierte sobre la pieza, o la pieza se puede sumergir en la suspensión.
- ✓ Método seco: Las partículas, en forma de polvo fino, se esparcen sobre la superficie de la pieza de trabajo.

Cuando la discontinuidad está abierta a la superficie el campo magnético se fuga hacia la superficie y forma pequeños polos norte y sur que atraen a las partículas magnéticas. Cuando pequeñas discontinuidades están bajo la superficie, alguna parte del campo aún se podría desviar a la superficie, aunque la fuga es menor y se atraen menos partículas, con lo que la indicación obtenida es mucho más débil, en la Fig. 1.15 se observa el proceso o secuencia de operaciones del ensayo de partículas magnéticas [5].

Si la discontinuidad está muy lejos por debajo de la superficie, no habrá ninguna fuga del campo magnético y, en consecuencia, no se obtendrá alguna indicación, en la Fig. 1.16 se observan las discontinuidades detectadas en piezas de materiales metálicos, mediante partículas magnéticas.

Las ventajas de las pruebas de partículas magnéticas en comparación con los métodos alternativos de pruebas no destructivas, son las siguientes.

- ✓ Los resultados de la prueba son prácticamente instantáneos, ya que las indicaciones se formarán dentro de uno o dos segundos de la aplicación de partículas. No hay tiempos de desarrollo o procesamiento involucrados.
- ✓ Se pueden producir registros permanentes de indicaciones utilizando técnicas de fotografía, goma magnética o cinta transparente.
- ✓ Las indicaciones son fáciles de interpretar.
- ✓ Las indicaciones formadas por las partículas representan la forma y el tipo de discontinuidad.
- ✓ El equipo de pruebas magnéticas puede ser mucho menos costoso que otros equipos de pruebas no destructivas. Dependiendo del grado de automatización o escala de operación, también puede ser más económico que muchos otros métodos de pruebas no destructivas.
- ✓ Prácticamente cualquier tamaño o forma de componente de puede inspeccionar.
- ✓ Las inspecciones se pueden realizar durante todas las etapas de fabricación.
- ✓ La preparación de la superficie de la pieza de prueba es menos crítica que con la prueba penetrante.
- ✓ Las pruebas magnéticas se pueden usar para inspeccionar a través de recubrimientos metálicos y no metálicos o enchapado con algunas técnicas. Sin embargo, se debe tener en consideración que se producirá una reducción en la sensibilidad a medida que aumenta el grosor del recubrimiento. El espesor máximo del recubrimiento se debe establecer mediante pruebas de calificación o estipular en las especificaciones del cliente o los requisitos del código.
- ✓ No Existen riesgos conocidos para el personal asociados con el proceso porque los campos magnéticos generados son de corta duración; sin embargo, se aplican las precauciones habituales de descarga eléctrica, elevación manual y productos químicos (destilado de petróleo). Además, las

piezas se pueden calentar durante el proceso si se aplica una corriente de alto amperaje durante un período prolongado.

- ✓ Muchas partes se pueden inspeccionar simultáneamente si se utiliza la técnica de magnetismo residual.

Las limitaciones de las pruebas de partículas magnéticas en comparación con otros métodos de pruebas no destructivas, son las siguientes:

- ✓ Sólo es eficaz para el examen de materiales ferromagnéticos.
- ✓ La detección de discontinuidad se limita a aquellos cerca de la superficie.
- ✓ La desmagnetización puede ser necesaria antes, durante y después de las inspecciones.
- ✓ Las discontinuidades sólo se detectarán cuando su eje principal interrumpa las líneas de flujo primarias. Esto requiere inspección en más de una dirección para asegurar la detección de discontinuidad independientemente de la orientación.
- ✓ Algunas técnicas de prueba de partículas magnéticas pueden causar daños a la parte como resultado de un arco eléctrico o sobrecalentamiento localizado de las partes.
- ✓ La eliminación de pintura y/o recubrimiento es necesaria en áreas localizadas en la pieza para facilitar un buen contacto eléctrico cuando se utilizan técnicas de magnetización directa.
- ✓ El flujo uniforme y predecible a través de las partes que se están probando puede no ser posible debido a formas complejas.
- ✓ Las indicaciones no relevantes debido a cambios abruptos en el perfil del componente o cambios locales en las propiedades del material pueden dificultar la interpretación.

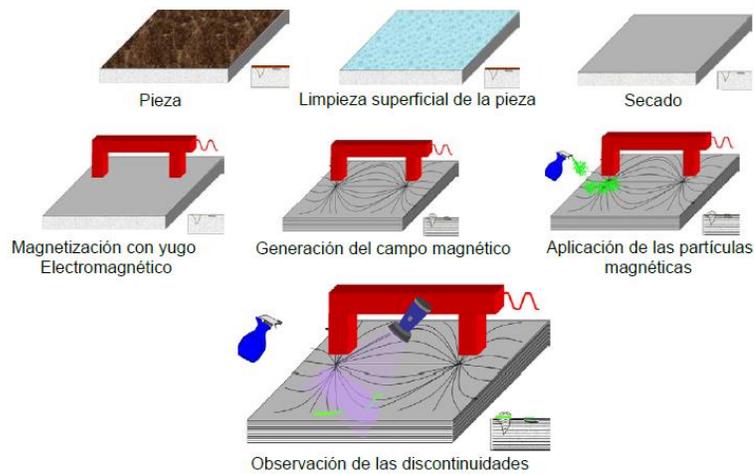


Fig. 6.15. Proceso o secuencia de operaciones del ensayo de partículas magnéticas.

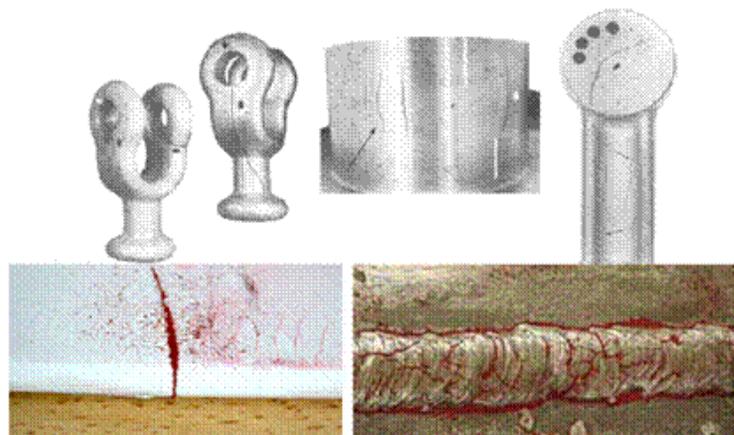


Fig. 7.16. Discontinuidades detectadas en piezas de materiales metálicos, mediante partículas magnéticas.

#### 1.5.4. MÉTODO DE ENSAYO POR CORRIENTES DE EDDY

La teoría de las corrientes de Eddy (Foucault) se fundamenta en los principios de electricidad y magnetismo, particularmente la propiedad inductiva de la corriente alterna.

Es una técnica que se utiliza, tanto para la detección de discontinuidades en materiales, como también para medir indirectamente características mecánicas, metalúrgicas y físicas que se correlacionan con las propiedades

eléctricas y magnéticas del objeto ensayado, en la Fig. 1.17 se pueden observar los diferentes tipos de bobina para este tipo de ensayo.

El ensayo se basa en la interacción de campos electromagnéticos con el objeto examinado; los componentes básicos son:

- ✓ Una bobina conduciendo corriente alterna,
- ✓ Un medio de detección de dicha corriente, y
- ✓ El objeto metálico sujeto a ensayo.

En las Figs. 1.18 y 1.19 se pueden observar los equipos de este tipo de ensayo, así como también las diferentes sondas para estos equipos

La corriente alterna en la bobina induce un campo magnético orientado perpendicularmente a la corriente; este campo se modifica si un componente metálico está presente. Si el campo magnético interseca un componente conductor no magnético, se generan o inducen corrientes parásitas también llamadas de corrientes de Eddy las cuales fluyen normales al campo magnético.

Las corrientes inducidas a su vez establecen un campo magnético secundario el cual resulta opuesto al de la bobina, lo que causa una cancelación parcial del mismo. La reducción del flujo magnético en la bobina produce un cambio en su impedancia y es precisamente el monitoreo de este cambio lo que constituye el ensayo por corrientes inducidas [5].

Se puede lograr la medición de recubrimientos metálicos sobre una base conductiva o magnética. Esta aplicación presenta las variantes de recubrimientos de baja y alta conductividad y recubrimientos de baja y alta permeabilidad sobre sustratos de alta o baja conductividad o permeabilidad, según sea el caso.

Siendo su mayor utilización, el método sirve para la detección de fisuras y la clasificación de materiales.

La versatilidad del método de corrientes de Eddy ha resultado en un amplio uso de aplicaciones. Sin embargo, las principales áreas de aplicación incluyen las siguientes:

- ✓ Inspección en servicio de tuberías en empresas de energía nuclear y de combustibles fósiles, en plantas químicas y petroquímicas, en submarinos nucleares y en sistemas de aire acondicionado.

- ✓ Inspección de estructuras y motores aeroespaciales.
- ✓ Pruebas de producción de tubos, tuberías, alambres, varillas y barras.

Una de las principales ventajas del método de corrientes de Eddy es también una de sus limitaciones más severas; es decir, el método de la corriente de Eddy es sensible a muchas variables, incluida la conductividad y el grosor del material, el tamaño de las discontinuidades de la superficie, el grosor del revestimiento o revestimiento de los metales base, el espacio entre las capas conductoras, el espacio entre la bobina de prueba y el material de prueba y variaciones de permeabilidad. Sin embargo, la principal limitación del método de corrientes parásitas es que la respuesta a estas variables es vectorialmente aditiva, con el resultado de que cuando la bobina de prueba detecta más de una variable, todas las variables se combinan en una sola respuesta que puede ser difícil de resolver. Las técnicas utilizadas para superar este problema varían de relativamente simples a complicadas y potencialmente costosas, como el uso de instrumentos multifrecuencia, en las Figs. 1.18 y 1.20 se presentan las indicaciones generadas por los equipos de este tipo de ensayo [5].

Las ventajas adicionales del método de corrientes de Eddy incluyen las siguientes:

- ✓ El equipo disponible para uso en campo se ha vuelto cada vez más portátil y liviano. Además, muchos instrumentos están basados en un microprocesador, lo que permite que las configuraciones de prueba se guarden en la memoria y los resultados de la prueba se guarden en un disco para su archivo y análisis.
- ✓ No es necesario aplicar acoplamientos, polvos u otras sustancias físicas al material de prueba. El único enlace requerido entre la sonda y el material de prueba es un campo magnético.
- ✓ Los resultados de las pruebas suelen ser instantáneos. Tan pronto como la bobina de prueba responde a la muestra de prueba, un usuario calificado puede interpretar los resultados. Además, el uso de equipos multifrecuencia puede complicar en gran medida la cantidad de datos adquiridos en un

instante dado y volverlos abrumadores a menos que se graben y luego se revisen como elementos separados.

- ✓ No es necesario que el conjunto de la bobina toque el material de prueba. Esto permite realizar pruebas de producción a alta velocidad sin fricción, evitando así el desgaste de las bobinas de prueba.
- ✓ Las pruebas de corrientes de Eddy son seguras; no existe peligro de radiación u otros peligros similares.
- ✓ La preparación del material generalmente es innecesaria y no se requiere limpieza.

Entre las limitaciones de las pruebas de corrientes de Eddy se pueden incluir las siguientes:

- ✓ El material de prueba debe ser eléctricamente conductor.
- ✓ Es difícil evaluar las condiciones del subsuelo en materiales ferromagnéticos. En consecuencia, la prueba de materiales ferromagnéticos se limita a detectar discontinuidades en la superficie solamente, a menos que el material haya sido saturado magnéticamente. La saturación magnética se limita a la prueba de geometrías que pueden acomodar bobinas de saturación, principalmente en aplicaciones de bobina circundante. Es posible realizar una inspección del diámetro interno de la tubería siempre que el campo magnético no sea tan fuerte como para hacer que la sonda se bloquee en la tubería. Además, los objetos de prueba saturados magnéticamente pueden que se tengan que desmagnetizar después de completar la prueba, para que no atraigan desechos ferromagnéticos.
- ✓ Incluso en materiales no ferromagnéticos, el método de corriente parásita tiene una penetración limitada, que varía con la conductividad del material y la frecuencia de prueba. Como regla general, la penetración se limita a fracciones de una pulgada en la mayoría de los materiales.
- ✓ La velocidad de inspección se puede tener que limitar en función de la frecuencia de prueba.
- ✓ Gran parte de la teoría de corrientes de Eddy es complicada, presentando un desafío para los profesionales que requieren el dominio del método.

- Bobinas absolutas.
- Bobinas diferenciales.
- Bobinas de ejes cruzados.
- Bobinas con saturación magnética.

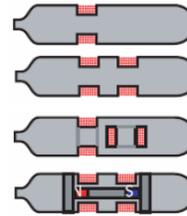


Fig. 8.17. Tipos de bobina.



Fig. 9.18. Equipo de corrientes inducidas detector de discontinuidades con sonda tipo lápiz.



Fig. 10.19. Diferentes tipos de sondas: tipo lápiz, sondas rotatorias para inspección de taladros y sondas array.

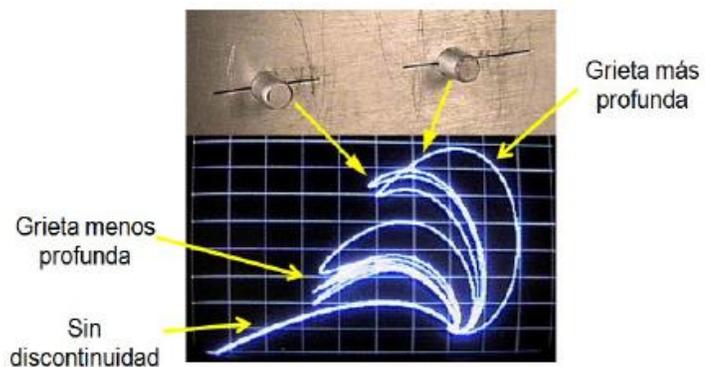


Fig. 1.20. Indicación generada por grietas superficiales.

En las Figs. 1.21 y 1.22 se presentan el proceso o secuencia de operaciones comportamiento del equipo de ensayos por corrientes inducidas en ausencia de una discontinuidad y con presencia de discontinuidad correspondientemente.

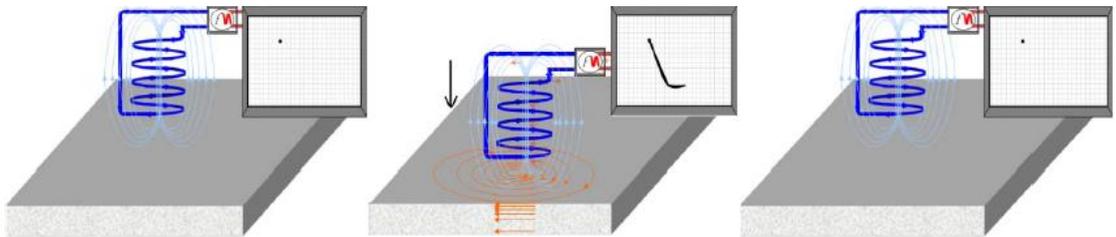


Fig. 11.21. Comportamiento de la pieza en ausencia de discontinuidad. Se generan corrientes inducidas al someter la pieza a un campo magnético generado en una bobina.

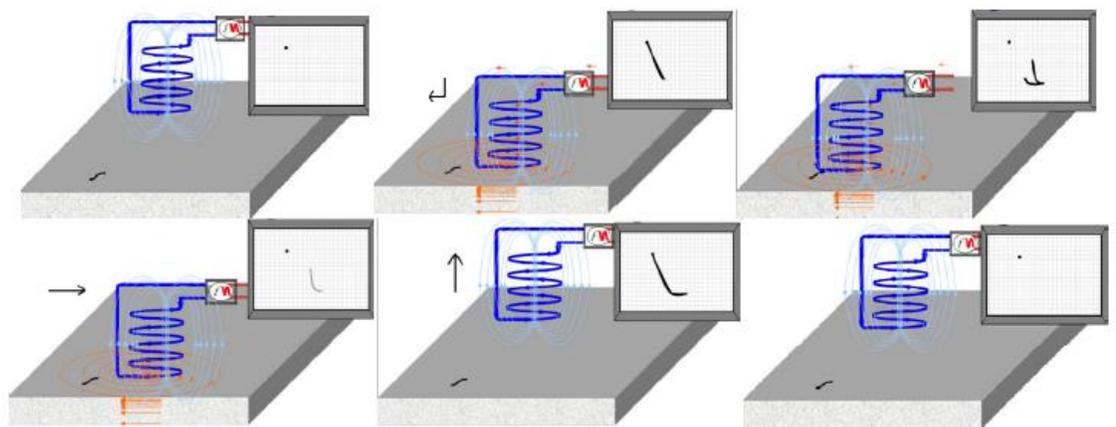


Fig.1.22. Comportamiento de la pieza en presencia de discontinuidad. Las corrientes inducidas generadas sobre la pieza por el campo magnético generado por la bobina son alteradas por la presencia de una discontinuidad, como se observa en la imagen, se genera una señal distinta al pasar sobre ella.

Para finalizar, en la Tabla 1.1 se presenta de manera resumida los diferentes métodos de las pruebas no destructivas, como usarlos, sus ventajas y limitaciones más importantes.

Tabla 1.1. Resumen de los principales métodos de pruebas no destructivas.

Método de inspección	Cuando usarlo	Dónde usarlo	Ventajas	Limitaciones
Corrientes de Eddy	Para medir variaciones en espesor de paredes de metales o capas delgadas; para detectar costuras o vetas longitudinales o fisuras en tubos; para determinar tratamientos térmicos y composiciones metálicas para su clasificación.	Tuberías y barras, partes de geometría uniforme, placas o materiales planos, o laminas y alambre.	Alta velocidad, ningún contacto, automático.	Falsas indicaciones como resultado de las muchas variables; solo es útil para materiales conductores; profundidad de penetración limitada.
Radiografía	Para determinar imperfecciones y defectos internos; para encontrar fallas en soldadura, fisuras, vetas o costuras, porosidad, hoyos, inclusiones, falta de fusión, para medir variaciones en espesor	Ensamblajes de partes electrónicas piezas coladas, recipientes soldados; prueba de campo de soldaduras; inspecciones de corrosión; componentes de materiales no metálicos.	Proporciona un registro permanente en la película; funciona bien en secciones delgadas; alta sensibilidad; técnicas de fluoroscopia disponibles; nivel de energía estable.	Alto costo inicial; es necesaria una fuente de poder; riesgo por radiación; se necesitan técnicos entrenados.
Partículas magnéticas	Para detectar imperfecciones superficiales o subsuperficiales no profundas, fisuras, porosidad, inclusiones o metálicas y defectos de soldadura.	Solo materiales ferromagnéticos; partes de cualquier tamaño, forma, composición o tratamiento térmico.	Económico, de principio sencillo, fácil de efectuar; portátil (para prueba de campo); rápido para prueba durante la producción industrial.	El material debe ser magnético; se requiere desmagnetización después de la prueba; fuente de potencia necesaria; las partes se deben limpiar antes que se termine de fabricar.
Líquidos penetrantes	Para localizar fisuras superficiales, porosidad, traslapes, defectos por falta de calor, falsas uniones, fatiga y fisuras por esmerilado.	Todos los metales, vidrio y cerámicas, piezas coladas, forjas, partes maquinadas y herramientas de corte; inspecciones de campo.	Sencillo de aplicar, portátil, rápido, bajo costo; resultados fáciles de interpretar, no necesita preparativos complicados.	Limitado a defectos superficiales; las superficies deben estar limpias.
Ultrasonido	Para encontrar defectos internos, fisuras, falsas uniones, laminaciones,	Todos los materiales no metálicos duros; laminas, tubos,	Rápido, confiable, fácil de operar; facilita la automatización; los	Requiere contacto o inmersión de la parte, y la

	inclusiones, porosidad; para determinar la estructura de grano y espesores.	varillas, forjas, piezas coladas; prueba de campo y producción; prueba de campo y producción; uniones de enlace adhesivas y soldadas.	resultados de la prueba se conocen de inmediato; relativamente portátil, muy exacto, sensible.	interpretación de lecturas; necesita entrenamiento.
--	---	---	--	---

## 1.6. LEY DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El voltaje inducido es el resultado de un flujo magnético que atraviesa un conductor, producido por el movimiento físico del campo magnético o del conductor. Sin embargo, cuando la corriente en un conductor varía en amplitud, las variaciones de corriente y su campo magnético asociado son equivalentes al movimiento del flujo. A medida que la corriente aumenta de valor, el campo magnético se expande hacia afuera desde el conductor. Cuando la corriente disminuye, el campo colapsa en el conductor. A medida que el campo se expande y colapsa con los cambios de corriente, el flujo está efectivamente en movimiento. Por lo tanto, una corriente variable puede producir voltaje inducido sin necesidad de movimiento del conductor.

El resultado de un campo de flujo en expansión y colapso es el mismo que el de un campo en movimiento. Este flujo en movimiento atraviesa el conductor que proporciona la corriente, produciendo voltaje inducido en el propio cable. Además, cualquier otro conductor en el campo, ya sea que lleve corriente o no, también es cortado por el flujo variable y tiene voltaje inducido.

### 1.6.1. LEY DE LENZ

La Ley de Lenz establece: La dirección de una corriente inducida es tal que se opone a la causa que la produce.

La causa de la corriente puede ser el movimiento de un conductor en un campo magnético, o puede ser el cambio de flujo a través de un circuito

estacionario. En el primer caso, la dirección de la corriente inducida en el conductor en movimiento es tal que la dirección del empuje lateral ejercido sobre el conductor por el campo magnético es opuesta a su movimiento. Por lo tanto, el movimiento del conductor es opuesto.

En el segundo caso, la corriente establece un campo magnético propio, que dentro del área delimitada por el circuito es opuesto al campo original si este está aumentando, aunque está en la misma dirección que el campo original si el último está disminuyendo. Por lo tanto, es el cambio de flujo a través del circuito (no el flujo en sí) lo que se opone a la corriente inducida.

Además, la capacidad de un conductor para inducir voltaje en sí mismo cuando cambia la corriente se llama autoinducción o autoinducción o simplemente inductancia. El símbolo de la inductancia es  $L$  y su unidad es Henry. Un Henry es la cantidad de inductancia que permite inducir un voltio cuando la corriente cambia a razón de un amperio por segundo. El factor de autoinducción viene dado por la Ec. 1.1, así:

$$L = -\frac{E_{ind}}{(\Delta I/t)} \quad (1.1)$$

donde:

$L$  es la inductancia,

$E_{ind}$  es el voltaje inducido,

$\Delta I$  es el cambio de corriente, y

$t$  es el tiempo.

También, la fracción del flujo total de una bobina que une a otra bobina es el coeficiente de acoplamiento. Se denota con la letra  $k$ . El coeficiente aumenta al colocar la bobina sensora cerca del conductor. Cuando se utilizan bobinas de sonda, el espacio entre la bobina y el conductor se denomina despegue. Cuando se utilizan bobinas envolventes o internas, el acoplamiento se denomina factor de llenado. El coeficiente de acoplamiento aumenta colocando la bobina cerca del conductor. Un valor más alto de  $k$ , llamado acoplamiento estrecho, permite

una mejor inducción mutua. El acoplamiento suelto, con un valor bajo de  $k$ , tiene el efecto contrario.

### 1.6.2. CORRIENTES INDUCIDAS

La ley de Faraday establece que siempre que un campo magnético corta un conductor, fluirá una corriente eléctrica en el conductor si se proporciona un camino cerrado por el que pueda circular la corriente. La corriente alterna que fluye a través de la bobina de prueba producirá un campo magnético cambiante en la bobina. Si se coloca cualquier otra bobina en el campo magnético de la bobina, se inducirá una corriente en la segunda bobina. Si la bobina se coloca muy cerca de la bobina de excitación, la cantidad de corriente inducida en la otra bobina puede ser la misma que la que fluye a través de la bobina de excitación

#### ➤ Corriente inducida en una masa metálica. -

La corriente alterna que fluye a través de la bobina de prueba produce un campo magnético alterno en la bobina. Cuando la bobina de prueba se acerca o se coloca sobre el conductor metálico, el campo magnético pasa (corta) el material y se inducen corrientes circulares (parásitas) en el material como se presenta en la Fig. 1.23

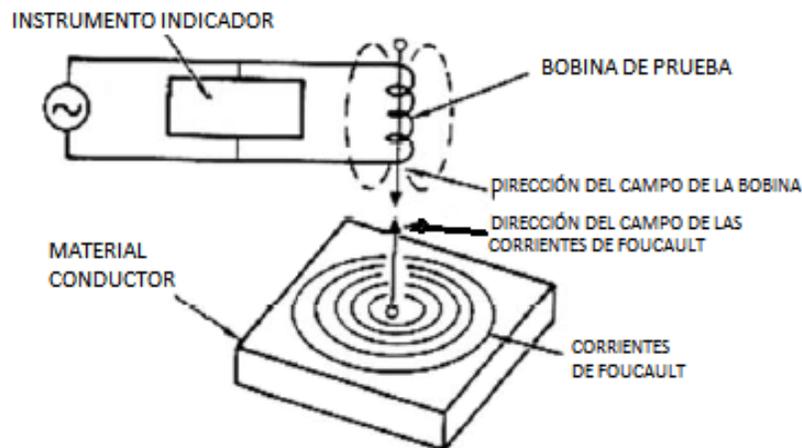


Fig. 112.23. Equipo básico de pruebas de corrientes de Foucault.

La corriente en el conductor (corriente parásita) generará un campo magnético secundario, que induce una corriente en la bobina del sensor. Esta inductancia mutua provoca un cambio en la impedancia de la bobina. Las señales de impedancia detectadas por la bobina de búsqueda son las medidas de la muestra de prueba. Por tanto, la técnica de las corrientes de Foucault utiliza el efecto de los campos electromagnéticos y la inducción para caracterizar las propiedades físicas de los materiales metálicos.

➤ Efecto en la piel.

Las corrientes de Foucault inducidas por un campo magnético cambiante se concentran cerca de la superficie adyacente a la bobina de excitación. Las corrientes parásitas que fluyen en el objeto de prueba a cualquier profundidad producen campos magnéticos que se oponen al campo primario, reduciendo así el flujo magnético neto y provocando una disminución en el flujo de corriente a medida que aumenta la profundidad.

Alternativamente, las corrientes parásitas cerca de la superficie se pueden ver como protegiendo el campo magnético de la bobina, debilitando así el campo magnético a mayores profundidades y reduciendo las corrientes inducidas. Este fenómeno se conoce como efecto piel.

➤ Campo creado por corrientes de Foucault.

En una bobina de prueba, el flujo se configura pasando la corriente alterna a través de ella. Cuando esta bobina se acerca a la muestra conductora, se inducen corrientes parásitas en la muestra. Las corrientes inducidas tienen su propio flujo magnético asociado. La dirección del flujo magnético  $\phi_s$  asociado con las corrientes inducidas es tal que se opone al flujo magnético  $\phi_p$  de la bobina (ley de Lenz), disminuyendo así el flujo magnético neto. Esto da como resultado un cambio de impedancia de la bobina y una caída de voltaje. (ver, Fig. 1.24) ilustra la dirección de los flujos primarios y secundarios.

Es la oposición entre el campo primario y secundario (corrientes de Foucault) lo que proporciona la base para extraer información durante las pruebas de corrientes de Foucault. Cabe señalar que, si la muestra es

ferromagnética, el flujo magnético se refuerza a pesar de los efectos opuestos de las corrientes parásitas. La alta permeabilidad de los materiales ferromagnéticos los distingue de los materiales no ferromagnéticos e influye fuertemente en los parámetros de prueba de las corrientes parásitas.

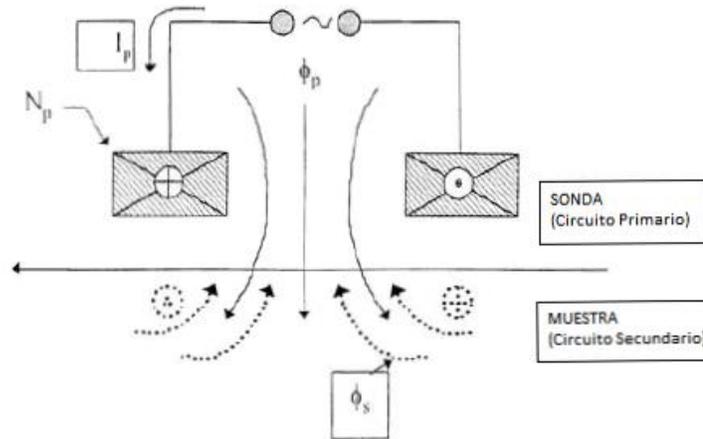


Fig. 1.24. Campo generado por las corrientes parásitas

➤ Resistencia reactiva

El flujo magnético neto de la bobina disminuye a medida que su campo intercepta un material conductor no magnético. Esto reduce tanto la inductancia de la bobina de excitación como su reactancia inductiva. La magnitud de esta reducción depende de lo siguiente:

- a) Conductividad de los materiales de prueba,
- b) Frecuencia de prueba, y
- c) Proximidad de la bobina magnetizadora al material de prueba.

La reactancia de la bobina de prueba en las proximidades del material ferromagnético, por otro lado, aumenta a medida que el material altamente permeable se coloca en el campo de la bobina de excitación. Esto sucede cuando estas líneas de flujo que entran en la parte de prueba ferromagnética encuentran parte de su camino en el material que tiene mucha menos resistencia que el aire.

El campo excitante luego incluye mayores densidades de flujo que están rodeadas por los devanados de la bobina.

## 1.7. FACTORES QUE AFECTAN LAS CORRIENTES PARÁSITA

Los factores que afectan las corrientes parásitas son:

- a) Conductividad  $\sigma$  (Sigma),
- b) Permeabilidad  $\mu$  (mu),
- c) Frecuencia  $f$ ,
- d) Proximidad (factor de despegue / llenado),
- e) Geometría,
- f) Manejo de la sonda, y
- g) Discontinuidades (defectos).

Debido a la gran cantidad de variables en la inspección por corrientes inducidas, para interpretar correctamente la causa en una indicación, los siete factores anteriores deben ser considerados.

### 1.7.1. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

A continuación, se explican cada uno de los factores que afectan las corrientes parásitas y que anteriormente fueron citados. Estos son:

➤ Conductividad.

Si bien la conductividad inherente de un material es siempre la misma, existen factores internos que puede causar lo que parece ser un cambio en la conductividad inherente, estos son:

- a) Aleaciones: Las aleaciones son combinaciones de otros elementos químicos con un metal base. Cada metal o elemento químico tiene un efecto individual sobre la conductividad del metal base. La conductividad del metal base se cambia a un valor relacionado con la composición de la aleación. Por lo tanto, es posible identificar metales básicos y sus aleaciones midiendo sus conductividades.
- b) Dureza: Cuando un metal o aleación se somete a un tratamiento térmico durante su procesamiento o servicio, el metal se volverá más duro o más

blando según el material. Este cambio de dureza es provocado por un cambio interno en el material que también afecta la conductividad del material. Este cambio de conductividad también se puede detectar mediante métodos de prueba de corrientes inducidas. De esta manera se puede detectar un tratamiento térmico inadecuado.

- c) Temperatura y esfuerzos residuales: La temperatura ambiente y los esfuerzos residuales de un material sometido a prueba también influyen en la conductividad del material. Estos cambios también se pueden detectar mediante pruebas de corrientes inducidas. Un aumento en la temperatura del material normalmente da como resultado una disminución en la conductividad del material. Los esfuerzos residuales provocan un cambio de conductividad impredecible, aunque detectable.
- d) Recubrimientos conductores: La presencia de un revestimiento conductor sobre un material conductor cambia la conductividad inherente del metal base tal como lo haría una aleación. Sin embargo, si el grosor del revestimiento varía, la conductividad variará. Este cambio de espesor se puede detectar mediante métodos de prueba de corrientes inducidas

➤ Permeabilidad.

Cuando se coloca una bobina de prueba energizada sobre material ferromagnético no magnetizado, el campo se intensifica en gran medida por las propiedades magnéticas del material, de modo que se produce un gran cambio en la impedancia de la bobina de prueba.

Si la intensidad del campo magnético en varios lugares varía, aunque sea ligeramente, estas pequeñas variaciones tienen un gran efecto en la impedancia de la bobina. Estos cambios en la impedancia de la bobina son a menudo tan grandes (en comparación con los cambios causados por cambios en la conductividad o la dimensión) que enmascaran todos los demás cambios. Cuando la geometría de la muestra lo permita, este efecto se puede superar magnetizando el material hasta la saturación utilizando una bobina separada alimentada por corriente continua. La saturación magnética elimina

efectivamente cualquier variación en el campo magnético residual debido a variables magnéticas y, por lo tanto, permite medir otras variaciones.

Una vez finalizada la prueba, el artículo se debe desmagnetizar.

➤ Frecuencia.

La frecuencia es una de las pocas variables controladas por el operador en las pruebas de corrientes inducidas. El uso principal de la frecuencia es controlar la profundidad de penetración, la densidad y la fase de las corrientes parásitas inducidas. En términos generales, se utilizan frecuencias más altas para detectar discontinuidades de rotura de la superficie y frecuencias más bajas para las pruebas debajo de la superficie.

➤ Proximidad.

El factor de despegue y llenado son los términos que se utilizan para describir cualquier espacio que se produzca entre el artículo bajo prueba y la bobina de inspección. Cada uno tiene un efecto idéntico sobre las corrientes de Foucault. El factor de despegue y llenado son esencialmente lo mismo; uno se aplica a las bobinas de la superficie y el otro a las bobinas circundantes e internas.

a) Despegue: Cuando una bobina de superficie se energiza y se mantiene en el aire por encima de un conductor, la impedancia de la bobina tiene un cierto valor. A medida que la bobina se acerca al conductor, el valor inicial cambiará cuando el campo de la bobina comience a interceptar al conductor. Debido a que el campo de la bobina es más fuerte cerca de la bobina, el valor de impedancia continuará cambiando hasta que la bobina esté directamente sobre el conductor. Por el contrario, una vez que la bobina está en el conductor, cualquier pequeña variación en la separación de la bobina y el conductor cambiará la impedancia de la bobina. El efecto de despegue es tan pronunciado que pequeñas variaciones en el espaciado pueden enmascarar muchas indicaciones.

b) Factor de llenado: En una bobina envolvente, o una bobina interna, el factor de llenado es una medida de qué tan bien se ajusta el conductor (muestra de prueba) a la bobina. Es necesario mantener una relación constante

entre el diámetro de la bobina y el diámetro del conductor. Nuevamente, pequeños cambios en el diámetro del conductor pueden causar cambios en la impedancia de la bobina. Esto puede ser útil para detectar cambios en el diámetro del conductor, aunque también puede enmascarar otras indicaciones.

➤ Geometría.

Los dos factores principales en la geometría de los componentes que afectan las corrientes parásitas son el espesor y el efecto borde/extremo.

a) Espesor: Los cambios en el espesor del material se pueden deber a la geometría de fabricación o a la corrosión/erosión en servicio. Si el espesor del material es menor que la profundidad efectiva de penetración, cualquier cambio en el espesor del material afectará las corrientes parásitas, esto se puede utilizar con buenos resultados para medir el espesor del material.

b) Efecto de borde/final: Las corrientes parásitas se distorsionan cuando el extremo, o un borde, de una pieza se acerca con la bobina de prueba, ya que las corrientes no tienen lugar para fluir. La distorsión da como resultado una indicación falsa que se conoce como efecto de borde. Sin embargo, cuando se escanea en radios estrechos, se produce el efecto contrario. El efecto de borde también es evidente en la unión de diferentes materiales. Además, dado que, para la bobina de prueba, el borde de la pieza parece una grieta o un agujero muy grande, existe una reacción muy fuerte que enmascara cualquier cambio debido a otros factores. El límite en cuanto a qué tan cerca del borde se puede colocar una bobina está determinado por el tamaño de la bobina y cualquier protección aplicada.

➤ Manejo de la sonda.

En condiciones ideales, la bobina de la sonda se debe poner sobre la superficie de prueba en un ángulo constante a la superficie con elevación y presión constantes. Los cambios en el ángulo de la sonda, la presión de contacto o la forma en que se sujeta la sonda (capacitancia de la mano) provocarán cambios en la señal de la sonda.

En las pruebas no destructivas en las que la mayoría de las inspecciones utilizan el método de bobina de contacto de superficie manual, no se puede dejar de enfatizar la influencia de una mala técnica de manipulación de la sonda. Los efectos del manejo de la sonda se pueden reducir con el uso de sondas especiales cargadas por resorte que mantienen la sonda en un ángulo y presión constante en la superficie. Por lo general, se utilizan cuando el escaneo se va a realizar en superficies planas o donde se toman medidas de conductividad o espesor de pintura. Al escanear cerca de cambios de sección (efecto de geometría), el uso de guías de sonda simples ayudará a un buen manejo de la sonda, lo que dará como resultado una inspección más efectiva.

➤ Discontinuidades.

Las grietas provocan una distorsión del campo de corrientes parásitas debido al hecho de que estas corrientes tienen que fluir a su alrededor. Esto da como resultado una trayectoria de resistencia aumentada y una reducción correspondiente en la fuerza de las corrientes parásitas. De manera similar, la corrosión provoca una mayor resistencia dentro del material con una reducción correspondiente en la fuerza de las corrientes parásitas. En cada caso, se producirá un cambio en la pantalla del medidor o del punto.

Para garantizar que las inspecciones se lleven a cabo con un estándar repetitivo, se utilizan bloques de referencia con defectos artificiales. Estos bloques deben tener una especificación de material similar (aleación, tratamiento térmico, conductividad) al componente bajo prueba. Al configurar el detector de fallas (estandarización) para dar una respuesta conocida del defecto artificial, se puede realizar una inspección repetidamente con el mismo estándar.

Los ajustes de sensibilidad del detector de fallas (estandarización) se deben verificar, a intervalos regulares y como mínimo.

- a) Antes de cada inspección,
- b) Después de cada inspección, y
- c) Al obtener una indicación de falla sospechosa, antes de confirmar una indicación de falla.

Nota: Si se descubre que la configuración del detector de fallas es incorrecta, todos los componentes probados desde que se confirmó la estandarización correcta anterior se deben volver a probar.

## **2. INSTRUMENTACIÓN**

En el siguiente capítulo se definen los diferentes componentes que contiene un equipo de corrientes parásitas y así también la función que cada uno desempeña.

### **2.1. PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS SONDAS DE CORRIENTE INDUCIDAS**

Las sondas de corrientes de Foucault se basan en principios relativamente simples y normalmente consisten en un conjunto que contiene una o más bobinas en una configuración adecuada. La forma de la bobina, su sección transversal, tamaño y configuración son parámetros que se deben tener en consideración para producir una sonda en particular adecuada para una aplicación específica o un intervalo de aplicaciones. Esta bobina es energizada por una corriente alterna de frecuencia y amplitud conocidas que produce lugar al campo magnético que también es de tipo variable. Cuando esta bobina se acerca a un material de prueba conductor, se genera un voltaje inducido en la muestra.

#### **2.1.1. FUNCIÓN DE INDUCCIÓN Y RECEPCIÓN**

Existen dos métodos para detectar cambios en las características de las corrientes parásitas:

a) Método de impedancia.

En el método de impedancia, se monitorea la bobina impulsora. Como los cambios en el voltaje o en la corriente de la bobina, se deben a cambios de impedancia en la bobina, es posible utilizar el método para detectar cualquier parámetro del material que provoque cambios de impedancia.

La impedancia resultante es una suma de la impedancia de la bobina (en el aire) más la impedancia generada por las corrientes parásitas en el material de prueba.

El método de impedancia de las pruebas de corrientes parásitas consiste en monitorear la caída de voltaje a través de una bobina de prueba. La impedancia tiene componentes resistivos e inductivos. La magnitud de la impedancia se calcula a partir de la Ec. 2.1, así:

$$|Z| = [R^2 + X_L^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

donde:

Z es la impedancia

R es la resistencia

X<sub>L</sub> es la reactancia inductiva

La fase de impedancia se calcula como:

$$\theta = \text{Arctan}\left(\frac{X_L}{R}\right) \quad (2.2)$$

donde:

θ es el ángulo de fase.

El voltaje a través de la bobina de prueba es  $V = IZ$ , donde I es la corriente a través de la bobina y Z es la impedancia.

La resistencia de una muestra de prueba al flujo de corrientes parásitas se refleja como una carga resistiva y es equivalente a una resistencia en paralelo a la reactancia inductiva de la bobina. Esta carga produce como resultado un cambio de impedancia resistiva e inductiva en la bobina de prueba. La impedancia de la bobina se puede presentar en diagramas de impedancia normalizados. Con esta visualización se puede analizar el efecto de la muestra y los parámetros de prueba sobre la impedancia de la bobina. La derivación del

circuito equivalente de la impedancia de la bobina es útil para una comprensión cuantitativa del efecto de varios parámetros de prueba.

b) Método de envío y recepción.

El método de envío-recepción consta de una o varias bobinas de activación y una o varias bobinas de captación independientes.

En este caso, se mide el voltaje inducido a través de la bobina captadora. El método de envío-recepción en las pruebas de corrientes inducidas se utiliza para eliminar la variación de temperatura. El flujo de corrientes parásitas se monitorea observando el efecto de sus campos electromagnéticos asociados sobre el voltaje inducido en una bobina o varias bobinas receptoras independientes (ver, Fig. 2.1).

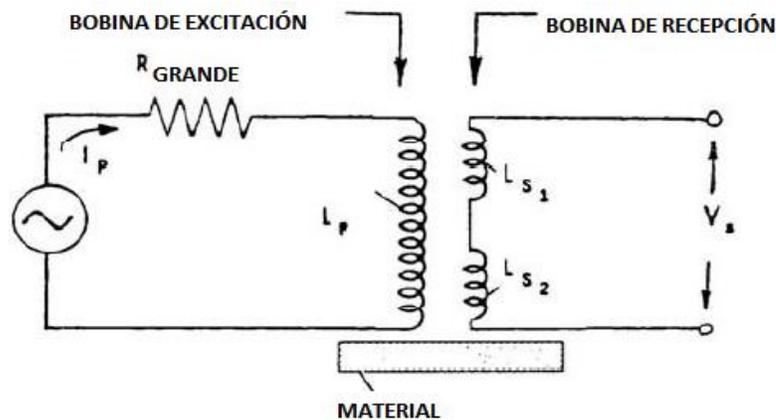


Fig. 2.1. Circuito de envío-recepción.

La bobina de excitación o bobina primaria es impulsada con una corriente sinusoidal con amplitud constante de pico a pico para obtener una fuerza magnetomotriz constante. Como resultado, el flujo de la bobina de excitación es independiente de la resistencia de la bobina.

La resistencia del cable de las bobinas de excitación y del receptor puede cambiar, debido a la temperatura, sin afectar las señales de salida. De este modo se elimina el efecto de la variación de temperatura. La independencia de la temperatura hace que este método sea útil para medir la conductividad, el espesor de la pared y el espacio entre las capas de metal.

## 2.1.2. MEDIDA ABSOLUTA Y DIFERENCIAL

La distinción más básica entre sondas se puede hacer en función de su modo de funcionamiento.

Esto incluye:

- a) Sondas de corrientes inducidas absolutas.
- b) Sondas de corrientes parásitas diferenciales.

Las Sondas de corriente de Foucault absoluta constan de una sola bobina o su equivalente. Un devanado separado en dos o más secciones, aún se consideraría absoluto si funciona como tal. En este tipo de sonda, la impedancia o el voltaje inducido en la bobina se mide directamente (sus valores absolutos en lugar de cambios en la impedancia o voltaje inducido), así en las Figs. 2.2 y 2.3 se presentan sondas de corrientes inducidas absolutas.

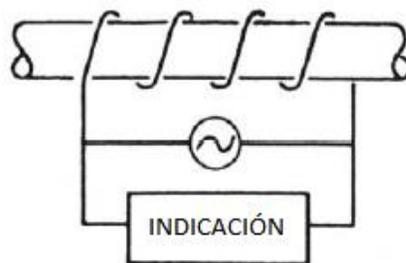


Fig. 2.2. Disposición absoluta de bobina simple.

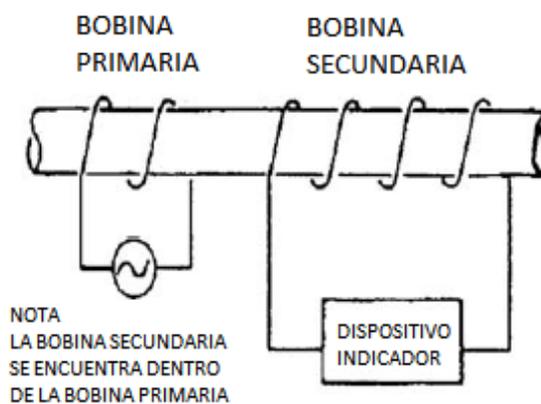


Fig. 2.3. Disposición absoluta de doble bobina.

En la disposición absoluta de bobina simple, se probará solo el área debajo de la bobina y no se comparará con un estándar de referencia (referencia externa). Como se presenta en la Fig. 2.3 para bobinas dobles, la bobina secundaria tiene el dispositivo indicador conectado a través de la bobina y no está conectado a una fuente de CA. Normalmente, la bobina secundaria se encuentra dentro de la bobina primaria y las dos bobinas se denominan bobina doble.

Cuando se utilizan bobinas dobles, la bobina primaria genera o induce corrientes parásitas en el artículo. Las corrientes parásitas, a su vez, generan un campo magnético que reacciona contra el campo de la bobina primaria y también induce una corriente en la bobina secundaria. Los cambios en el flujo de corrientes parásitas se reflejan como cambios en la corriente inducida en la bobina secundaria. Por lo tanto, el dispositivo indicador presenta el cambio en el flujo de corrientes parásitas. La disposición absoluta de doble bobina también se conoce por nombres como sonda captadora del controlador, sonda impulsada por el controlador, sonda de captura de tono y, más comúnmente, sonda de reflexión.

### **Medida diferencial de corrientes parásitas**

Las sondas de corrientes parásitas diferenciales consisten en un par de bobinas conectadas en oposición, de modo que una impedancia neta medida o voltaje inducido se cancela cuando ambas bobinas experimentan condiciones idénticas. Las bobinas solo pueden detectar cambios en el material bajo prueba, por lo que las sondas de corrientes parásitas diferenciales se utilizan para reaccionar a los cambios en los materiales de prueba mientras se cancela el ruido y cualquier señal no deseada que afecte a ambas bobinas. En la Fig. 2.4 se presenta una disposición diferencial típica de autocomparación de una sola bobina y la en la Fig. 2.5 se presenta una disposición diferencial típica de referencia externa de una sola bobina. En Fig. 2.6 se presenta una disposición

típica de diferencial de autocomparación de doble bobina y la Fig. 2.7 se presenta una disposición típica de diferencial de referencia externa de doble bobina.

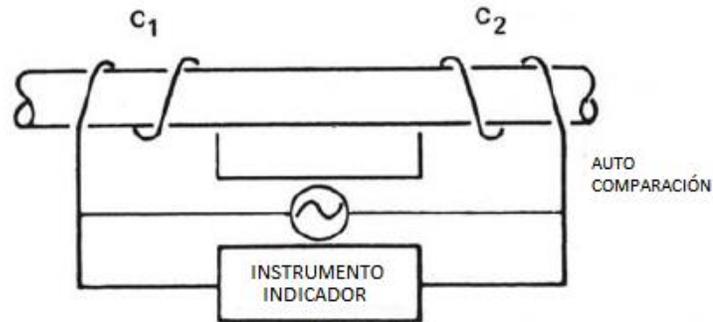


Fig. 2.4. Arreglo diferencial de autocomparación de una sola bobina.

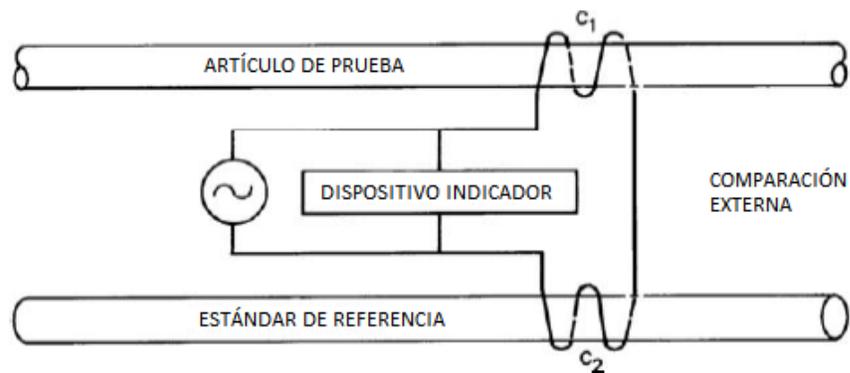


Fig. 2.5. Disposición diferencial de comparación externa de bobina simple.

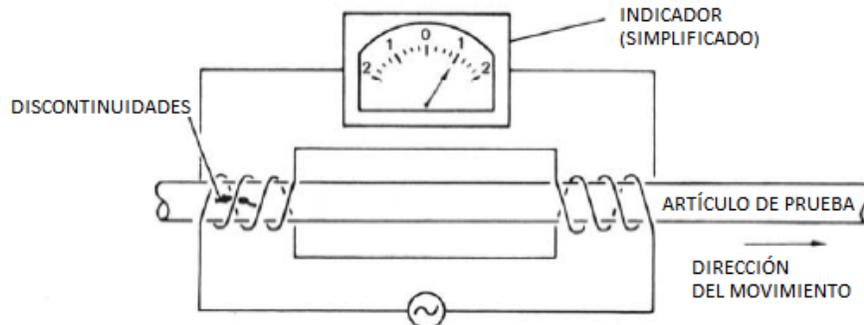


Fig. 2.6. Arreglo diferencial de autocomparación de doble bobina.

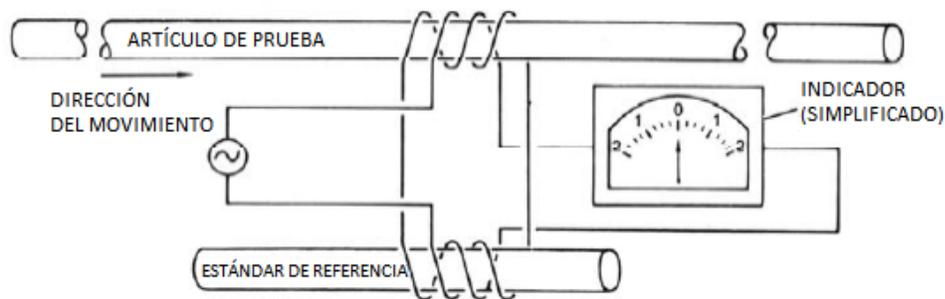


Fig. 2.7. Disposición diferencial de comparación externa de doble bobina.

Tabla 2.1. Comparación entre sondas absolutas y diferenciales.

Sondas absolutas	Sondas diferenciales
1) Sensibles a cambios tanto repentinos como graduales en propiedades y dimensiones.	1) No son sensibles a los cambios graduales en las propiedades de las dimensiones (puede que no sientan fallas graduales largas).
2) Las señales combinadas suelen ser fáciles de interpretar.	2) Las señales pueden ser difíciles de interpretar.
3) Presentan la longitud total de los defectos.	3) Detectan solo los extremos de los defectos largos.
4) Sensibles a la deriva de los cambios de temperatura.	4) No son sensibles a la deriva de los cambios de temperatura.
5) Sensibles a la oscilación de la sonda.	5) Menos sensible a la oscilación de la sonda

### 2.1.3. TIPOS DE SONDAS

Las sondas de corrientes parásitas pueden tener una variedad de formas. Así, la elección del tipo depende de la situación de la prueba. A continuación, se presentan los tres tipos principales de sondas que se utilizan principalmente en las pruebas de corrientes inducidas:

#### a) Sonda interna (tipo bobina).

Las sondas internas consisten en bobinas circulares que se utilizan para probar el interior de tubos o agujeros circulares. En la Fig. 2.8 se presenta un tipo de bobina que se puede insertar en un tubo para inspeccionar las discontinuidades en la circunferencia interior del tubo. Al igual que con la bobina circundante, la bobina interna induce corrientes que rodean toda la circunferencia del tubo de modo que se inspecciona toda la sección que rodea la bobina.

Como las corrientes inducidas en el material son más fuertes cerca de la bobina, la bobina interna es más sensible a los defectos que se encuentran en o cerca de la superficie interna del tubo.

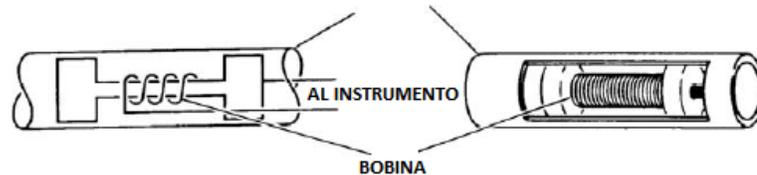


Fig. 2.8. Bobina Interna.

b) Sondas envolventes.

Las sondas envolventes son similares en estructura a las sondas internas excepto por el hecho de que el material de prueba pasa por el interior de las bobinas. Se utilizan principalmente para inspeccionar la superficie exterior de materiales redondos como tubos y varillas. En la Fig. 2.9 se presenta una bobina circundante. El campo magnético induce corrientes parásitas en la barra que rodean toda la circunferencia del tubo o varilla de modo que se inspecciona toda la sección debajo de la bobina, en cualquier caso.

El ancho de la bobina es función de la aplicación. Las bobinas anchas cubren grandes áreas, por lo que responden principalmente a efectos de volumen, mientras que las bobinas estrechas detectan áreas pequeñas y, por lo tanto, responden mejor a pequeños cambios como los producidos por discontinuidades. El campo magnético de la bobina se extiende ligeramente más allá de los extremos de la bobina.

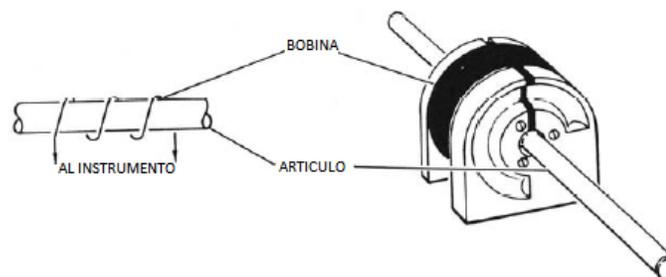


Fig. 2.9. Bobina Circundante.

c) Sondas de superficie.

Las sondas de superficie son una de las sondas de corrientes parásitas más utilizadas para inspeccionar superficies, planas o contorneadas, en busca de defectos o propiedades del material. Los defectos pueden ser superficiales o subterráneos.

En la Fig. 2.10 se presenta una bobina de sonda de superficie típica. La sonda de superficie se puede sostener con la mano o montar en un equipo de escaneo automatizado. La bobina montada en el extremo de la sonda está provista de una capa protectora de resina epóxica que sirve como superficie de desgaste. El campo magnético producido por una bobina es aproximadamente del tamaño de la bobina. Otras variaciones de los diseños de sondas de superficie son la sonda tipo panqueque, la sonda plana, la sonda de herradura o de espacio, la sonda giratoria con resorte y la sonda tipo lápiz.

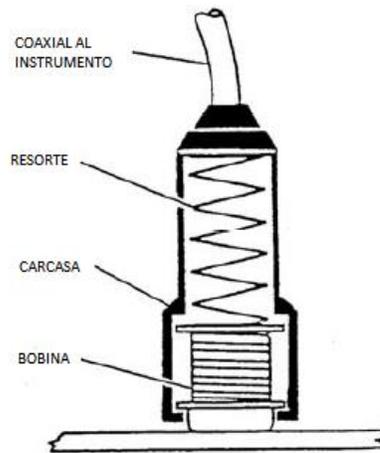


Fig. 2.10. Sonda de superficie típica.

## 2.2. DISTRIBUCIÓN DE LAS CORRIENTES DE FOUCAULT EN RELACIÓN CON LA POSICIÓN DE LA BOBINA

En el siguiente apartado se presenta las distribuciones que pueden sufrir la corriente con relación a los diferentes campos magnéticos que genera la bobina.

### 2.2.1. CAMPO GENERADO POR BOBINA INDUCTORA SIN CARGA

En el caso de un conductor largo y recto que transporta corriente, existen líneas de fuerzas magnéticas (o flujo) que son trayectorias circulares cerradas concéntricas con el eje del conductor.

La permeabilidad relativa del aire y los materiales no magnéticos para todos los fines prácticos se considera uno (1). En el caso de materiales ferromagnéticos, la permeabilidad relativa no es constante, sino que es función de la densidad de flujo. Sin embargo, para la sonda de corriente parásita energizada por bajos niveles de magnetización, la permeabilidad se puede considerar razonablemente constante. Ahora, cuando el cable recto se enrolla en una bobina (muchos bucles de cable), las líneas de la fuerza que rodean el cable forman un campo magnético dentro y fuera del bucle, tal como se presenta en la Fig. 2.11.

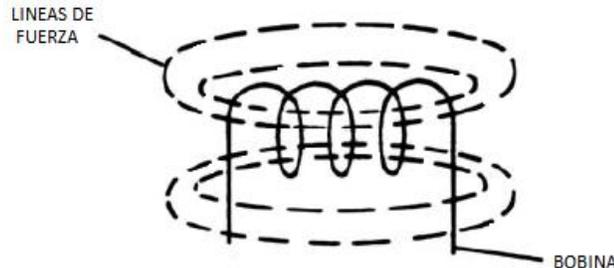


Fig. 2.11. Campo magnético de una bobina.

El campo así creado es similar al campo de una barra magnética. La fuerza de este campo depende de dos factores: el número de vueltas en la bobina y la magnitud de la corriente.

La intensidad de campo ( $H_z$ ) a lo largo del eje de una bobina portadora de corriente de radio  $r$  metros en un punto  $z$  metros del centro, y que tiene  $N$  vueltas, está dada por la Ec. 2.3, así:

$$H_z = \frac{NIr^2}{2\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} \quad (2.3)$$

donde:

$H_z$  es la intensidad de campo,

$r$  es el radio de la bobina,

$N$  es el número de vueltas,

$I$  es la corriente

$z$  es la distancia desde el centro.

### **2.2.2. TRAYECTORIA DE LAS CORRIENTES PARÁSITAS EN UNA PIEZA SEGÚN SU POSICIÓN CON RESPECTO A LA BOBINA DEL INDUCTOR**

Las corrientes parásitas son bucles cerrados de corrientes inducidas que circulan en un plano perpendicular a la dirección del flujo magnético. Su dirección normal de viaje es paralela al devanado de la bobina y paralela a la superficie. El flujo de corrientes de Foucault se limita al área del campo magnético inductor.

Para la detección de fallas es esencial que el flujo de corrientes parásitas sea perpendicular a la grieta para obtener la máxima respuesta. Si el flujo de las corrientes parásitas es paralelo al defecto, no habrá interrupción de la corriente y, por lo tanto, no habrá cambios en la impedancia de la bobina. En la Fig. 2.12 se presenta la sensibilidad de una sonda de superficie a las discontinuidades relativas a su posición en la probeta.

Una sonda de superficie como la del tipo panqueque tendrá poca sensibilidad a las delaminaciones, la unión de revestimientos y las discontinuidades que se encuentran paralelas a la superficie de la muestra de prueba.

Para defectos que se encuentran paralelos al devanado de la bobina, una sonda en herradura (en forma de U) con un espacio amplio puede tener una sensibilidad razonable. Una sonda utiliza material ferromagnético para dar forma al campo magnético. El campo está confinado por el núcleo, lo que provoca que

las corrientes parásitas fluyen en bucles circulares perpendiculares a las líneas de flujo.

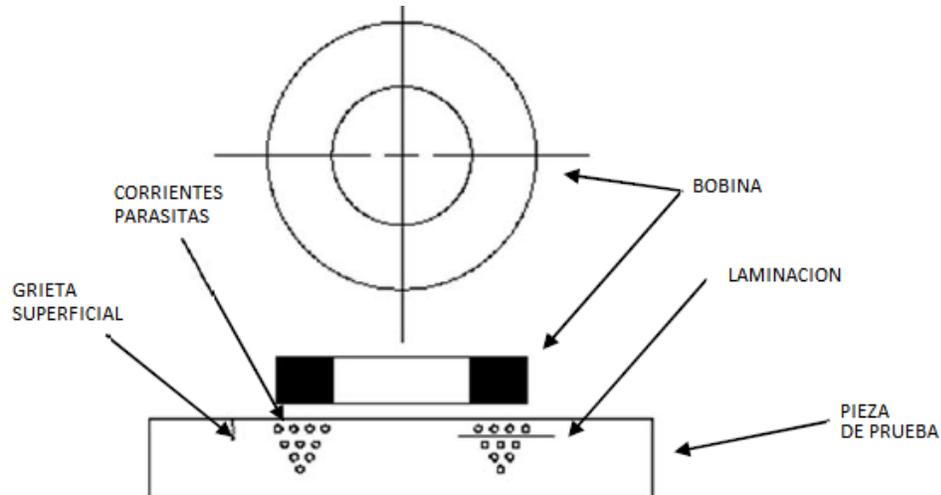


Fig. 2.12. Propiedades direccionales de una sonda de superficie.

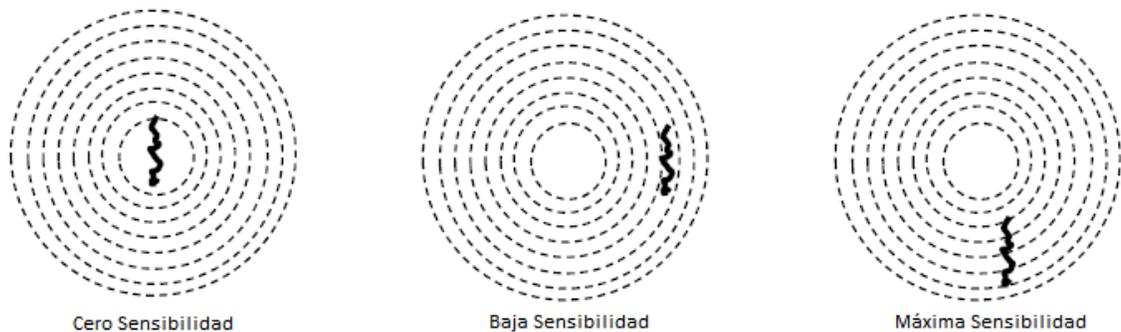


Fig. 2.13. Propiedades direccionales de una sonda de superficie para un tamaño de grieta determinado.

### 2.2.3. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA EN EL ACOPLAMIENTO EN VARIAS FORMAS

Muchos sistemas prácticos de prueba de corrientes parásitas están dispuestos con cierto espacio entre la bobina y el material de prueba para que los objetos de prueba se puedan manipular y mover dentro de los campos de la bobina. Sin embargo, los efectos de dicho espaciado sobre la reactancia y las corrientes parásitas inducidas son importantes y se deben tener en

consideración al diseñar las sondas. Para bobinas de superficie o bobinas de alimentación a través de bobinas, el efecto del espaciado afecta de alguna manera al acoplamiento entre el campo de la bobina y el material bajo prueba.

Cuando una bobina de corriente parásita se separa de la superficie del material conductor no magnético a cierta distancia, una parte del flujo magnético creado por la corriente de la bobina de prueba no alcanza el material de prueba. Si la bobina se eleva tanto por encima de la superficie del material que ninguna de sus líneas de flujo magnético alcanza el material de prueba, la bobina presenta su reactancia inductiva de bobina vacía. Este es el valor más alto que se puede obtener durante las pruebas de materiales no magnéticos. Si la bobina se acerca a la superficie del material de prueba, más de sus líneas de flujo magnético interceptan el material de prueba induciendo corrientes parásitas que se oponen a un cambio en el campo magnético de la bobina. A medida que aumenta la intensidad del campo de reacción de las corrientes parásitas, se reduce el enlace de flujo magnético total con la bobina de excitación.

A medida que aumenta el campo de reacción de las corrientes parásitas con la proximidad cercana de la bobina a la superficie del material de prueba, la inductancia de la bobina y la reactancia inductiva se reducen. El límite de esta reducción se alcanza cuando la cara del conjunto de la bobina se coloca en contacto firme con la superficie del material de prueba.

La sensibilidad de la prueba de corrientes parásitas a las propiedades del material es mayor cuando se maximizan las pérdidas de resistencia por corrientes parásitas. La máxima sensibilidad de la sonda se alcanza cuando la bobina está en contacto directo con la superficie plana de un material de prueba no magnético. El aumento del despegue siempre reduce la sensibilidad de las pruebas de corrientes inducidas.

#### 2.2.4. MÉTODO DE ENFOQUE

Se requiere el blindaje de las corrientes parásitas para fines de enfoque, es decir, una mayor parte del flujo disponible se puede concentrar debajo de la sonda. El uso de sondas de corrientes parásitas blindadas también puede ser necesario para evitar que el campo generado por la sonda interactúe con ciertos objetos en las proximidades de la sonda. La principal preocupación es la interacción con los cuerpos conductores y magnéticos que no forman parte de la prueba, no obstante, se encuentran muy cerca y pueden producir indicaciones falsas o enmascarar la señal de las discontinuidades en la vecindad. La prueba de discontinuidades cerca de los bordes (como la prueba de los orificios de los sujetadores) es un ejemplo. El blindaje de las sondas de corrientes parásitas se puede realizar de tres formas:

- ✓ Blindaje magnético
- ✓ Blindaje activo
- ✓ Blindaje de corrientes de Foucault.

El blindaje magnético se logra creando una ruta de baja reluctancia para las líneas de campo dentro del área requerida y lejos de la región no deseada. Se podría construir una sonda blindada muy simple cubriendo la bobina (sin o con un núcleo de ferrita) usando un manguito de material de alta permeabilidad y baja conductividad como la ferrita. En el apantallamiento activo se emplea la generación de un campo activo mediante una bobina o sistema de bobinas para cancelar parte del campo original en un área específica. El blindaje de corrientes de Foucault emplea el efecto piel para evitar que el campo magnético se extienda hasta su límite normal. En este caso, el blindaje se logra mediante la atenuación en lugar de cambiar la trayectoria magnética.

## 2.3. REACCIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE SONDAS SEGÚN EL DISEÑO DE LA BOBINA

En el siguiente apartado se mencionan las diferentes reacciones de las bobinas a los diferentes defectos que podemos encontrar en las piezas a ensayar.

### 2.3.1. REACCIÓN A PEQUEÑOS DEFECTOS

El flujo de corrientes parásitas está limitado al área del campo magnético inductor que es una función de la geometría y del diseño de la bobina (el uso de blindaje y núcleos tiene un efecto significativo en la magnitud resultante del campo de corrientes parásitas). La sensibilidad al defecto es proporcional a la magnitud del campo en una sonda de superficie y al ancho del espacio en una sonda de herradura. Como regla general, el diámetro del campo debe ser igual o menor que la longitud esperada del defecto. El efecto del diámetro de la sonda y la longitud del defecto se presentan en la Figs. 2.14 - 2.15, respectivamente. En la curva se puede ver que cuando la longitud del defecto es igual al diámetro de la sonda, la amplitud de la señal varía de un tercio a dos tercios de amplitud para una grieta infinitamente larga.

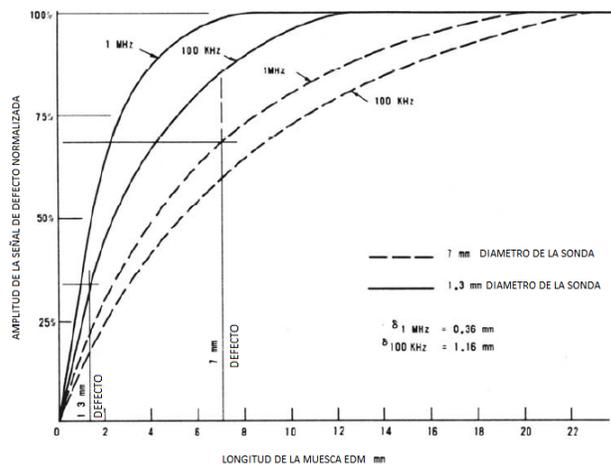


Fig. 2.14. Efecto de la longitud de defecto.

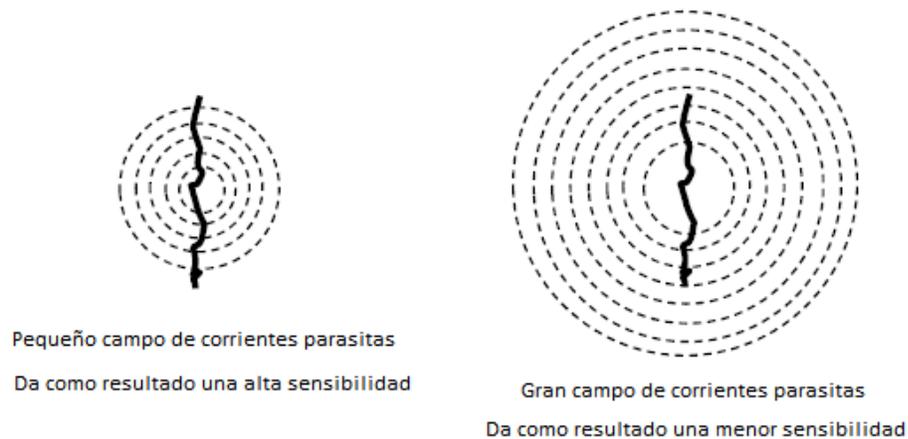


Fig. 2.15 Efecto del diámetro de la sonda.

### 2.3.2. REACCIÓN A DEFECTOS PROLONGADOS

La magnitud de la indicación causada por una discontinuidad depende principalmente de la cantidad de corriente interrumpida por la discontinuidad. La profundidad, la anchura y la longitud de la discontinuidad determinan el cambio de indicación. En el caso de configuraciones de bobinas absolutas (bobina simple o doble), el sistema responde tanto a cambios repentinos como también a graduales en propiedades y dimensiones.

En el caso de la disposición de la bobina diferencial, siempre que no haya diferencia debajo de las bobinas, no se tienen indicación en el sistema indicador, no obstante, cuando se localiza una discontinuidad debajo de cualquiera de las bobinas, se produce un desequilibrio que es indicado por el instrumento.

### 2.3.3. REACCIÓN A DEFECTOS CONTINUOS

En el caso de una bobina absoluta, un defecto continuo producirá una indicación continua. En el caso de bobinas diferenciales, no habrá indicación del defecto si el defecto es continuo de un extremo al otro en una muestra de prueba.

## **2.4. TECNOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS PRÁCTICAS DE LAS SONDAS.**

El siguiente apartado se expone los parámetros que se tiene de diseño y fabricación de las diferentes sondas que corresponden a los equipos de corrientes parásitas.

### **2.4.1. TECNOLOGÍA DE DISEÑO**

Las sondas de corrientes de Foucault se fundamentan en principios relativamente simples y constan de una o más bobinas en una configuración determinada. Los transductores prácticos de corrientes parásitas pueden variar desde pequeñas bobinas de menos de 2.5 mm (0.1 pulg) hasta más de 300 mm (12 pulg) de diámetro, pueden ser largos o cortos y pueden tener una sección transversal cuadrada, redonda o elíptica, con núcleos y/o escudos no magnéticos. Las herramientas de diseño básicas para estas variaciones siguen siendo las mismas y se basan en los siguientes parámetros principales:

- 1) Inductancia de la bobina,
- 2) Resistencia de la bobina,
- 3) Distribución de campo en el espacio,
- 4) Respuesta de la bobina a cambios relevantes en las propiedades materiales,
- 5) Características de despegue, y
- 6) Respuesta a una muesca, agujero perforado u otra discontinuidad simulada.

Además, el diseño se puede ver influenciado por otras restricciones intrínsecas al entorno de prueba (formas o tamaños especiales) o requeridas por la técnica de prueba (fuerza de la fuente, adaptación de impedancia, etc.) y estas complican el proceso. Algunos de los parámetros son:

- 1) Especificaciones de la fuente (fuerza, frecuencia y configuración),
- 2) Campo mínimo / máximo requerido o permitido,
- 3) Impedancia requerida de la sonda, y
- 4) Formas y dimensiones especiales de la bobina y el patrón de campo.

Es importante destacar que algunos de estos requisitos pueden ser contradictorios. Por lo tanto, el diseño debe ser flexible y fundamentado en algún tipo de proceso iterativo o ajustable.

#### **2.4.2. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN**

Las sondas de corrientes de Foucault se diseñan y fabrican en consecuencia para tener la mayor sensibilidad y resolución a las discontinuidades. Los factores dimensionales y los parámetros eléctricos se consideran en el momento del diseño para la consecuente fabricación de una sonda en particular. El alambre aislado de cobre se enrolla sobre la bobina del tamaño y forma deseados. Cada uno de los factores reconocidos como factores dimensionales, como el espacio entre la bobina de prueba y el material, la profundidad de penetración de la corriente parásita producida por la bobina y el tamaño y la forma de la bobina, afectan las corrientes parásitas inducidas en el material y, por lo tanto, afectan las lecturas obtenidas durante la prueba. El factor de despegue y llenado son aspectos bidimensionales a tener en consideración cuando se fabrican las sondas.

Es necesario mantener fijo el espacio entre la sonda y el material para obtener resultados consistentes. Además, el efecto de despegue es tan pronunciado que pequeñas variaciones en el espaciado pueden enmascarar muchas indicaciones. Para garantizar que se aplique una presión constante en todo momento para evitar la separación (despegue) de la bobina, ésta se puede montar en una carcasa cargada por resorte. Una sonda de superficie se puede llevar a mano o montar en un equipo de escaneo automatizado.

Si la prueba de corrientes parásitas requiere un gran despegue de la sonda (como con los sistemas de bobinas en órbita que proporcionan un espacio adecuado para mover materiales de prueba), puede ser necesario usar un devanado de bobina de mayor diámetro que el que se usaría durante las pruebas de contacto. La gran bobina de excitación puede proyectar un campo

razonablemente fuerte al material de prueba y garantizar niveles de señal adecuados. Sin embargo, el área del material de prueba inspeccionada por bobinas grandes, en cualquier instante, aumenta en proporción al diámetro de la bobina. Esto reducirá la sensibilidad de la prueba a pequeñas discontinuidades, como grietas con longitudes de solo una fracción del diámetro de la bobina. Sin embargo, para detectar discontinuidades o variaciones de propiedades en el material de prueba, es esencial proporcionar intensidades de campo adecuadas para inducir corrientes parásitas con efectos de reacción detectables. Esto se puede hacer aumentando la potencia motriz a la bobina. Esto se puede lograr aumentando la corriente o el número de vueltas de la bobina.

### **2.4.3. PARÁMETROS ELÉCTRICOS**

El propósito principal de la sonda de corrientes parásitas es inducir corrientes parásitas en el objeto de prueba y recibir el cambio en su valor debido a variaciones en las propiedades del material (presencia de discontinuidades, variaciones de conductividad y variaciones dimensionales, etc.). La sonda recibe una excitación de corriente alterna de frecuencia conocida y amplitud constante del equipo y esto ayuda a generar un campo magnético de la fuerza deseada para la posterior inducción de corrientes parásitas en el material. Los parámetros como el valor de inductancia de la bobina, la selección de la frecuencia, el modo de funcionamiento (absoluto o diferencial) y el tipo de sonda (bobina simple o doble) son consideraciones importantes relacionadas con las sondas. De manera similar, se debe tener en consideración la extensión del campo, ya que está relacionada de alguna manera con la sensibilidad de la inspección.

#### **2.4.4. MANTENIMIENTO**

La sonda es un componente esencial y vital de cualquier sistema de prueba de corrientes parásitas y, como tal, se debe cuidar y manipular adecuadamente para evitar cualquier posible daño durante el uso.

Se debe tener muy en consideración el conocimiento de los parámetros de diseño como el material de uso utilizado, la temperatura deseada, la situación del ambiente de trabajo y la estabilidad (estrés mecánico, etc.) para un mejor uso y mantenimiento de la sonda en un orden. El desgaste normalmente se puede reducir mediante la selección de compuestos plásticos resistentes al desgaste, como la cinta de teflón. Donde se espera un desgaste severo, los soportes de la sonda están diseñados para proporcionar un despegue constante.

La estabilidad de la temperatura se puede lograr utilizando material de soporte de bobina con características de transferencia de calor deficientes en lugar de metal. La mayoría de los alambres de cobre disponibles comercialmente se pueden usar para temperaturas entre 150 y 200 °C. Para temperaturas más altas, es posible que se deba usar aislamiento de silicona para bobinas enrolladas de plata o aluminio. Los materiales deben ser químicamente compatibles con el objeto de prueba. La estabilidad mecánica y eléctrica de la bobina de prueba se puede mejorar mediante la aplicación de resina epóxica entre cada capa del devanado de la bobina.

#### **2.5. FUNCIÓN PRINCIPAL Y AJUSTE DEL EQUIPO**

Generalmente, un instrumento de corrientes parásitas consta de un oscilador, un amplificador, una balanza, un filtro, una rotación de fase, un medidor de Corriente Continua o un monitor X-Y. Un instrumento típico de corrientes parásitas se presenta en la Fig. 2.16.

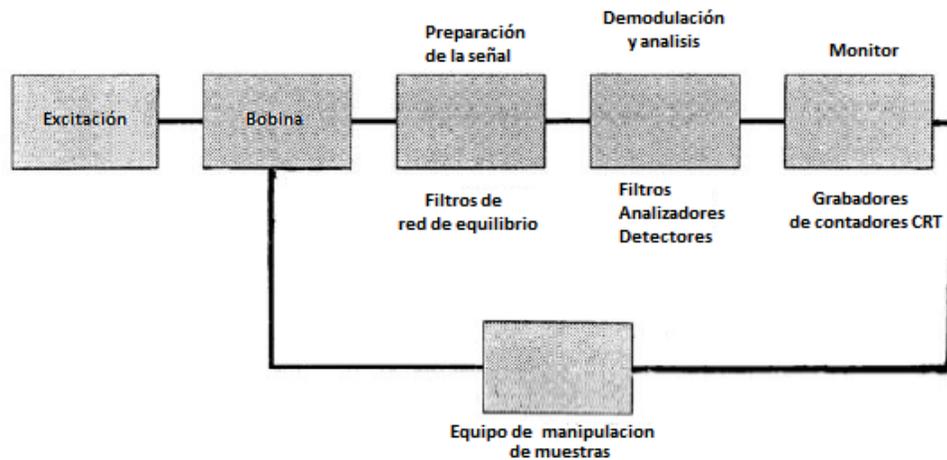


Fig. 2.16. Diagrama de bloques del instrumento de corrientes parásitas.

### 2.5.1. OSCILADOR

Un oscilador genera una corriente sinusoidal a una frecuencia específica que pasa a través de las bobinas de prueba. Puede ser un generador de ondas sinusoidales de frecuencia única y un amplificador de potencia, un generador de ondas sinusoidales de frecuencia múltiple y amplificadores de potencia o un generador de pulsos que entregue la forma de onda de pulso deseada. También puede ser un oscilador autoexcitado cuyo comportamiento se rige por la impedancia de la bobina. El oscilador debe ser capaz de generar una corriente sinusoidal variable en el tiempo a frecuencias que oscilan típicamente entre  $<1$  y 6,000 kHz.

### 2.5.2. DISPOSITIVO DE ENERGIZACIÓN

La bobina de la sonda utilizada como dispositivo energizante es un alambre de cobre aislado enrollado en un formador adecuado. Establece un acoplamiento esencial entre el equipo de corrientes parásitas y el material bajo prueba. La corriente de excitación en la bobina es alimentada por el generador o

el oscilador de la unidad, que a su vez se convierte en la base de la inducción de las corrientes parásitas en la muestra. Se utilizan diferentes tipos de sondas en diversas disposiciones para lograr el propósito específico. La mayoría de los instrumentos de corrientes parásitas utilizan un puente de CA para detectar ligeros cambios de impedancia entre las bobinas o entre una sola bobina y la impedancia de referencia. La mayoría de los instrumentos pueden funcionar con impedancias de sonda entre 10 y 200 ohmios.

### **2.5.3. SISTEMA DE MEDICIÓN**

La impedancia (o voltaje) de la sonda cambia solo levemente cuando la sonda pasa por un defecto, generalmente menos del 1%. Este pequeño cambio es difícil de detectar midiendo la impedancia absoluta o el voltaje. Así, se han desarrollado instrumentos especiales que incorporan varios métodos para detectar y amplificar pequeños cambios de impedancia.

El puente de CA, una vez equilibrado, la presencia de un defecto en las proximidades de una bobina crea una pequeña señal desequilibrada que luego se amplifica. Dado que la señal de voltaje de desequilibrio sinusoidal es demasiado difícil e ineficiente de analizar, se convierte en una señal de corriente continua (CC) que retiene las características de amplitud y fase de la señal de CA. Esto normalmente se logra resolviendo la señal de CA en componentes en cuadratura y luego rectificándolos manteniendo la polaridad apropiada. En los instrumentos de propósito general, estas señales se presentan normalmente en monitores X-Y. Algunos detectores de grietas tienen un medidor para presentar solo el cambio en la amplitud del voltaje.

## 2.5.4. EQUILIBRIO

La impedancia de la bobina normalmente se equilibra mediante un circuito de puente de CA. Un circuito de puente común se presenta en forma general en la Fig. 2.17. Los brazos del puente se indican como impedancia de tipo no especificado. El detector está representado por un voltímetro. El equilibrio se asegura mediante ajustes de uno o más de los brazos del puente. El equilibrio se indica mediante la respuesta cero del detector, lo que significa que los puntos B y C están al mismo potencial (tienen el mismo voltaje instantáneo). La corriente fluirá a través del detector (voltímetro) si los puntos B y C en los brazos del puente están en diferentes niveles de voltaje. La corriente puede fluir en cualquier dirección dependiendo de si B o C tienen un potencial más alto.

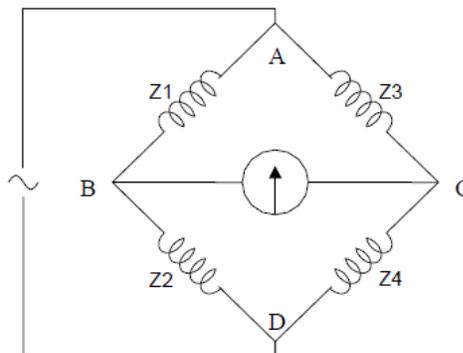


Fig. 2.17. Circuito de puente común.

Si el puente está constituido por cuatro brazos de impedancia, con componentes inductivos y resistivos, el voltaje de A-B-D debe ser igual al voltaje de A-C-D tanto en amplitud como también en fase para que el puente esté equilibrado.

En equilibrio:

$$I_1 Z_1 = I_2 Z_2 \quad y \quad I_1 Z_3 = I_2 Z_4.$$

Así de las igualdades anteriores se obtiene la Ec. 2.4, la cual se expresa como:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2.4)$$

La Ec. 2.4 establece que la relación de impedancia del par de rms adyacentes debe ser igual a la relación de impedancia del otro par de brazos adyacentes para el equilibrio del puente. En un circuito puente típico en instrumentos de corrientes inducidas tal como se presenta en la Fig. 2.18, las bobinas de la sonda se colocan en paralelo a las resistencias variables. El equilibrio se logra al variar estas resistencias hasta que se logre la condición de equilibrio o nulo.

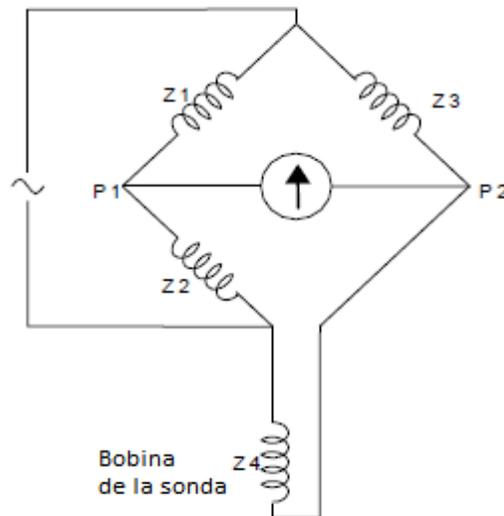


Fig. 2.18. Arreglo de prueba común.

### 2.5.5. AMPLIFICADOR Y FILTRO

Los amplificadores de señales electrónicas en los equipos de prueba de corrientes parásitas varían mucho en sus requisitos de diseño, dependiendo de dónde se encuentren en la cadena de señales. Se deben adaptar a frecuencias que van desde frecuencias portadoras tan altas como el intervalo MegaHertz hasta señales de modulación anómala que pueden descender a CC. El intervalo

dinámico de las señales que se amplificarán puede variar desde microvoltios en la sonda hasta decenas de voltios para su visualización.

Por lo tanto, la amplificación de la señal desarrollada a través del puente requiere el uso de un amplificador diferencial. Tal amplificador produce una salida proporcional a la diferencia entre las señales en sus terminales de entrada. También es posible utilizar un elemento de aislamiento, como un transformador, para convertir la señal diferencial en una única señal con referencia a tierra y de lo que se puede utilizar un amplificador ordinario de un solo extremo. La salida del primer amplificador diferencial se puede tomar como de un solo extremo y las etapas de amplificación posteriores suelen ser de un solo extremo.

En un instrumento de propósito general, la amplitud de la señal de salida del puente es controlada por el control GAIN. En algunos instrumentos se etiqueta como SENSIBILIDAD. Controla el amplificador de la señal de salida del puente.

La pre-amplificación es una técnica comúnmente utilizada para aumentar la sensibilidad de la inspección al proporcionar un mayor voltaje de activación de la sonda.

Existen muchas situaciones que requieren el uso de una red de filtros para modificar un voltaje o corriente que varía con el tiempo. Los filtros se utilizan para eliminar todas las variaciones de tiempo de un voltaje, para seleccionar solo una banda estrecha de frecuencias sinusoidales de un voltaje variable en el tiempo, o para seleccionar todas las frecuencias por encima o por debajo de un valor dado. Un caso simple es el de obtener un voltaje constante a partir de un voltaje CA rectificado. Se usa un circuito de filtro con un rectificador para suavizar las variaciones de voltaje en el tiempo en cualquier extensión que se requiera en la aplicación.

### **2.5.6. DESMODULACIÓN**

Después de que la señal del transductor se amplifica a un nivel adecuado, se debe procesar para extraer la modulación impresa en ella por las

discontinuidades de la parte de prueba. Esto requiere demodulación mediante un circuito detector. El tipo más simple es un detector de amplitud o envolvente que consta de un diodo y un filtro de paso bajo o, a veces, un detector de picos. Tal detector produce una salida proporcional a la amplitud de la señal, no obstante, independiente de su ángulo de fase.

Se utiliza un detector sensible a la fase para recuperar la información contenida en el ángulo de fase eléctrica de la señal. El diseño del detector y la selección de amplificación antes y después de la detección está influenciado por varias consideraciones de diseño. Entre ellos se encuentran los requisitos de linealidad, respuesta transitoria (u overdrive), nivel de ruido y control de la señal de salida.

### **2.5.7. PANTALLA**

Cuando una indicación de prueba de corrientes parásitas es pequeña, es posible que se requieran pantallas más que un simple medidor. Una presentación de pantalla X-Y permite un examen detallado de la respuesta de una prueba para que una operación pueda detectar indicaciones de señales sutiles. Son posibles varios formatos de señales de pantalla con selección según la naturaleza y el propósito de la prueba, así:

- ✓ Método de visualización de elipse (histórico). En la pantalla de elipse, la salida de voltaje CA amplificada de la bobina de prueba se aplica directamente a la pantalla sin un detector. La señal horizontal no es una forma de onda de barrido en diente de sierra, sino una señal sinusoidal derivada de la portadora. Se pueden determinar varias propiedades del objeto de prueba, como variaciones en las dimensiones, conductividad eléctrica (relacionada con la aleación), permeabilidad (relacionada con la estructura de los aceros) o grietas en la superficie, a partir de las formas de los patrones de pantalla presentados por los instrumentos de prueba de elipse.

- ✓ Método de visualización de base de tiempo lineal (histórico). El método de base de tiempo lineal utiliza un barrido horizontal lineal que tiene aproximadamente un ciclo de duración de la frecuencia de las corrientes parásitas. Esto produce como resultado una pantalla que presenta un solo ciclo de la frecuencia de las corrientes parásitas. La pantalla no presenta una señal desmodulada, no obstante, presenta la portadora amplificada directamente. Este tipo de visualización es bastante similar a la visualización de elipse. La única diferencia es que en una pantalla de elipse se usa una onda sinusoidal para la deflexión horizontal en lugar de la forma de onda en forma de diente de sierra.
- ✓ Visualización del plano de impedancia (método de puntos vectoriales). Si se desea una visualización de las relaciones de fase de los voltajes del transductor, una visualización x-y proporciona la representación más completa y fácil de comprender de los voltajes en una forma conocida como plano de impedancia, punto volador, punto vectorial o visualización de fase. En este tipo de visualización, la posición de las indicaciones en la pantalla de visualización se hace para representar la impedancia compleja del puente de la sonda resuelta en ejes reales e imaginarios. La amplitud de la señal está representada por su distancia desde un punto balanceado. El ángulo de fase eléctrica está representado por el ángulo geométrico con respecto al punto de equilibrio.

Un oscilador alimenta el puente de la sonda y el voltaje de salida del puente se combina con una señal de supresión portadora. Esto permite al operador de la prueba mover el campo de visión en la pantalla a cualquier punto del plano de impedancia. Un control permite el movimiento en la dirección imaginaria (dirección de reactancia en el plano de impedancia). El otro control permite el movimiento en la dirección real (dirección de la resistencia en el plano de impedancia). El resultado es análogo a mover el campo de visión de un microscopio operando la pletina mecánica que lleva el objeto bajo inspección. Los controles de supresión de portadora obtienen sus señales de excitación de una red de desplazamiento de fase conectada al oscilador de portadora. El

amplificador portador aumenta el voltaje de la señal balanceada del transductor. Su función es análoga al ajuste de aumento de un microscopio.

Con aumentos muy altos, solo se presenta en la pantalla una parte muy pequeña del plano de impedancia. La señal de salida del amplificador se aplica a un par de detectores de fase y luego a los amplificadores horizontales y verticales que controlan la pantalla. Las salidas del detector de fase corresponden a componentes de la señal de prueba de corrientes parásitas que se encuentran en una dirección específica en el plano de impedancia. Los detectores de fase reciben su señal de referencia de las variables en fase con respecto al portador (en el intervalo de 0 a 360°), no obstante, siempre están separados 90° entre sí. El canal vertical contiene entonces componentes de señal en la dirección perpendicular (en el plano de impedancia) a la dirección seleccionada para el canal horizontal.

Así, algunos de los conceptos básicos del plano de impedancia son:

- ✓ Efecto de la frecuencia. En la Fig. 2.19 los puntos A, B, C, D y E en el plano de impedancia real representan un aumento de la impedancia de la bobina ( $X_L$ ) debido al aumento de la frecuencia (puntos de aire). Desde cada uno de estos puntos, la flecha representa el valor de impedancia de las corrientes parásitas, cada uno aumentando en amplitud con la frecuencia. La curva de los loci de estos valores representa los puntos de equilibrio que cambian con la frecuencia creciente. Como  $X_L = 2\pi f_l$ , la reactancia inductiva de la bobina y la reactancia inductiva de las corrientes parásitas aumentan con la frecuencia. Sin embargo, el aumento de frecuencia aumenta la inductancia de la bobina en el aire ( $L_o$ ) en una cantidad mayor. Al dividir la reactancia inductiva de las bobinas en el aire por  $L_o$ , el punto de aire permanece en la unidad y el aumento correspondiente en la impedancia de las corrientes parásitas debido al cambio de frecuencia hace que el punto en el diagrama se mueva hacia abajo de la curva en relación con el punto de aire fijo (normalizado) tal como se presenta en el diagrama plano de impedancia normalizado de la derecha (ver, Fig. 2.20).

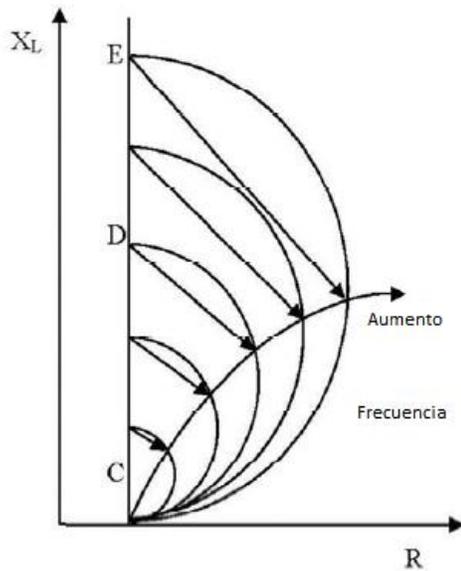


Fig. 2.19. Efecto de la frecuencia en la curva no normalizada.

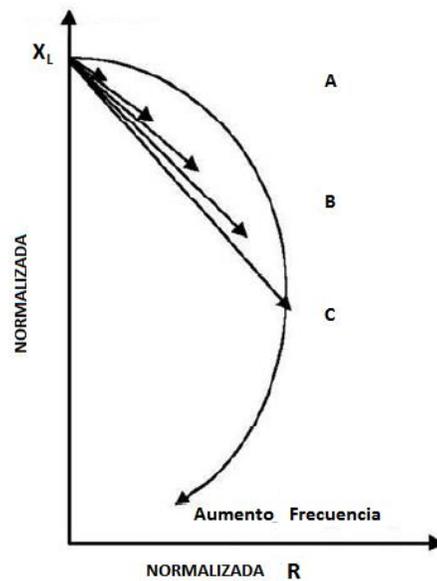


Fig. 2.20. Efecto de la frecuencia en la curva normalizada.

- ✓ Efecto de la conductividad. Tal como se presenta en las Figs. 2.19 - 2.20 la colocación de la sonda sobre un material conductor produce que el punto se mueva debido al efecto de las corrientes parásitas en el circuito de la bobina. Al colocar la sonda en una variedad de materiales de diferentes conductividades, se puede observar una variedad de posiciones de puntos diferentes. Si estos puntos se unen, se dibujará una curva que representa los cambios de conductividad. Los materiales que tienen la conductividad más alta tendrán las corrientes parásitas más fuertes y, por lo tanto, el vector resultante será más grande. Por lo tanto, el material que tenga las conductividades más altas aparecerá en la parte inferior de la curva (el más alejado del punto de aire). La curva de impedancia resultante se presenta en la Fig. 2.21, en la cual todos los materiales que aparecen en la curva de conductividad son no ferrosos y tienen una permeabilidad relativa de 1, también se puede considerar que la curva de conductividad sigue la misma línea que la curva de frecuencia normalizada.

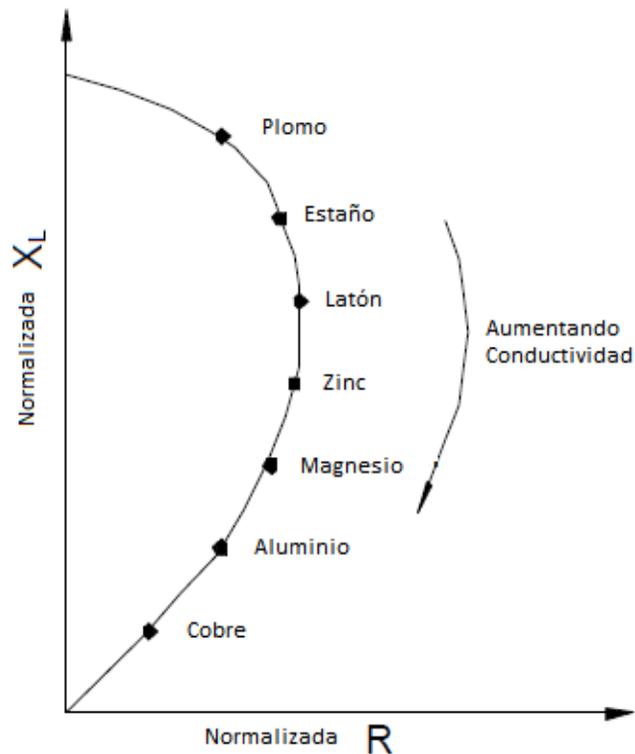


Fig. 2.21. Efecto de la conductividad en la curva normalizada.

- ✓ Efecto del despegue y el manejo de la sonda. Con la sonda colocada sobre una pieza de material (aluminio), el punto aparecerá en la curva de conductividad en el punto de aluminio (punto de equilibrio). Si luego se levanta la sonda del material, la mancha se moverá a lo largo de un vector hacia el punto de aire (ver, Fig. 2.22). Esta línea representa "levantamiento" y se puede utilizar para medir cambios en el espesor del revestimiento. De manera similar, si la sonda está en ángulo con la superficie, la mancha se moverá a lo largo del mismo vector. Este efecto se conoce como "manipulación de la sonda". Para asegurar de que el punto sea estable mientras se escanea, es importante asegurar de que la sonda se mantenga en un ángulo constante con respecto a la superficie del material mientras se escanea. A veces, esto puede ser ayudado por el uso de guías y soportes de sonda.

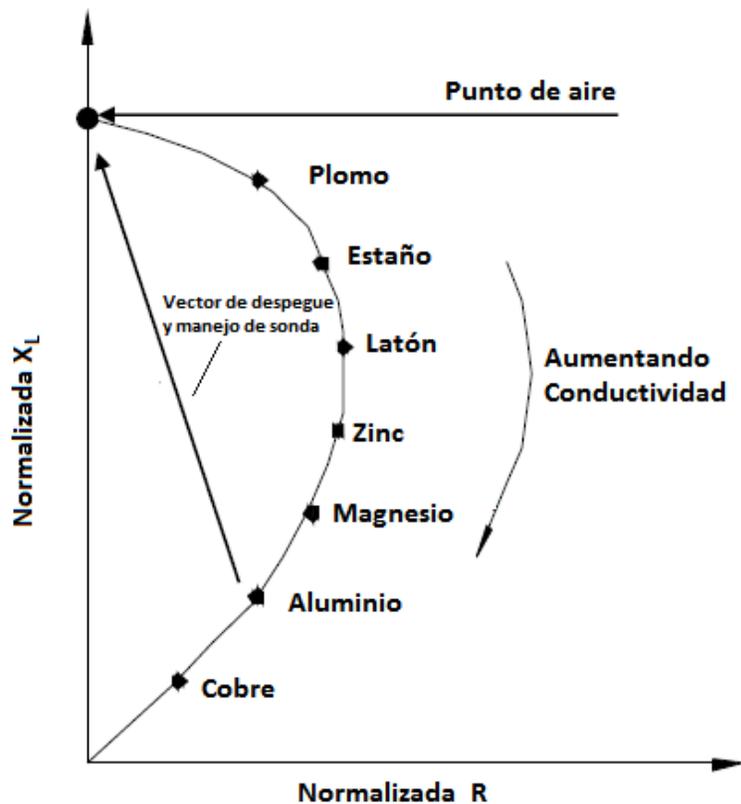


Fig. 2.22. Efecto del despegue y de la manipulación de la sonda en la curva normalizada.

- ✓ Efecto de la geometría. Con la sonda sobre una muestra de material y el punto en el punto de equilibrio, el instrumento está equilibrado. Si la sonda ahora se escanea hacia el borde del material, el punto se moverá debido al cambio en la geometría del componente. Inicialmente, cuando la sonda alcanza el borde del material, el campo de corrientes parásitas se comprime y se produce un campo de corrientes parásitas más pequeño y más débil. El efecto es el mismo que una reducción de la conductividad y el punto se mueve hacia arriba en la curva de conductividad. El movimiento adicional hacia el borde hace que la sonda se mueva sobre el borde y un efecto similar al despegue hace que el punto se curve hacia el punto de aire. Este movimiento compuesto se presenta en la Fig. 2.23.
- ✓ Efecto de la permeabilidad. Un aumento en la permeabilidad del material tiene una influencia directa en el campo magnético de las bobinas provocando un aumento en la reactancia inductiva ( $X_L$ ) de las bobinas. El efecto de esto es

que el punto se moverá verticalmente hacia arriba en la pantalla (reactancia inductiva creciente). Diferentes posiciones en la curva de conductividad causarán un cambio en la relación entre los ángulos de fase para las variaciones de despegue, grieta y permeabilidad. En la Fig. 2.24 se presenta que la diferencia angular a baja frecuencia es diferente en comparación con la de una frecuencia más alta para el mismo material.

- ✓ Efecto de las discontinuidades. La presencia de una discontinuidad resultará en una interrupción de las corrientes parásitas, reduciendo efectivamente la conductividad localmente. Dependiendo de la profundidad y el ancho de la discontinuidad, la indicación producida será una señal compuesta con un ángulo de fase mayor que el vector de despegue (ver, Fig. 2.25).

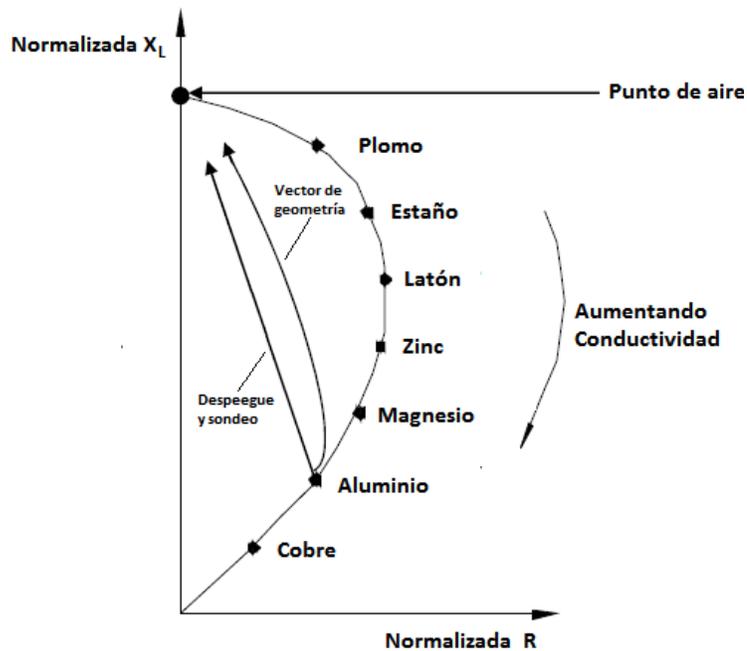


Fig. 2.23. Efecto de la geometría en la curva normalizada.

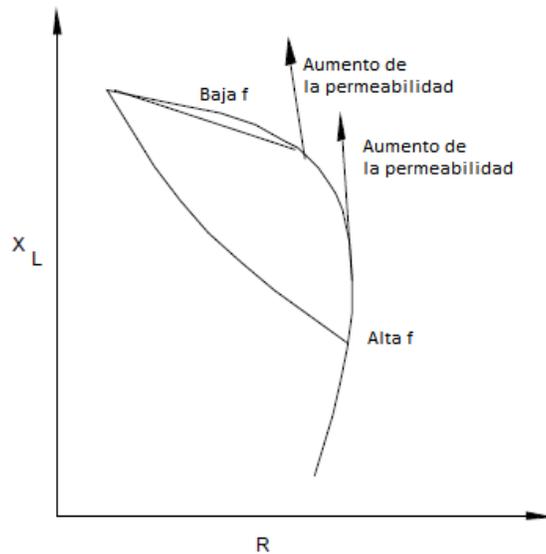


Fig. 2.24. Efecto de la permeabilidad en la curva normalizada.



Fig. 2.25. Efecto de la discontinuidad en la curva normalizada. Nota: la señal de despegue es horizontal, tal como en una inspección típica.

### 2.5.8. ROTACIÓN DE FASE

En un instrumento que tiene una pantalla de fase, la supresión de una señal no deseada se realiza más fácilmente girando la pantalla hasta que el movimiento de puntos resultante de la condición no deseada se encuentre en el eje horizontal o vertical. Esto significa que la condición no deseada estará presente en un solo canal de fase del instrumento y estará ausente o minimizada en el otro.

La aplicación de ganancia diferencial en el eje permite la amplificación de señales de interés y la supresión de ruido.

A menudo es conveniente rotar los efectos no deseados en la dirección horizontal al realizar una prueba. Se pueden seleccionar otros ángulos de rotación de la pantalla para separar dos o más efectos deseados en cuadrantes separados de la pantalla para mayor comodidad en la activación de la señal.

### **2.5.9. FILTRO DE SALIDA**

En un instrumento de prueba de corrientes parásitas, es necesario separar las señales de prueba del ruido para garantizar la máxima detectabilidad de la señal en la salida. Esta separación se realiza mediante varios tipos de filtros. Las fuentes típicas de señales de ruido no deseadas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ✓ Campos eléctricos y magnéticos parásitos externos;
- ✓ Vibraciones mecánicas del material de prueba o de las bobinas de prueba;
- ✓ Variaciones en las propiedades del material de prueba que no son de interés durante la prueba específica; y
- ✓ Ruido eléctrico generado dentro del instrumento de prueba de corrientes parásitas.

### **2.6. DIFERENTES TIPOS DE EQUIPOS DE CORRIENTES PARÁSITAS**

En el siguiente apartado se mencionan los diferentes tipos de equipos de corrientes parásitas, así también como sus circuitos eléctricos y los distintos componentes que estos poseen.

### 2.6.1. EQUIPO MONOPARÁMETRO, MONOCANAL Y ESPECIALIZADO

En el método de prueba de corrientes parásitas, el equipo diseñado para un propósito o aplicación particular detecta de alguna manera un cambio en la impedancia de la bobina de prueba que puede ser causado por varios parámetros. Entre los factores relacionados con las propiedades del material se encuentran la conductividad, la dimensión y la permeabilidad. Los factores dimensionales que afectan las pruebas de corrientes parásitas son el grosor del material y la presencia de discontinuidades. De manera similar, la permeabilidad es un factor de preocupación para los materiales ferromagnéticos bajo prueba.

Los factores geométricos de las bobinas, tal como la relación geométrica entre la bobina y las discontinuidades sospechadas, el efecto de los cambios en el factor de despegue o llenado y la profundidad de penetración, también afectan las pruebas de corrientes parásitas.

Por lo tanto, existe una gran necesidad de saber con precisión qué factor ha causado el cambio en la impedancia entre varios parámetros de interés. Los equipos de corrientes inducidas clasificados como monoparámetros utilizan ciertos circuitos y principios mediante los cuales indican exclusivamente la medición de la variable de interés. Así, algunos de estos instrumentos son:

#### a) Detectores de grietas.

Los detectores de grietas se utilizan para inspeccionar defectos en la superficie. En un detector de fisuras típico, como se presenta en la Fig 2.26, un oscilador suministra CA a un puente de CA, que contiene una bobina de sonda de corriente parásita como un brazo del puente. Un condensador está conectado en paralelo con la bobina de modo que el circuito L-C (inductancia-capacitancia) esté cerca de la resonancia.

Cuando la bobina se coloca sobre la muestra de prueba, el puente se desequilibra y el puntero se sale de la escala. El puente se puede equilibrar ajustando  $R_1$ . Dado que el medidor funciona a una frecuencia resonante, el voltaje de salida es máximo para un cambio dado en la impedancia de la bobina.

Los detectores de grietas tienen una salida de medidor y tres controles básicos, a saber, equilibrio, despegue y sensibilidad. El control de equilibrio se realiza ajustando el potenciómetro en el brazo del puente adyacente, hasta que la salida del puente sea cero o casi. El ajuste del control (sensibilidad) de "ganancia" se produce en la salida del puente. Luego, la señal se rectifica y se presenta en el medidor.

El control "LIFT OFF" ajusta la frecuencia de prueba (en menos del 25%) para operar ligeramente fuera de la resonancia. La frecuencia de prueba se elige para compensar la oscilación de la sonda (despegue), no para cambiar la profundidad de la piel o el desfase. La salida del medidor es una función compleja de la amplitud de la señal y no se puede usar para medir la profundidad de manera confiable o para distinguir entre indicaciones reales y falsas, como inclusiones ferromagnéticas.

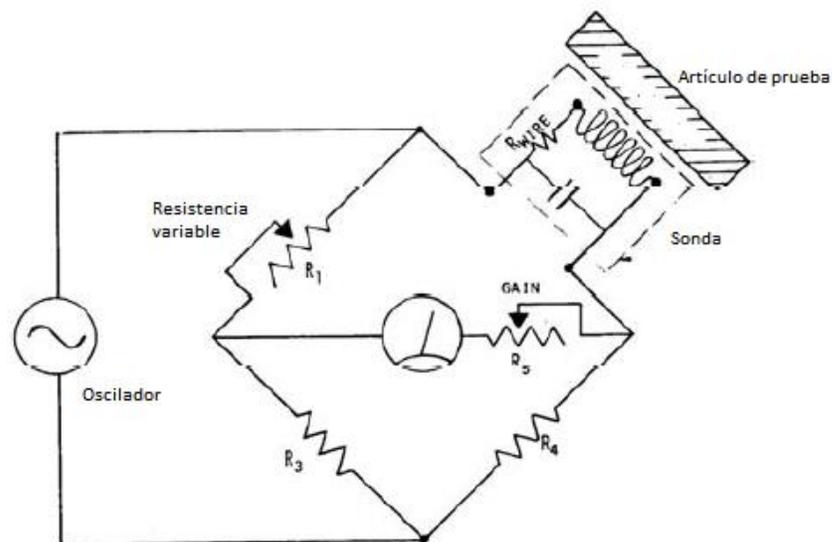


Fig. 2. 26. Circuito simplificado de un detector de grietas.

#### b) Probadores de conductividad.

En este caso, un medidor de conductividad se define como un instrumento simple diseñado únicamente para verificar la conductividad de varios tipos de materiales y sus aleaciones. La escala del instrumento puede ser (y a menudo lo es) lectura directa en % IACS. La mayoría de los instrumentos están equipados con perillas de calibración para que las lecturas altas y bajas del

medidor se puedan ajustar para coincidir con los estándares de alta y baja conductividad suministrados con el equipo. Estos instrumentos se utilizan con mayor frecuencia en la clasificación de material, no obstante, se pueden utilizar para determinar el espesor de revestimientos conductores.

Son de frecuencia fija y no dan ninguna indicación de la relación entre la fase y la tensión.

Al usar el medidor de conductividad, el operador debe estar continuamente consciente de los factores que afectan la conductividad (espesor de los materiales, presencia de discontinuidad, efecto de borde, despegue y efecto del tratamiento térmico) antes de llegar a conclusiones finales.

Los instrumentos de conductividad tienen una salida de medidor pre-calibrada y una forma única de compensar el despegue. Incorporan puentes AC y normalmente tienen dos bobinas (una como referencia). Normalmente, la compensación de despegue está preestablecida.

c) Comprobadores de medida de resistencia y reactancia (circuitos de medida de impedancia).

El equipo diseñado es capaz de medir cualquier variable cuando se utiliza con el diagrama de plano de impedancia. Primero se selecciona la frecuencia de prueba adecuada para la prueba propuesta. El tipo de material involucrado y la variable a medir y suprimir, determinan la frecuencia óptima. Al seleccionar la frecuencia que se utilizará para una prueba en particular, es necesario obtener estándares de referencia y realizar pruebas en varias frecuencias y luego seleccionar la frecuencia que proporcione los mejores resultados. Una vez seleccionada la frecuencia, se trazan las curvas del plano de impedancia. Para trazar el locus o la curva de conductividad, se necesitan muestras de diferentes materiales. Para cada material se obtiene un punto en la curva de conductividad de la siguiente manera:

- ✓ La sonda se coloca sobre una muestra y alternativamente se ajustan los controles de resistencia y reactancia hasta que se obtiene una lectura nula (mínima). Se hace uso del control de escala para mantener las lecturas en escala en todo momento. Se repite el procedimiento anterior con ajustes

de sensibilidad más altos hasta que se obtiene un punto nulo absoluto. Los valores de resistencia y reactancia se anotan en el control y se traza este punto en el papel cuadrulado.

- ✓ El procedimiento anterior se repite para cada muestra de material. Ahora, si se va a suprimir el despegue variable, el despegue se varía colocando un grosor variable de papel entre el material y la sonda. Para cada ajuste se tienen los valores de resistencia y reactancia y su gráfico produce la curva de despegue. Para medir la conductividad es necesario realizar la operación en un punto donde la curva de conductividad y la curva de despegue se encuentran en los ángulos más grandes.

## **2.6.2. EQUIPO MULTIPARAMÉTRICO Y MULTICANAL**

Basado en la discriminación de fase de una sola frecuencia, se vuelve cada vez más difícil detectar discontinuidades de tubos de tamaño mucho más pequeño, especialmente en las inmediaciones de artefactos que interfieren en la señal, como el soporte del tubo y las placas del tubo. Dependiendo de una frecuencia operativa dada y la severidad de la discontinuidad, la señal de dicha intersección se puede o no identificar y ciertamente no se puede caracterizar de manera confiable. Esta condición es causada por la suma vectorial de varias señales combinadas simultáneamente para formar una señal distorsionada.

El equipo que emplea las técnicas de análisis multifrecuencia y multiparamétrico ayuda a minimizar los efectos de variables indeseables para una inspección mejor y confiable de los tubos. Se han construido varios instrumentos de prueba de corrientes parásitas multifrecuencia con dos a cuatro frecuencias para aplicaciones especiales como la inspección de tubos.

Todos estos instrumentos contienen un sistema de detección que produce un componente real  $x$  y un componente imaginario  $y$  para cada frecuencia; y (2) el sistema de análisis que es su característica principal

En el mismo sentido, un instrumento de prueba multifrecuencia es generalmente una combinación de dos o más instrumentos de frecuencia única.

A continuación, se enumeran varios componentes de un instrumento de dos frecuencias:

- ✓ Un oscilador, que genera los voltajes sinusoidales requeridos para la generación y demodulación de corrientes parásitas;
- ✓ Un amplificador de potencia, seguido frecuentemente por un transformador de adaptación de impedancia;
- ✓ Un puente que contiene el transductor;
- ✓ Un sistema de equilibrio;
- ✓ Un amplificador de señal de ganancia variable;
- ✓ Un demodulador, que extrae los componentes resistivo y reactivo de la señal;
- ✓ Un sistema de rotación de fase de 0-360° que emite las señales utilizadas para el análisis ( $X_1$  e  $Y_1$  para la frecuencia del canal  $f_1$  y  $X_2$  e  $Y_2$  para la frecuencia del canal  $f_2$ ).

La característica especial de este sistema es que los dos canales usan un solo transductor para inducir corrientes parásitas y recibir datos del objeto de prueba.

Existen dos tipos básicos de sistemas multifrecuencia. Aquí están separados según si se suministra energía multifrecuencia a la sonda de forma simultánea o secuencial para cada instrumento, la forma en que se suministra energía a la sonda, la forma en que se separan las señales recibidas y el tipo de demodulación, son todas importantes consideraciones.

## **2.7. DISPOSITIVOS AUXILIARES**

En siguiente apartado se muestran los dispositivos necesarios para la visualización y toma de datos que se han obtenido en el equipo al momento de hacer los ensayos.

### **2.7.1. DISPOSITIVOS AUXILIARES PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES**

La visualización de fase en una pantalla presenta la información máxima sobre una señal de corriente parásita. Además de las visualizaciones realizadas en la pantalla, existen otros dispositivos instituidos para adquirir señales de corrientes parásitas para la interpretación y evaluación de indicaciones. Algunos de estos dispositivos auxiliares son:

#### **a) Pantallas de medidores analógicos.**

En algunos casos en los que el procedimiento de prueba está bien establecido o cuando solo es necesario presentar la magnitud de la respuesta de la condición de interés, puede ser suficiente utilizar un dispositivo de salida simple y económica, como un medidor de panel analógico. Se puede usar un medidor para presentar una señal de fase o una señal de amplitud detectadas. El puntero de un medidor analógico típico se moverá de cero a la escala completa en  $\sim 0.5$  s. Este tiempo de subida es equivalente a un ancho de banda de señal de  $\sim 0.6$  Hz. Un medidor analógico es útil solo en pruebas en las que el escaneo se realiza a una velocidad lenta.

#### **b) Pantallas alfanuméricas digitales.**

Cuando la señal que se presenta puede estar relacionada con una cantidad numérica, como la conductividad o el despegue de la sonda, en lugar de una lectura relativa, como una respuesta a una fisura, puede ser conveniente utilizar una pantalla digital que tenga más precisión y resolución potencial que un medidor analógico. Un medidor digital contiene un convertidor de analógico al digital (para cambiar el voltaje de entrada a un número) y una lectura digital para presentar este número.

Las pantallas digitales que son adecuadas para el uso de instrumentos están disponibles en forma de matriz de puntos y de segmento. Las principales tecnologías de visualización son diodos emisores de luz (LED), pantallas de cristal líquido (LCD), fluorescentes de vacío (CRT de bajo voltaje con segmentos de pantalla recubiertos de fósforo), electroluminiscentes (fósforo

de salida eléctrica de alto voltaje), plasma de gas (alto voltaje, neón) y gas (descarga luminiscente).

De particular importancia en las pantallas alfanuméricas de indicaciones de prueba de corrientes parásitas es la posibilidad de presentar palabras y números para identificar:

- ✓ La naturaleza de la discontinuidad o variación de la propiedad en el material de prueba;
- ✓ La severidad de la variación de las condiciones estándar de referencia; y
- ✓ Las ubicaciones de la discontinuidad dentro del material de prueba.

Las pantallas también pueden incluir la identificación de la condición detectada, su ubicación en el objeto de prueba o su nivel de gravedad. Se pueden presentar palabras como costura de grietas, adelgazamiento de la pared y otros descriptores. También, se pueden presentar otras palabras como diámetro exterior (OD), diámetro interior (ID), superficie o subsuelo, longitudinal o transversal, o identificaciones numéricas de ubicaciones en el objeto de prueba. El grado de variación o las dimensiones de las discontinuidades (como la longitud de las grietas o las costuras) se pueden presentar numéricamente o en intervalos codificados, como números del 1 al 10. Las combinaciones de dichos descriptores podrían proporcionar al operador de la prueba información mucho más útil que una simple advertencia, una luz. Tal pantalla podría permitir una interpretación cuantitativa, así como una evaluación cualitativa de señales en comparación con pantallas digitales simples donde el operador debe evaluar la condición del objeto de prueba para cada indicación significativa. La lectura de la prueba interpretativa se podría transmitir a una computadora remota o a una impresora, proporcionando un registro de inspección interpretable por la gerencia, los supervisores de inspección, los inspectores externos u otras agencias.

c) Pantallas de indicador de gráfico de barras digital.

Los valores numéricos intermitentes son difíciles de interpretar cuando las señales cambian rápidamente. Si es deseable presentar una tendencia de la señal, es posible utilizar una pantalla de gráfico de barras. Esto puede tomar

la forma de una pantalla especial que consta de un gran número de segmentos activados en secuencia para simular el movimiento mecánico de un puntero analógico. También se puede usar una pantalla estándar numérica o alfanumérica de esta manera con una resolución más baja activando segmentos individuales o puntos en secuencia. Existen dos modos comunes para este tipo de pantalla. El primero es el modo de gráfico de barras en el que se activan todos los segmentos hasta el valor que se presenta. Alternativamente sólo se puede activar el segmento que representa el valor de visualización. Este tipo de pantalla está disponible comúnmente en forma de pantalla de cristal líquido (LCD), diodo emisor de luz (LED) y pantalla de plasma.

### **2.7.2. DISPOSITIVOS AUXILIARES PARA REDUCCIÓN DE RUIDO**

A continuación, se enlistan los dispositivos que ayudan a la reducción de las interferencias que se pueden generar a la hora de la toma de datos:

a) Mecanismo de conducción.

Los mecanismos de accionamiento se emplean a menudo para aumentar la velocidad y la fiabilidad de la inspección. Las aplicaciones comunes son la inspección de tubos, la inspección de orificios de pernos y el escaneo de áreas. Se requieren velocidades de escaneo constantes junto con la selección de filtro adecuado para minimizar el ruido y maximizar la confiabilidad y la sensibilidad.

b) Unidad de saturación.

La prueba de corrientes de Foucault de tubos soldados hechos de acero austenítico siempre va acompañada de la necesidad de magnetizar la pieza durante el escaneo de la sonda de corrientes de Foucault. Las pequeñas permeabilidades localizadas en ausencia de magnetización auxiliar conducen a un nivel de ruido que evita una alta sensibilidad durante la prueba. Las fluctuaciones pueden resultar del proceso de calentamiento y enfriamiento

causado durante la soldadura, o pueden estar presentes en el material de la hoja utilizado para fabricar los tubos.

La construcción de un dispositivo basado en un carro de bobina con un imán permanente antes y después de la bobina de prueba, ayuda a inducir suficiente magnetización para reducir el nivel de ruido. De manera similar, las zapatas de poste para concentrar y guiar el campo hacia la superficie del tubo se utilizan en ocasiones para materiales altamente magnéticos.

c) Desmagnetizadores.

Las pruebas de corrientes de Foucault responden específicamente solo a la conductividad eléctrica, la permeabilidad magnética, las propiedades geométricas de los objetos de prueba y a la relación espacial de las sondas de prueba con las superficies de los objetos de prueba. Muchas otras propiedades del material pueden estar relacionadas con estas mediciones de prueba de corrientes parásitas primarias, no obstante, se debe obtener una prueba de dicha correlación para cada caso. En particular, muchos factores metalúrgicos diferentes (como la estructura de la aleación, el tratamiento térmico, el trabajo en caliente o en frío y otros pasos de procesamiento) pueden influir en la conductividad o permeabilidad del material. El magnetismo residual dentro de los aceros y materiales ferromagnéticos puede afectar las indicaciones de la prueba de corrientes parásitas. A veces es extremadamente difícil separar los hechos deseados de los no deseados (indicaciones falsas).

Por lo tanto, el uso de desmagnetizadores es necesario en ocasiones para eliminar el magnetismo existente dentro de la pieza de prueba para llevar a cabo una inspección de corrientes parásitas con éxito.

### **2.7.3. EQUIPO PARA ALMACENAMIENTO DE SEÑALES**

En el siguiente apartado se enlistan los dispositivos que ayudan a grabar la toma de datos en el equipo de corrientes parásitas:

a) Registradores de gráficos de banda.

La señal de las corrientes parásitas se graba en el X-Y o en el registrador de dos canales. La característica importante de estos instrumentos de registro es la respuesta de frecuencia o la respuesta de velocidad, lo que limita las velocidades de inspección. Registradores de gráficos de banda, registran los componentes de la señal X e Y contra el tiempo, que se utiliza para localizar defectos y determinar su longitud.

b) Grabadoras de cinta magnética.

Las grabadoras de cinta magnética permiten el almacenamiento de señales de corrientes parásitas en cinta magnética para su posterior recuperación.

Tienen una respuesta de frecuencia proporcional a la velocidad de grabación.

c) Adquisición y almacenamiento de trazas digitales

Alguna instrumentación del plano de impedancia permite la adquisición de datos del plano de impedancia para guardar, exportar y superponer comparaciones de la visualización en pantalla.

#### **2.7.4. SISTEMA DE PROCESAMIENTO AUTOMÁTICO DE SEÑALES**

Un sistema de prueba de corrientes parásitas puede variar de simple a más sofisticado dependiendo de su alcance de aplicación. La cadena básica de circuitos en la mayoría de los sistemas de prueba electromagnéticos automáticos realiza seis funciones internas. La integración de dicha cadena de funciones e instrumentos avanzados adicionales similares se mantiene de una forma u otra para procesar las señales automáticamente. Estas funciones son:

a) Excitación.

El oscilador proporciona señales de excitación del conjunto de la bobina de prueba. Puede ser un generador sinusoidal de frecuencia única y un amplificador de potencia, un generador de formas de onda sinusoidal múltiple y amplificadores de potencia, o un generador de impulsos que entregue la forma de onda de impulsos deseada. También puede ser un oscilador

autoexcitado cuyo comportamiento se rige por la impedancia de la bobina de prueba.

Las variaciones en la impedancia de la bobina causadas por variaciones de las condiciones del objeto de prueba producen cambios en el rendimiento del oscilador. Estos pueden ser cambios en la frecuencia o amplitud de oscilación o ambos. Sus efectos se demodulan y se envían a los circuitos de visualización o lectura.

Se puede obtener cierto grado de discriminación contra una variable de prueba no deseada ajustando los circuitos del oscilador.

#### b) Modulación.

La modulación de la señal se produce en el campo electromagnético de la bobina o bobinas de prueba. Las bobinas de prueba están etiquetadas como "conjuntos de bobinas de prueba" debido a la variedad de configuraciones en las que puede aparecer esta parte del equipo. El equipo de ensamblaje de la bobina de prueba a menudo está estrechamente relacionado mecánicamente con el equipo de manipulación de objetos de prueba que se discutirá más adelante.

#### c) Preparación de la señal.

La parte de preparación de señal del equipo de prueba consta de circuitos que preparan la salida de señal de los conjuntos de bobinas de prueba para las siguientes funciones de demodulación y análisis. Estos circuitos consisten en redes de compensación o balance de CA que reste un componente de CA constante de la señal de entrada. Los filtros se incluyen a menudo para mejorar la relación señal / ruido o para separar diferentes señales portadoras en el caso de pruebas de frecuencia múltiple. A veces se incluyen circuitos de conformación de señales. Una parte importante de esta parte del equipo son los amplificadores que amplifican la señal al nivel deseado para el proceso de demodulación y análisis.

#### d) Demodulación y análisis.

La sección de demodulación y análisis del equipo se compone de detectores y analizadores. Los detectores van desde detectores de amplitud

simples hasta detectores de fase de amplitud o circuitos más altamente especializados. Para los detectores coherentes, se proporciona una señal de referencia desde la sección del generador. Los circuitos de muestreo y los discriminadores se pueden incluir en la sección de análisis. También, se pueden utilizar aquí varios tipos de circuitos de suma y comparación. Además, se pueden incluir filtros para filtrar la señal demodulada para acentuar o discriminar ciertas características de la señal.

e) Pantalla de señal.

La parte de visualización o indicación de señales del equipo es el vínculo real entre el equipo de prueba y su propósito. La señal se puede presentar mediante el uso de medidores, registradores, pantallas, señales de alarmas visuales o audibles, salidas de relé y equipos de señalización automática o rechazo.

f) Manejo de objetos de prueba.

Dependiendo de la naturaleza de las pruebas, las necesidades de equipos de manipulación de objetos de prueba pueden ser mínimas o pueden requerir un diseño mecánico muy complicado. En algunas pruebas, los conjuntos de bobinas de prueba están diseñados para que se coloquen y sujeten manualmente. En este caso, las demandas de equipos de manipulación de objetos de prueba son mínimas y todo lo que se requiere es un lugar para colocar o sostener el objeto de prueba mientras se inspecciona. En muchas pruebas, los alimentadores mecánicos alimentan el objeto u objetos de prueba más allá de los conjuntos de bobinas de prueba para que las pruebas se puedan realizar rápidamente en condiciones uniformes. Dicho equipo requiere coordinación en el diseño de la bobina de prueba y el equipo de alimentación. Tales pruebas son aptas para un funcionamiento automático completo.

La discusión anterior se ha realizado para una cadena de señales enlazada en varios circuitos de interconexión incorporados para el procesamiento automático y la adquisición de señales en la mayoría de los instrumentos.

### **3. PROPUESTA DE LABORATORIO DE PRUEBA NO DESTRUCTIVA POR CORRIENTES PARÁSITAS**

En este capítulo se presenta diferentes parámetros que se tomaron en consideración la propuesta para la obtención de un equipo de corrientes parásitas, para la Escuela de Ingeniería Mecánica, para los estudiantes de las diferentes asignaturas en las que se aborden temas relacionados con los ensayos no destructivos.

#### **3.1. JUSTIFICACIÓN**

Los ensayos no destructivos son una práctica que día a día van tomando más fuerza; ya que su utilidad en áreas de calidad, consultoría y mantenimiento se hace cada vez más importante y redundando siempre en el mejoramiento de la productividad y de la economía de las empresas que hacen uso de dichos ensayos no destructivos como parte de su filosofía. Los laboratorios que ofrecen servicios de este tipo se sitúan en el mercado de la construcción industrial, en su más amplio espectro, desde el desarrollo de los materiales, su fabricación, instalación o construcción, y su posterior monitoreo de condiciones, que otorgan información valiosa para la continuidad operacional de los activos principales relacionados con los procesos productivos de cada industria.

Los beneficios que aporta el empleo de este tipo de servicio son muy variados, se puede observar que aplicar correctamente los ensayos no destructivos contribuye a mejorar el control del proceso de fabricación de una parte, componente o servicio.

Estos también ayudan a mejorar la productividad de una planta, al prevenir paros imprevistos por falla de un componente crítico; además de ayudar a programar los planes de mantenimiento, lo que reduce el tiempo y el costo de reparación.

También resulta importante mencionar que estos métodos, cuando se aplican como parte de la inspección preventiva reducen notablemente los costos de reparación o reproceso, pero sobre todo ayudan a ahorrar tiempo y recursos que de otra forma se desperdiciarán en una pieza que finalmente puede tener un costo de producción muy superior al presupuestado.

### **3.2. DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN**

En la actualidad, los niveles de competencia exigen la preparación integral del profesional y que este se encuentre apto para asumir cualquier liderazgo y requiere calidad en los egresados.

Por ende, la población a la que ira enfocado esta propuesta de laboratorio, será a todos los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la que puedan hacer uso del laboratorio en temas relacionados con los ensayos no destructivos.

### **3.3. EQUIPO E INSUMOS DE LABORATORIO**

Para facilitar la ejecución de las prácticas en el laboratorio, es necesario el manejo de equipos, herramientas e insumos que garanticen la correcta elaboración de los ensayos. El buen uso de estos es responsabilidad de los investigadores, estudiantes o grupo de practicantes involucrados en el desarrollo de los ensayos y el correcto manejo facilita el beneficio de todos y evita, incluso, accidentes en el laboratorio.

### **3.3.1. EQUIPOS**

Los equipos que se usan en las prácticas son muy reducidos y son costosos, el manejo debe ser cuidadoso en el uso y el instructor deberá estar presente siempre que se utilice, o bien, entregarlo al grupo de estudiantes demostrando su funcionamiento y recibirlo de la misma forma, debido a que estos son muy delicados y cualquier daño por pequeño que sea puede causar errores serios en la ejecución de las prácticas, lo cual repercutirá directamente en la obtención de los resultados.

El equipo necesario para la ejecución de una prueba con este método de ensayo podría ser el siguiente:

- Un aparato para corrientes de Eddy que tenga indicación lumínica de la gravedad del defecto e indicación audible de localización de defecto;
- Una bobina de corriente alterna para metales ferrosos;
- Una bobina de corriente alterna para metales no ferrosos;
- Una bobina de corriente alterna para materiales austeníticos; y
- Un cable de conexión entre el aparato de corrientes de Eddy y la bobina.

### **3.3.2. INSUMOS**

Dentro de los insumos se encuentran probetas para la medición durante las prácticas con las corrientes inducidas. Las cuales pueden ser:

- Una probeta patrón de acero al carbono o acero inoxidable ferrítico,
- Una probeta patrón de acero inoxidable austenítico,
- Una probeta patrón de metal no ferroso (puede ser aluminio),
- Manual de operación del fabricante del instrumento, y
- Mesas de trabajo.

### **3.3.3. HERRAMIENTAS**

Éstas son implementos que se utilizan en algunos ensayos facilitando algunos procesos utilizados en los mismos. Se usan durante la preparación de muestras o la ejecución de ensayos, los cuales son:

- Reglas milimétricas, y
- Prensas.

### **3.4. NATURALEZA DEL LABORATORIO**

Los laboratorios de ensayos no destructivos, se constituyen con la finalidad de llevar a cabo la comprobación, solicitada con carácter voluntario, de que los productos cumplen con las normas o especificaciones técnicas que les sean de aplicación.

Los laboratorios con fines investigativos, se encargan de ejecutar pruebas y ensayos con el objetivo de extraer conclusiones sobre determinadas muestras y sus procesos para mejorarlos o para solucionar problemas; al mismo tiempo que se encargan de evaluar y analizar la conformidad de las muestras respecto a los requisitos normativos.

Los laboratorios de naturaleza académica, tendrá como objetivo principal el aprendizaje y la formación del estudiante a partir del método de prueba y error. También se investiga y desarrollan procesos de evaluación de muestras para determinar sus propiedades, características esenciales y conclusiones sobre la base en la observación.

### 3.5. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DEL SITIO DEL LABORATORIO

Para el desarrollo de la propuesta para implementar el laboratorio de ensayos no destructivos, surgió la interrogante ¿Cuál deberá ser el sitio más apropiado para la implementación de un laboratorio de ensayos no destructivos, sin que perturbe el entorno existente?

Para esta interrogante, se estableció una propuesta que fue evaluando en la medida que se encontraron acorde o no con las exigencias de valoración para la ejecución de los ensayos de los estudiantes.

Para la evaluación de la propuesta, se tuvieron en consideración varios requerimientos de selección:

- 1) Será necesario gozar de un espacio amplio y despejado en donde se puedan ejecutar las pruebas en un sitio bien repartido;
- 2) Será necesario una zona donde se coloquen muestras ya evaluadas;
- 3) Será necesario una instalación bien dotada de corriente eléctrica y reguladores de voltaje, para la conexión de los equipos;
- 4) Será necesaria una zona de fácil acceso para los usuarios, en donde se presenten rutas que permitan llevar y traer muestras; y
- 5) Será necesario proponer una zona que no se encuentre en espacios que podrían ser utilizadas por la institución para futuras edificaciones o estructuras.

Con los requerimientos anteriores se llegó a concretar la siguiente Propuesta:

- Se podrán usar cualquiera de los laboratorios con los que se disponen en el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica, y dado por la naturaleza del equipo que es portátil se puede hacer en cualquiera de los laboratorios que en estén disponibles a la hora de hacer dichas prácticas, ya que cumple con los requisitos necesarios para su funcionamiento.

### **3.6. DISEÑO ARQUITECTÓNICO DEL LABORATORIO**

Los diseños arquitectónicos de un laboratorio no están normalizados, sino que dependen del espacio, de los equipos a instalarse, de los procesos establecidos y del número de personas que van a trabajar en el desarrollo de ensayos.

Contando que dichas prácticas de laboratorio van dirigidas para estudiaste de las diferentes asignaturas donde se vea este tipo de ensayo y también materias electivas técnicas, tenemos un estimado de un mínimo de 5 personas por práctica, lo cual delimita muy bien el espacio de dichos laboratorios existentes en el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

El espacio físico para desarrollar los procesos de ensayos debe ser suficiente para que se puedan realizar cualquier actividad considerando que se requiere de un espacio mínimo aproximado de 4m<sup>2</sup> y que cada actividad deberá estar aislada para que los resultados no se vean afectados por la contaminación cruzada, y también respetando las medidas de distanciamiento por confort y de bioseguridad que tenemos que respetar por la pandemia que estamos viviendo estos días.

La implementación del laboratorio no requiere de ningún gasto en construcción ya su ubicación física se encontrará al interior de un local ya existente y que pueden ser utilizados, donde la posibilidad de algún costo en construcción recaería en la escuela si optan por elaborar gabinetes metálicos donde se puedan guardar los equipos cuando no se encuentren siendo utilizados.

### **3.7. CERTIFICACIÓN, CALIFICACIÓN Y CAPACITACIÓN EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Todos los ensayos no destructivos se realizan bajo procedimientos, que atienden a los requisitos de normas internacionales y códigos de fabricación, siendo los más utilizados los publicados por:

- ASTM (American Society of Testing Materials) - Sociedad Americana de Pruebas de Materiales.
- ASME (American Society of Mechanical Engineers) - Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.
- AWS (American Welding Society) - Sociedad Americana de Soldadura.

Sin embargo, los docentes que ejecutan los servicios bajo estos procedimientos, es apropiado que se encuentren certificados bajo alguno de los esquemas que se explican más adelante.

Uno de los aspectos más importantes en el ámbito de la aplicación de las pruebas no destructivas se refiere a la actuación del personal técnico que ejecuta y analiza los ensayos. La capacitación del personal es de tal importancia que, aun contando con un equipo altamente sofisticado para el desarrollo del procedimiento, el resultado puede ser potencialmente insatisfactorio cuando éste ha sido aplicado por personal no capacitado. De hecho, se conoce que la parte más crítica en la aplicación, desarrollo, supervisión, ejecución, atestiguamiento o auditoria en el área de los ensayos no destructivos es el personal que realiza alguna de estas actividades, y de ahí la importancia de que esté debidamente certificado.

El requisito de certificación para el personal que realiza ensayos no destructivos es la garantía de que las pruebas tienen confiabilidad, la certificación de personal en ésta y en cualquier actividad técnica, implica el cumplimiento de requisitos de entrenamiento, calificación y experiencia, de acuerdo a una serie de parámetros establecidos en documentos que emiten entes acreditadas mundialmente como ISO, ASNT, ANSI, etc.

La primera razón por la cual es importante la certificación dentro del laboratorio es cumplir un requisito de calidad, pero el alcance de una certificación es más amplio ya que implica la aceptación por parte del mercado, la puerta para participar en la actividad productiva industrial, y para ser reconocido por la industria con un parámetro de confiabilidad.

### **3.7.1. NORMATIVA Y CERTIFICACIÓN**

Existen una serie de documentos aplicables para evaluar y documentar la capacidad técnica del personal que realiza ensayos no destructivos, dentro de estos se tienen:

- Norma Internacional ISO 9712,
- Norma Europea EN – 473,
- Norma Mexicana NMX-B-482,
- Práctica Recomendada SNT-TC-1A, y
- Norma ANSI ASNT CP-189.

Todos ellos concluyen que la certificación es el procedimiento utilizado por un ente emisor para dar testimonio escrito sobre la capacidad técnica de un individuo para un método, nivel y sector de estos ensayos. Resaltan dos términos importantes y comunes en las definiciones planteadas por los diferentes documentos de esquemas de certificación, lo primero es la mención de un cuerpo certificador como responsable de la emisión del documento, y lo segundo comprende los requisitos de calificación de la persona, estos dos términos constituyen la base de las diferencias entre los esquemas de certificación planteados.

El esquema de certificación centralizado es el comprendido en ISO 9712, EN-473 y NMX B-482, presenta un proceso en donde un ente “avalado” cumple la función de realizar el proceso de calificación para emitir la constancia de certificación, este esquema es conocido como certificación de tercera parte y es

ampliamente reconocida por las ventajas que cumple al desarrollar entrenamiento con estándares internacionales. Los entes certificadores deben ser avalados, labor que realiza el gobierno a través de los diferentes organismos que evalúan la conformidad, siguiendo la norma ISO 17024.

Por otra parte, el esquema de certificación por empleador es planteado por la ASNT en su práctica recomendada Nro. SNT-TC-1A y en la norma ANSI ASNT CP-189 el cual deja en responsabilidad del empleador el proceso de certificación de las personas, para la cual debe contar con una práctica escrita debidamente avalada por un profesional nivel III. El empleador es quien se encarga de la administración y de la formación, exámenes y experiencia necesaria para certificar a su personal, de la misma forma que el empleador es el responsable de autorizar el desempeño del trabajador en ensayos no destructivos. Las certificaciones de este tipo caducan cuando el empleado deja la empresa que ha emitido la certificación, ya que comúnmente las certificaciones son hechas en función de las prácticas escritas de las empresas y éstas van de acuerdo a sus necesidades particulares.

Como característica fundamental y común de los esquemas de certificación, todos establecen tres niveles de competencia del personal que realiza las inspecciones, esto en función de los conocimientos, habilidad, experiencia, y responsabilidades en el trabajo del individuo a ser certificado. El técnico que no ha obtenido ningún nivel de certificación se registra como aprendiz o asistente, a partir de ello se inician los niveles definidos como:

- Nivel I: Técnico con aptitud para efectuar correctamente la calibración y ajuste de un equipo de inspección; realizar una inspección específica; aplicar los criterios de aceptación o rechazo definidos en un procedimiento o instrucción de inspección; informar o realizar los registros de estas actividades; no es responsable de selección del método de ensayo ni de la evaluación de resultados. El inspector con nivel I debe ser entrenado y supervisado por personal certificado como Nivel II o III.

- Nivel II: Un inspector de este nivel debe conocer las técnicas para realizar o verificar el ajuste cuando el equipo de inspección presenta cambios en sus condiciones normales de funcionamiento; interpretar los resultados obtenidos durante una prueba, evaluándolos conforme a un código, norma o especificación aplicable. Quien posea este nivel debe estar familiarizado con los alcances y limitaciones de la técnica, y puede ser responsable de la capacitación práctica y supervisión de los individuos de nivel I y aprendices. Debe ser capaz de preparar instrucciones de inspección, de organizar, revisar y emitir los dictámenes de los resultados de las pruebas efectuadas por él o bajo su supervisión.
- Nivel III: Bajo este nivel todo técnico puede dirigir y llevar a cabo actividades de la técnica, siendo el responsable de todos los aspectos de la prueba para la cual está certificado. Debe desarrollar, revisar y aprobar procedimientos e interpretar códigos. Quien posee el nivel III debe tener un conocimiento general sobre materiales, métodos y tecnología de fabricación que le permitan establecer el método y la técnica a emplear, por lo que debe estar familiarizado con los demás métodos de inspección no destructiva. Debe estar capacitado para impartir el entrenamiento y seleccionar a los candidatos a ser calificados y certificados con Nivel I o II.

### **3.7.2. CALIFICACIÓN Y CAPACITACIÓN**

El término calificación implica el cumplimiento por parte del aspirante a certificación de cuatro aspectos fundamentales: capacitación, examinación, experiencia, y atributos físicos. Cada uno con diferentes niveles de exigencia establecidos.

- a) Capacitación: Comprende los cursos de entrenamiento en el método de ensayo no destructivo para el cual se aspira a la certificación, que tiene por

finalidad proporcionar los conocimientos teóricos y desarrollar las habilidades prácticas necesarias para efectuar una inspección de manera confiable.

La capacitación implica los siguientes elementos:

- Entidades capacitadoras: Debidamente organizadas y con infraestructura que cumpla con los lineamientos de instrucción.
  - Instructores: Con perfil docente debidamente capacitados y certificados.
  - Lineamientos de instrucción: Existen varios documentos que establecen los programas curriculares, producto de la discusión en diferentes organizaciones, entre las principales guías que proveen los programas académicos se tienen:
    - ANSI ASNT CP-105 de la Asociación Americana de Ensayos No Destructivos.
    - IAEA-TECDOC-628, de la Organización Internacional de Energía Atómica.
    - ICNDT Guide, del Comité Internacional de Ensayos No destructivos.
    - ISO/TR 25107 y 25108 de la Organización Internacional de Normalización.
- b) Examinación: Comprende generalmente la aplicación de tres exámenes como medio de comprobación de habilidades y conocimientos de la persona. Se realizan dos exámenes de conocimientos uno general y otro específico, y un examen de habilidad práctica. Los requisitos de aprobación son establecidos en los esquemas de certificación, pero no difieren sustancialmente, por lo que en general el candidato debe aprobar los tres exámenes con un puntaje superior al 70% y el promedio de los tres exámenes debe ser superior al 80%.
- c) Experiencia: Es la comprobación de horas de trabajo de la persona en la técnica a certificar, debe ser acreditada verazmente, es decir, la persona que certifique debe tener la seguridad de la cantidad de horas y el trabajo en ensayos no destructivos que ha realizado el candidato; debe estar registrada preferiblemente en una bitácora con datos de fechas, horas, tipos de

inspección, nivel del inspector, etc.; y finalmente debe corresponder al nivel de competencia al que se está certificando la persona.

- d) Atributos físicos: En general los dos esquemas de certificación establecen como atributo físico examinarle sobre el candidato la agudeza visual Jaeger J2 a 12" y examen de percepción de colores (Ishihara), los cuales deben ser realizados por personal competente.

### **3.7.3. ORGANISMOS DE CAPACITACIÓN**

La certificación en ensayos no destructivos implica un proceso ejecutado y mantenido por una entidad reconocida e independiente que asegura la confiabilidad, imparcialidad y efectividad de la certificación con la aplicación de exámenes validados que tienen en mismo nivel de dificultad para todos los candidatos, la misma imparcialidad al calificar los exámenes y el mismo criterio de la validación por un Comité Técnico formado por especialistas en ensayos no destructivos de diferentes sectores, la decisión de emitir un certificado es tomada con base en los resultados del candidato validados por el Comité Técnico y no de un solo individuo como sucede con la práctica recomendada SNT-TC-IA que refiere la certificación por empleador.

- IMENDE- Instituto Mexicano de Ensayos no Destructivos A.C.:

En México, El IMENDE, A.C. es el único Organismo De Certificación reconocido por la EMA, para certificar oficialmente a los inspectores de ensayos no destructivos y así cumplir con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN) y su reglamento, que es aplicable para las unidades de verificación, los laboratorios acreditados, y los Organismos de Certificación de personas. En agosto 2016 IMENDE, es acreditado por EMA como Organismo de Certificación de Personas bajo el esquema de la norma internacional ISO 9712:2012 "Requisitos para la calificación / Certificación de personas en ensayos no destructivos", cumpliendo con los lineamientos de la norma NMX-EC-17024-IMC-2014 (ISO17024:2012), ya que para ser un Organismo de Certificación a nivel

Internacional se debe cumplir como requisito indispensable el estar acreditado en el país de origen.

Los certificados expedidos por IMENDE tienen vigencia de cinco años, los mismos son independientes de la empresa contratante y cumplen con los requisitos internacionales de certificación. Los exámenes son en español y se garantiza en estos el mismo nivel de dificultad para todos los candidatos en cada método, sector y nivel; esto asegura la imparcialidad y claridad en el proceso de certificación.

- ASNT - American Society for Nondestructive Testing:

La ASNT es la sociedad americana para ensayos no destructivos y comprende la mayor y más reconocida organización internacional para la certificación en ensayos de este tipo, por casi medio siglo ha presentado los estándares para la industria haciendo así la validación imparcial de las competencias del personal en este campo. Las certificaciones presentan fecha de caducidad por lo que es necesario realizar el proceso de recertificación. Las normas y prácticas recomendadas de ASNT son los documentos que ayudan a calificar y certificar al personal, sin embargo, es importante resaltar que ASNT no publica las normas que describen cómo realizar los ensayos no destructivos, estos documentos son publicados por organizaciones internacionales mencionadas anteriormente.

Bajo el esquema de certificación central ASNT ofrece:

- **Programa de Certificación Central (ACCP) Nivel II**, esta certificación se realiza por medio de la aplicación de exámenes de tipo general, específico y práctico cubriendo la preparación en cualquiera de los cinco métodos de ensayos no destructivos.
- **Programa de Certificación Central (ACCP) Nivel III**, extendido a terceros el cual cubre la preparación en cualquiera de los métodos de ensayos no destructivos. El programa ACCP da la certificación nivel III al personal que conozca, apruebe y acredite los requerimientos presentados en el estándar.

Ambos programas centralizados de ASNT ofrecen a la industria, personal altamente calificado en ensayos no destructivos con certificaciones transportables e independientes.

### 3.7.4. RECERTIFICACIÓN

Todos los programas de certificación en ensayos no destructivos requieren que el personal acreditado realice la renovación de sus certificaciones a intervalos regulares. En el caso de ASNT se promueve la recertificación cada cinco años, la cual se puede llevar a cabo de dos maneras una de ellas por medio de puntos que den evidencia del rendimiento técnico satisfactorio en ese periodo, o por un examen en caso de que así lo solicite el tercero.

### 3.7.5. COSTOS DE LA CERTIFICACIÓN

Tabla 3.1. Costos de las certificaciones de los ensayos no destructivos, impartidos por la asociación española de ensayos no destructivos (AEND).

Nivel	Método	Precio, \$
Nivel 0	Introducción a los END	1020.00
Nivel 1	Corrientes inducidas nivel 1	1255.00
	Líquidos penetrantes nivel 1	710.00
	Partículas magnéticas nivel 1	710.00
	Radiología industrial nivel 1	1386.00
	Ultrasonidos nivel 1	1312.00
Nivel 2	Corrientes inducidas nivel 2	1312.00
	Inspección visual nivel 2	1255.00
	Líquidos penetrantes nivel 2	1255.00
	Partículas magnéticas nivel 2	1255.00
	Radiología industrial nivel 2	1564.00
	Ultrasonidos nivel 2	1564.00
Nivel 3	Radiología industrial nivel 3	1136.00
	Ultrasonidos nivel 3	1457.00
	Corrientes inducidas nivel 3	1432.00
	Inspección visual nivel 3	923.00
	Líquidos penetrantes nivel 3	923.00
	Partículas magnéticas nivel 3	1084.00

### **3.8. PARÁMETROS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO**

Los análisis que se describen dentro de un sistema de investigación, hacen parte de una estructura básica donde se considera de vital importancia la demarcación de los factores principales que determinarán la investigación y el desarrollo de las actividades; bien sean del estudiante de pregrado, profesores, investigadores, científicos, profesionales, etc., que se encuentren desarrollando un proyecto, investigación, actividad, ensayos, análisis, etc.

Para este proceso, se tienen en consideración aspectos importantes que serán los que se seguirán al momento de la elaboración de dichas actividades. Cualquiera que sea el tema de desarrollo o investigación, se debe llevar a cabo un proceso lógico secuencial, para lograr los objetivos y alcanzar calidad en lo que se hace.

De lo anterior se puede añadir, las posibilidades que tiene el estudiante de concretar y llevar a cabo un proyecto, con el beneficio de alcanzar lo que se propuso y la seguridad de haberlo logrado a partir de hacer las actividades bien realizadas y en orden.

La manera como se realizan los laboratorios, por ejemplo, está estrechamente ligado con la forma de ejecución y estructuración. Se deben seguir unos pasos secuenciales para obtener unos resultados, se deben establecer lineamientos de investigación que permitan el desarrollo de los proyectos sin riesgo de analizar varias disciplinas a la vez, se deben acatar las normas, cumplir con los objetivos y documentar para llevar a buen término los proyectos que se estén realizando o los que se vayan a iniciar.

Para determinar estos parámetros o líneas de investigación para las pruebas de laboratorio, es necesario clasificar los ensayos de acuerdo al área al que corresponden y además la norma técnica que los rige.

### **3.8.1. PARÁMETROS DE INVESTIGACIÓN PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Para el área de ensayos no destructivos, se desarrollarán parámetros de evaluación que muestren claramente un alcance, que determine hasta donde abarca el tema de investigación; y un análisis, que comprende los ensayos correspondientes para la evaluación del alcance específico.

Se tendrán ensayos cuyos parámetros de investigación logren desarrollar aspectos tales como:

- Clasificación y caracterización de la pieza a evaluar;
- Propiedades físicas de la pieza a evaluar;
- Determinación de los parámetros de resistencia mecánica y deformaciones de la pieza a evaluar; y
- Determinación de la durabilidad de la pieza a evaluar.

### **3.9. DETERMINACIÓN DE PRUEBAS Y ENSAYOS BÁSICOS DEL LABORATORIO**

Para elaborar las Guías de Laboratorio que se utilizarán dentro de esta área, es necesario determinar las propiedades físicas, características y descripción de los materiales utilizados en ingeniería. Estos parámetros son indispensables para clasificar los ensayos, además de establecer lo que se persigue con la elaboración de cualquiera de ellos.

### **3.9.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Es necesario que, al momento de realizar un diseño de la estructura de un material, se seleccionen las características y propiedades específicas que deberá cumplir, para el caso de los elementos que conforman la estructura del material; así como los ensayos para la pieza a evaluar, y las características y propiedades de los materiales necesarios para conformar la pieza a evaluar.

Para este caso, se determinarán parámetros de investigación presididos a partir de los direccionamientos de los ensayos no destructivos; los cuales serán los que se van a evaluar y diseñar en el laboratorio, con la ayuda de las Guías que serán una de las herramientas de ayuda para que el estudiante desarrolle sin problemas cada uno de los ensayos propuestos.

De esta manera, se propone desarrollarán guías de Laboratorio que permitan elaborar ensayos en donde se logre alcanzar aspectos que precisen las propiedades de las piezas a evaluar.

### **3.10. PROPÓSITO Y ALCANCE DE LAS PRUEBAS DEL LABORATORIO**

El desarrollo de las pruebas y ensayos de laboratorio se enmarcan con fines docentes. En la ejecución de los ensayos por parte de los estudiantes del programa, éstos utilizarán el recinto con fines tanto para la complementación de los contenidos de las asignaturas afines con Ingeniería Mecánica, para estudiantes de la carrera en asignaturas como procesos de fabricación y técnica electivas relacionadas con la inspección de fallas, y para la utilización de pruebas y ensayos con fines de investigaciones para trabajos de graduación.

### **3.11. DISEÑO DE LAS GUÍAS DE LABORATORIO**

Este tipo de análisis riguroso consiste en evaluar las características morfológicas, las propiedades físicas y químicas, la capacidad de resistencia de los materiales ante eventuales o constantes cargas, su comportamiento en presencia de factores climatológicos, cambios de temperatura o fallas a las que constantemente se ve expuesto; además de la clasificación y descripción de los materiales, a los que se le atribuyen propiedades de ser elástico, homogéneo e isotrópico en todo su contexto, para lo que en realidad este se comporta de manera inversa a dichas propiedades, pero que son características establecidas para comprender su magnitud y lograr los diseños y construcciones de las estructuras de ingeniería que hoy en día se pueden contemplar.

Para lo anterior, se utilizan los ensayos de laboratorio, en donde el estudiante a partir de las experiencias, le atribuye características al material dependiendo de los resultados que arrojen las muestras analizadas en el laboratorio.

Para elaborar el diseño de los manuales de laboratorio para ensayos no destructivos, es de suma importancia que se establezcan los parámetros a evaluar para cada una de las ciencias a estudiar; es decir, la línea de investigación para la cual se realizan las pruebas básicas a desarrollar, y que además son las de mayor utilidad y relación para el estudiante e investigador del programa.

El contenido de cada uno de estos parámetros está estrechamente ligado con el área correspondiente, sea ensayos no destructivos, con el propósito de clasificar las pruebas, la intención de éstas y lo que se busca con el desarrollo de un ensayo de laboratorio; con el fin de que el estudiante aproveche este espacio para determinar propiedades de los materiales, características de las piezas a evaluar, diseños de elementos de máquinas, diferencias entre las diferentes tipos de fallas, etc., que sean de gran beneficio para conocer cuán importante son los resultados que arrojan las pruebas de laboratorio para el ingeniero de campo, el

diseñador o el estudiante investigador, con sólo realizar pruebas básicas y menos ostentosas en el laboratorio.

### **3.11.1. GUÍAS DE LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

De acuerdo con lo anterior y buscando establecer estos criterios apropiados para el diseño y montaje de los manuales o guías de laboratorio, se definirán cada una de ellos, teniendo en consideración las características principales de las experiencias básicas que se van a ejecutar.

Se propone que en su contenido se podrá apreciar aspectos tales como: objetivos del ensayo, materiales necesarios a utilizar, generalidades del tema que se estudia, procedimientos y desarrollo de las pruebas; así como figuras, tablas y formatos para que el estudiante entienda y realice paso a paso lo que se está explicando, se relacione con los equipos y herramientas principales, realice consultas específicas en los manuales y normas que rigen estos procesos y bibliografía adecuada que brinden información específica y necesaria para facilitar el desenvolvimiento del estudiante ante una prueba de laboratorio, en donde inicia su proceso de interacción dentro de su carrera como Ingeniero Mecánico.

Se tiene entonces, de manera debidamente estructurada, la presentación de los manuales de laboratorio que inician con las pruebas básicas de los ensayos no destructivos, los parámetros de investigación que seguidamente se traslada a cada una de las pruebas más relevantes y normas que rigen estos procesos; seguido de los ensayos correspondientes al área de Ingeniería mecánica.

### **3.12. PROPUESTA PARA PRESENTAR INFORMES DE LABORATORIO**

La forma como se deben presentar los resultados de estos procedimientos, lleva a desarrollar un estilo bien estructurado y organizado; de modo tal que lo que se quiere mostrar sea una presentación acorde con la investigación que se ejecutó.

La presentación de informes de laboratorio es importante para los estudiantes de Ingeniería. En el caso de los estudiantes de Ingeniería Mecánica, se incrementa la importancia debido a que éste, en su vida profesional, se verá muy bien rodeado de prácticas y ensayos a diario; dando como resultado una constante interacción entre el Ingeniero de campo u oficina, con el desarrollo de excelentes informes de laboratorio.

#### **3.12.1. PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA PRESENTAR EL INFORME**

El procedimiento recomendado es:

- Realizar el contenido o cuerpo del informe:
  - El Título,
  - Un resumen,
  - La introducción, y
  - El contenido.
- Colocar los resultados de la investigación, de manera que se resuman en el informe los aspectos alcanzados con la elaboración del ensayo.
- Plantear las conclusiones de manera clara, expresando los logros alcanzados, objetivos, ventajas, limitaciones, resultados, aplicaciones y recomendaciones sobre el tema de investigación.
- Referenciar el informe con textos, documentos, artículos, páginas de Internet, conferencias, ensayos, informes, etc., que se utilizaron en la realización del informe de laboratorio; de manera que el lector pueda ampliar la información

o conseguirla a partir de los datos suministrados por el estudiante o investigador.

Sugerencias para el desarrollo del informe de laboratorio, se recomienda colocar:

- Los aspectos más importantes de la investigación y los resultados.
- Ideas claras y precisas.
- Material organizado.
- Subtítulos que faciliten la lectura y el orden del informe.
- Palabras poco usadas o tablas que puedan confundir al lector y no favorezcan en nada.
- Se debe realizar un máximo de 10 páginas, a espacio sencillo.

### **3.13. NORMAS DE SEGURIDAD DENTRO DEL LABORATORIO**

Todas las actividades que se realizan en el laboratorio dentro de la Escuela de Ingeniería Mecánica, requieren de un conjunto de normas que garanticen la seguridad dentro del aula, como el correcto funcionamiento de los equipos.

En el laboratorio se deben tener en consideración las siguientes normas:

- El personal que se encuentra a cargo del laboratorio y las actividades a realizar debe estar capacitado en los manejos de los diferentes equipos y herramientas existentes.
- Conocer los elementos de seguridad en el aula, tales como: extintores, salida de emergencias y un botiquín.
- No comer, beber o fumar dentro del laboratorio.
- Mantener el orden y la limpieza en el lugar.
- No correr dentro del laboratorio.
- Antes de retirarse del laboratorio, verificar que todos los equipos se encuentren apagados.

- En caso de daño a algún equipo del laboratorio, la persona causante deberá responder por el costo de los daños.
- Informar al docente o al encargado del laboratorio sobre cualquier irregularidad que presenten los equipos.

### **3.13.1. NORMAS DE SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO**

En caso de incendio, se debe evacuar el área de peligro al mismo tiempo que restringir el acceso a personal no autorizado.

Usar equipo de protección personal, usar la protección respiratoria.

Utilizar el extintor apropiado:

- Tipo A: Agua; y
- Multipropósito: ABC.

### **3.13.2. NORMAS DE SEGURIDAD EN CASO DE TERREMOTO**

Las recomendaciones de seguridad en caso de terremoto es el siguiente:

- En caso de terremoto mantenga la calma, evite gritar o acciones que expresen pánico.
- Conozca las instalaciones y ubique las salidas de emergencias, lugares seguros y los puntos potenciales de peligro.
- Salga del laboratorio en orden, siguiendo las indicaciones del encargado. En caso de no poder salir inmediatamente, manténgase con calma hasta que el temblor pase.
- Aléjese de las vitrinas y aparadores.
- En caso de no poder salir del lugar, ubíquese cerca de los pilares o muros grandes.

### 3.14. COSTO DE EQUIPOS

Dentro de la propuesta de los equipos que se adaptan a los parámetros que se quieren llevar a cabo dentro del laboratorio, se tienen los siguientes equipos.

Tabla 3.2. Costo de los equipos.

Cantidad	Modelo	Descripción	Precio, \$
1	NORTEC 500	Equipo que realiza inspecciones de base por corrientes parásitas con frecuencias simples e incluye salidas externas, siendo capaz de medir la conductividad digital y el espesor del recubrimiento, soporta escáneres de rotación, además de una frecuencia doble	8,300.42
1	Defectoscopio PCE-USC30	Se usa para la comprobación no destructiva de materiales. Le permite hacer visibles fallas en la superficie y cerca de la superficie. Ha sido diseñado para realizar ensayos no destructivos, y también se pueden usar para la medición de conductividad y determinar el espesor de revestimiento	7,950.00

### 3.15. MANTENIMIENTO

Los intervalos entre las inspecciones de mantenimiento se establecen en función de las condiciones industriales, pero no menos de una vez al mes. Durante la inspección de mantenimiento se comprueba la fijación de los cables de conexión y el estado de los controles e indicadores.

La inspección de mantenimiento incluye un examen externo y es realizada por el personal encargado antes de poner en funcionamiento la unidad electrónica del detector de defectos.

También se verifican el paquete de baterías y se puede hacer la sustitución de estas de una manera muy fácil.

Todo esto está contemplado en el manual del equipo y se podría decir que dicho mantenimiento no es tan complicado para el operador del mismo.

## CONCLUSIONES

- ✓ Hay que resaltar que, si bien el conocimiento de las técnicas analizadas durante el presente trabajo constituye una herramienta fundamental de apoyo a la aplicación de la Ingeniería Mecánica, lo más importante para la interpretación de los resultados obtenidos es el criterio y la experiencia que los estudiantes y profesionales pueden acumular durante su propia formación, y que mejor que a través de la realización de laboratorios especializados.
- ✓ La formación de los criterios básicos que sustentan las decisiones de los ingenieros mecánicos en la identificación de una posible falla o defecto en particular y si esta es o no causal de aceptación o rechazo, son aspectos importantes en la preparación de los mismos; esto se puede lograr a través de la ejecución de prácticas de laboratorio relacionadas directamente con el tema, en este caso, a través de la aplicación de los ensayos no destructivos.
- ✓ Que los ensayos no destructivos son una herramienta de inspección efectiva y eficiente, que permiten diagnosticar el estado de equipos sin deteriorarlos, pudiendo ser aplicados durante las diferentes etapas de fabricación, montaje y en operación de los equipos industriales.
- ✓ Las diferentes técnicas que envuelven a los ensayos no destructivos, aplicadas conveniente y oportunamente, previenen fallas que protegen la vida humana.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cabrera, A. (Octubre de 2013). *Scribd Inc.* Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/258393714/Historia-de-Las-Pruebas-No-Destructivas>.
- [2] *PND Soluciones integrales*. (2019). Obtenido de <http://pndsolucionesintegrales.com.mx/que-son-las-pruebas-no-destructivas/>
- [3] *SCI Control & Inspeccion* (2018). Obtenido de <https://scisa.es/ensayos-no-destructivos-y-laboratorio-metalurgico/ensayos-no-destructivos/>
- [4] Charles J. Hellier (2003). *HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION*. United States of America: The McGraw-Hill Companies.
- [5] Asociación Española de ensayos no destructivos (2016). *Introducción a los END*. España.

## ANEXOS

### ANEXO A: PRÁCTICA DE LABORATORIOS

#### PRÁCTICA PROPUESTA: USO DEL EQUIPO DE CORRIENTES PARÁSITAS (NORTEC 600)

##### Equipo a utilizar

Para esta práctica se necesitará:

- El equipo para ensayos no destructivos por corrientes de Eddy, marca Olympus modelo NORTEC 600.



Fig. A.1. Panel frontal del NORTEC 600.

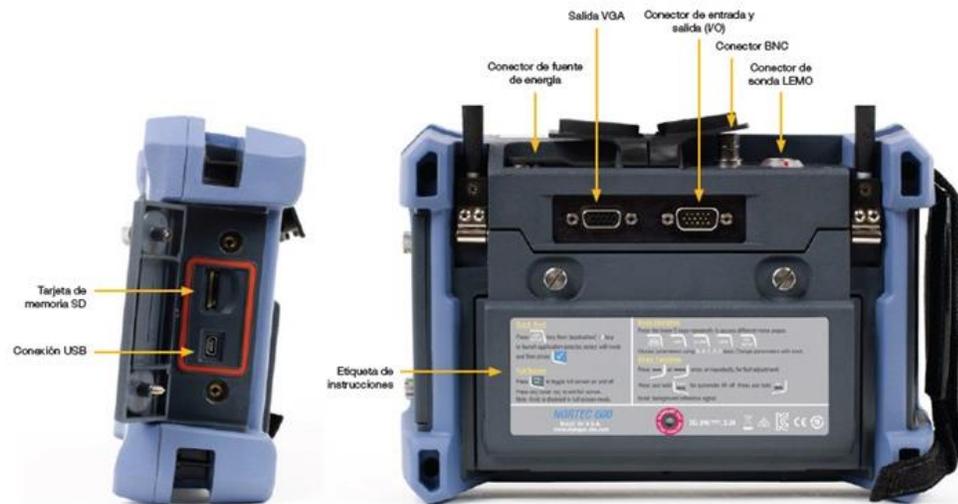


Fig. A.2. Panel lateral y panel trasero del NORTEC 600.

El detector de defectos por corrientes de Foucault NORTEC 600 es capaz de generar señales de corrientes de Foucault, altamente visibles y contrastantes, bajo cualquier condición de iluminación.

La interfaz reconfigurada del detector de defectos por corrientes de Foucault NORTEC 600 se dota de la capacidad de navegación intuitiva (operada por la rueda de ajuste), y la combina con estructuras de menús simples y teclas de acceso directo altamente eficientes.

El detector de defectos por corrientes de Foucault NORTEC 600 ofrece una amplia gama de funcionalidades innovadoras, entre las cuales destacan: el menú de selección de aplicaciones, la visualización “todo en uno”, las lecturas en tiempo real y la calibración de señales en modo de congelación. Esto permite asegurar la rapidez y facilidad de las inspecciones llevadas a cabo por cualquier nivel de operador:

- Conformidad con la norma europea EN-15548,
- Estructura resistente para todo entorno ambiental,
- Imágenes nítidas y colores vibrantes,
- Interfaz intuitiva con ajustes predefinidos para cada aplicación, y
- Solución completa para la creación de informes y almacenamiento.

## Características y funciones claves

- Diseño conforme con el grado de protección IP66,
- Conformidad con la norma europea EN-15548,
- Tiempo de funcionamiento de la batería (hasta diez horas),
- Pantalla VGA de alta iluminación y 5.7 pulg,
- Opción de pantalla completa en cualquier modo de visualización,
- Filtros optimizados para el modo de escáner de rotación,
- Interfaz intuitiva con ajustes predefinidos en el menú de selección de aplicación,
- Página de configuración de todos los ajustes,
- Capacidad de frecuencia de 10 Hz a 12 MHz,
- Balance interno automatizado (conector BNC),
- Hasta dos lecturas en tiempo real,
- Combinación real completamente automática,
- Capacidad de almacenamiento de hasta 500 archivos (programas y datos), y
- Vista previa de archivos.

<p>Dos conectores de sonda</p> 	<p>Todos los modelos son suministrados con el conector universal de 16 pines y, también, con un conector BNC para sondas de configuración absoluta. Simplemente, se selecciona el conector en la interfaz del equipo. Cuando la lectura se ejecuta desde el conector BNC, el equipo desarrolla un balance interno para una operación sin complicaciones.</p> <p>El conector de 16 pines también soporta la tecnología de sondas que reconoce automáticamente las sondas y predetermina los valores en el equipo para configuraciones más rápidas.</p>
--	---

## Componentes

Tipo de sonda	Descripción
<p>Sondas de plástico para escáneres rotativos</p> 	<p>Las sondas de escáneres rotativos se usan con dispositivos mecánicos para hacer girar la sonda de forma automática en la perforación. Estas sondas usan bobinas diferenciales de reflexión con frecuencias de funcionamiento típicas de 100 kHz a 2 MHz. Soportan tolerancias reducidas y son muy fiables.</p>
<p>Sondas manuales para inspeccionar perforaciones de pernos/remaches</p> 	<p>Las sondas manuales para la inspección de perforaciones de remaches cuentan con bobinas ubicadas en ángulos de 90° en función de la longitud del eje de la sonda. Las sondas giran de forma manual dentro de las perforaciones de los remaches retirados. Los diámetros estándar (fraccionarios y métricos) y personalizados están disponibles para las bobinas de configuración absoluta y diferencial.</p> <p>Las sondas manuales estándar para perforaciones de remaches operan entre 50 y 500 kHz.</p>
<p>Sondas para soldaduras</p> 	<p>Las sondas para soldaduras están diseñadas para efectuar inspecciones en soldaduras de materiales ferrosos. Estas representan una mejor alternativa que aquellas inspecciones por partículas magnéticas, las cuales requieren una preparación (limpieza) del área antes de iniciar la inspección.</p>

<p>Sonda de eje angular para superficies</p> 	<p>Eje de acero inoxidable con punta angular de 30 o 45° Diseñada para la detección de grietas superficiales en general, esta sonda está disponibles en una variedad de longitudes y con diferentes configuraciones de bobinas y caídas; brinda también diversas opciones de conectores.</p>
--	--

Tipo de sonda	Descripción
<p>Sondas puntuales</p> 	<p>Las sondas puntuales se utilizan para descubrir defectos tanto en la superficie como debajo de ella. El amplio diámetro de su bobina y su funcionamiento de baja frecuencia son características ideales para escanear áreas de gran dimensión y proporcionar un dimensionamiento del defecto detectado mejorado; por lo general, igual a la mitad del diámetro de la sonda.</p>
<p>Sondas de 90° para inspección superficial</p> 	<p>El diseño de 90° de las sondas en ángulo de 90° para superficies permite inspeccionar áreas con espacio limitado/restringido. Pertenecientes a la familia de sondas desmontables de eje curvo para superficies de acero inoxidable, estas sondas de lápiz/lapicero óptico cuentan con bobinas pequeñas y una carcasa de diámetro pequeño construida para frecuencias más altas. Se suelen usar para detectar grietas por rotura en superficies.</p>
<p>Sondas rectas para inspección superficial</p> 	<p>Estas sondas presentan un eje de acero inoxidable. Están desarrolladas para detectar grietas superficiales en general. Las sondas están disponibles en una variedad de longitudes y con diferentes configuraciones de bobinas; brindan también diversas opciones de conectores.</p>

<p>Sondas de eje flexible para inspeccionar superficies</p> 	<p>El eje flexible de cobre de estas sondas se puede adaptar a varias formas. Diseñadas para la detección de grietas superficiales en general, estas sondas flexibles están disponibles en una variedad de longitudes y con diferentes configuraciones de bobinas y caídas; brindan también diversas opciones de conectores.</p>
---	--

### Visualización en modo de pantalla completa

Además de su impresionante iluminación y de sus dimensiones, la pantalla VGA del detector de defectos por corrientes de Foucault NORTEC 600 también cuenta con un nuevo modo de pantalla completa que puede ser activado con tan sólo pulsar una tecla.

Disponible para todas las aplicaciones y en todos los modos de visualización, el modo de pantalla completa es muy útil cuando se analizan las señales durante un período prolongado.

Según el modelo del equipo, es posible seleccionar entre los siguientes modos de visualización:

- Plano de una sola impedancia,
- Plano de impedancia dual,
- Barrido (*strip chart* o gráfico de barras),
- Pantalla dividida (barrido + impedancia),
- Cascada, y
- Visualización “todo en uno” hasta con 3 trazas (señales) configurables.

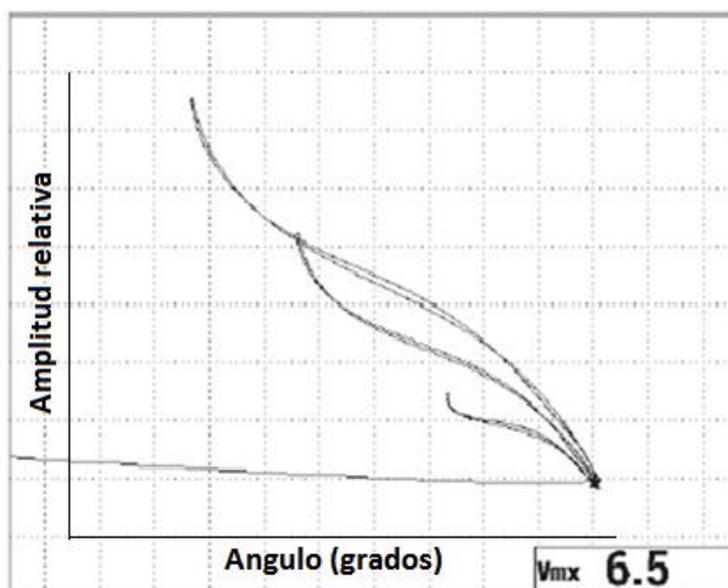


Fig. A.3 Detección de defectos en la superficie.

### Especificaciones básicas del NORTEC 600

<b>Carcasa</b>	
Dimensiones globales (ancho x alto x profundidad)	236 x 167 x 70 mm (9.3 x 6.57 x 2.76 pulg)
Peso	1.7 kg (3.7 lb), incluyendo la batería de iones de litio.
Estándares normativos o directivas	EN-15548, CE, WEEE, FCC (EE. UU.), IC (Canadá), RoHS (China), RCM (Australia y Nueva Zelanda). Se ofrece una versión que cumple con los requisitos de la directiva ATEX. **Para obtener más información, visite nuestro sitio web <a href="http://www.olympus-ossa.com">www.olympus-ossa.com</a> .
Requisitos de energía	Alimentación principal de CA: de 100 V CA a 120 V CA, de 200 V CA a 240 V CA, de 50 Hz de 60 Hz.
Entradas y salidas	Puerto periférico USB 2.0; puerto de salida VGA analógica estándar; puerto de entrada y salida (I/O)— macho— de 15 pines con 6 salidas analógicas y 3 salidas de alarmas.
<b>Condiciones ambientales</b>	
Temperatura de funcionamiento	De -10 °C a 50 °C
Temperatura de almacenamiento	De -20 °C a 60 °C [con baterías] y de -20 °C a 70 °C, sin baterías
Grado de protección IP	Diseño conforme con el grado de protección IP66.
<b>Batería</b>	
Tipo de batería	8 baterías de iones de litio recargable o baterías alcalinas opcionales de tamaño AA
Autonomía de la batería	Hasta diez (10) horas bajo condiciones de uso estándar; entre seis (6) y ocho (8) horas cuando se utiliza un escáner de rotación.
<b>Pantalla</b>	
Tamaño de pantalla (ancho x altura, diagonal)	117.4 x 88.7 mm, 146.3 mm (4.62 x 3.49 pulg, 5.76 pulg)

Tipo de pantalla	VGA completa en color (640 × 480 píxeles), con tecnología LCD (pantalla de cristal líquido) transreflectiva.
Modos de pantalla	Visualización normal o completa; 8 paletas de colores.
Cuadrículas y herramientas de visualización	Opción de 5 cuadrículas; marco de definición (visualización de un solo trazo)
<b>Conectividad y memoria</b>	
Software de PC	Software NORTEC PC, incluido en el paquete de serie del detector de defectos NORTEC 600. El software permite visualizar los archivos almacenados e imprimir los informes (registros).
Almacenamiento de datos	Hasta 500 archivos con capacidad de vista previa (seleccionable).
<b>Interfaz (comunicación)</b>	
Idiomas	Inglés, español, francés, alemán, italiano, japonés, chino, ruso, portugués, polaco, neerlandés, checo, húngaro, sueco y noruego.
Aplicaciones	Menú "Selección de aplicaciones" para una rápida y fácil configuración. Tecla de acceso directo para el despegue automático. Controles principales ambidiestros.
Lecturas en tiempo real	Selección de hasta 2 lecturas en tiempo real que ofrecen las características de medición de la señal (selección de 5 medidas de amplitud y 1 medida de ángulo).
<b>Especificaciones sobre las corrientes de Foucault (para todos los modelos NORTEC)</b>	
Tipos de sondas	Absoluta y diferencial en la configuración puente o reflexión. El equipo es totalmente compatible con las sondas NORTEC POWERLINK <sup>®</sup> , y también con otras sondas principales y accesorios auxiliares.
Conectores de sonda	Conector LEMO <sup>®</sup> de 16 pines y conector BNC con balance interno automatizado para el conector BNC (sondas de configuración absoluta).
Banda de frecuencias	De 10 Hz a 12 MHz
Ganancia	De 0 dB a 100 dB, en incrementos de 0.1 o 1 dB.
Rotación	De 0 a 359.9°, en incrementos de 0.1 o 1°.
Barrido	Variable de 0.005 s a 10 s por división (total de 13.3 divisiones con la cuadrícula fina).
Filtros	Paso bajo: de 10 a 2000 Hz y ancho de banda. Paso alto: desactivado o de 2 a 1000 Hz, seleccionable por el usuario en un tipo de filtro constante. Punto cero continuo (filtro de baja frecuencia HP) 0.2 Hz; 0.5 Hz; 1.0 Hz.
Excitación de la sonda	BAJA, MEDIA y ALTA (2 V, 5 V, 8 V).
Permanencia o supresión de visualización	Supresión de visualización de 0.1 a 60 s; y permanencia de 0.1 s a 10 s.
Tipos de alarma disponibles	Tres alarmas simultáneas. Las opciones incluyen: CUADR (forma rectangular), POLAR (forma circular), ÁREA (forma triangular), BARRI (basada en el tiempo), CONDUCTIVIDAD, y ESP. REVESTIM.
<b>Conductividad (modelos NORTEC 600C, NORTEC 600S y NORTEC 600D)</b>	
Frecuencia	Entre 60 y 480 kHz
Especificaciones de la conductividad digital	Visualización desde un 0.9 % a un 110 % en IACS o desde 0.5 hasta 64 MS/m. Precisión de ±0.5 % en IACS — de 0.9 % a 62 % en IACS—, y de ±1.0 % para los valores sobre el 62 %. Cumple o supera las especificaciones BAC 5651. La fiabilidad de las mediciones depende de la frecuencia de la

	sonda, el rango de calibración y el espesor del revestimiento.
Espesor de revestimiento no conductor	Precisión nominal del espesor de revestimiento no conductor de $\pm 0.025$ mm ( $\pm 0.001$ pulg) a partir de un rango de 0 mm a 0.254 mm (de 0.00 a 0.010 pulg) y de $\pm 0.50$ mm a partir de un rango de 10 mm a 0.5 mm (de 0.01 a 0.020 pulg) índice. La precisión depende del rango de conductividad, la frecuencia de la sonda y el rango de la calibración.
Escáneres (modelos NORTEC 600S y NORTEC 600D)	
Compatibilidad del escner	Funcionamiento con escáneres Olympus (MiniMite, Spitfire, RA-2000 y PS-5) y con otros escáneres de proveedores importantes, a una velocidad de rotación de 120 r/mín, a 3000 r/min.
Frecuencia dual (NORTEC 600D)	
Ajuste de frecuencia (modo de frecuencia dual)	Dos frecuencias completamente independientes, que operan por inyección simultánea.
Opción MIX (combinación)	F1 - F2, F1 + F2, y combinación real automática.

## PRÁCTICA PROPUESTA: CONOCIENDO EL EQUIPO DE CORRIENTES PARÁSITAS (PCE-USC 30)

### Equipo a utilizar

Para esta práctica se necesitará:

- El equipo para ensayos no destructivos por corrientes de Eddy, Defectoscopio PCE-USC 30.



Fig. A.4, Panel frontal del PCE-USC 30



- 1) Conector para sonda de corrientes de Foucault (ECP) de una sola bobina (paramétrica);
- 2) Conector universal para sonda de corrientes de Foucault (ECP) y escáner de corrientes de Foucault;
- 3) Conector de codificador (ENC)

Fig. A.5. Panel trasero del PCE-USC 30.

EL detector de defectos por corrientes de Foucault portátil PCE-USC 30 (en lo sucesivo, "detector de defectos"), está destinado al estudio de los principios de funcionamiento del detector de defectos y de sus instrucciones de uso, e incluye la información sobre la aplicación, las especificaciones, el principio y la estructura de funcionamiento, las instrucciones de uso y también otra información que permita una aplicación completa de las capacidades técnicas del detector de defectos.

El detector de defectos está destinado a la comprobación manual y mecanizada mediante el método de corrientes de Foucault de la presencia de defectos superficiales y subsuperficiales, como la discontinuidad del material (grietas, solapamientos, fisuras, grietas finas, etc.), para la medición de la conductividad y el espesor.

El detector de defectos se puede aplicar para la comprobación de productos durante su fabricación y funcionamiento por parte de los servicios de END y los laboratorios de las empresas que se encargan del control de calidad de los productos.

## Teclas de función

Tecla	Función
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pone automáticamente en posición horizontal una señal visualizada desde el despegue (o desde cualquier interferencia)</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambia el paso de variación del parámetro</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta el parámetro seleccionado</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambia la frecuencia</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desplaza hacia arriba en el menú</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuye el parámetro seleccionado;</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cancela la selección;</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra;</li> <li>• Al pulsar la tecla se visualiza la versión del firmware en el menú "AJUSTES";</li> <li>• Borra el punto en el menú "CALIBRACIÓN";</li> <li>• Congela la pantalla en el menú de prueba</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desplaza hacia abajo en el menú;</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confirma la selección;</li> <li>• En el modo de edición del nombre - selecciona un dígito/letra;</li> <li>• Al pulsar la tecla en el menú "TEST" se guarda la configuración actual como predeterminada (si el elemento actual está por encima del elemento ALARM);</li> <li>• Añadir punto en el menú "CALIBRACIÓN"</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso rápido al menú "TEST"</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso rápido al menú "AJUSTES"</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso rápido al menú "VER".</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso rápido al menú "MEMORIA";</li> <li>• Confirma el almacenamiento del nombre introducido del archivo o carpeta mientras se opera en el menú "MEMORIA"</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso rápido al menú "CALIBRACIÓN".</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajusta automáticamente los parámetros del ECP de bobina simple (paramétrico) con la entrada simple conectada</li> <li>• Ajusta el número de rondas mientras se opera con el escáner rotativo de corrientes de Foucault</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enciende/apaga el instrumento</li> </ul>

## Esquema estructura del detector de defectos

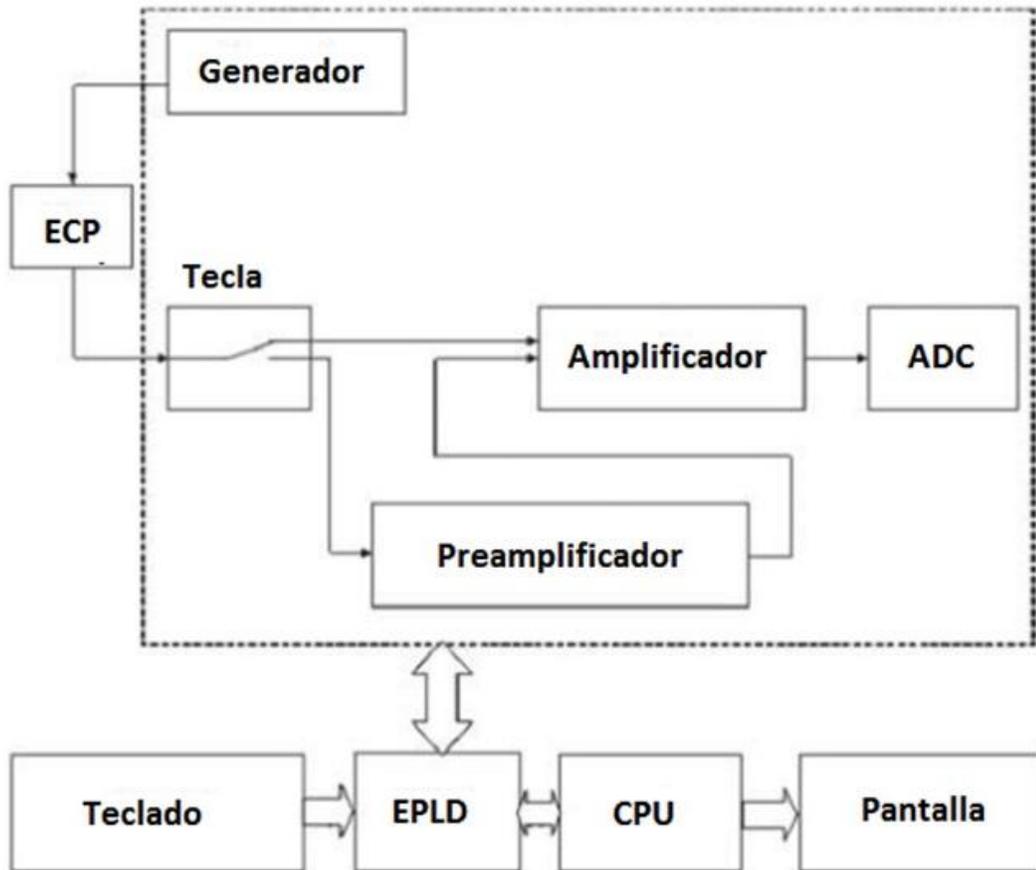


Fig. A.6. Estructura del PCE-USC 30.

Estructuralmente, el detector de defectos consta de:

- Carcasa y placa de cubierta con el teclado de membrana, indicadores de ALARMA y sobrecarga, puerto Ethernet para la conexión al PC, puerto USB para la conexión de la tarjeta flash externa, conector del cargador, auriculares y micrófono;
- Conector, conector ECP;
- Pantalla TFT;
- Placas de procesador y memoria;
- Placa analógica;
- Batería.

## **PRÁCTICA PROPUESTA: USO DEL EQUIPO DE CORRIENTES PARÁSITAS**

### **Material a utilizar**

Se empleará una pletina de acero al carbono de 20 cm de largo x 10 cm de ancho x 1 cm de profundidad, a la cual deberá hacerse una muesca de 1 mm, otra de 2 mm y otra de 3 mm de profundidad, con un ancho de 3 mm en todos los casos.

### **Equipo a utilizar**

Para esta práctica se necesitará:

- La bobina de corriente alterna para materiales ferrosos,
- El equipo de corrientes parásitas,
- El cable de conexión entre el equipo y la bobina,
- Un paño para limpieza para la pletina,
- Martillo y punzón, y
- Vernier.

### **Procedimiento**

- 1) Limpiar muy bien la pletina de polvo, grasa, etc.
- 2) Encender el equipo, siguiendo las instrucciones del manual de operaciones que incluye el fabricante, paso a paso; tomar en consideración que, sin este requisito, el ensayo puede resultar inexacto e inadecuado [1].
- 3) Comprobar el funcionamiento de la bobina con el equipo y ajustarlo debidamente, de acuerdo al manual de operaciones, para que quede listo para llevar a cabo el ensayo.
- 4) Colocar la bobina sobre la probeta, de manera que quede vertical al plano de la misma.

- 5) Deslizar la bobina, sin permitir que se separe de la pieza, viendo el resultado que se registra en el equipo. Tomar muy en consideración que el deslizamiento de la bobina debe ser firme, pero sin aplicar mucha fuerza sobre la bobina.

## **Resultados**

- 1) Anotar toda información que proporcione el equipo y los ajustes que se hagan en el transcurso del ensayo, siguiendo las instrucciones del manual.
- 2) Elaborar un reporte, enumerando todos los pasos del procedimiento descritos en el procedimiento, además anote la fecha de práctica del ensayo.
- 3) Determinar claramente el resultado de todas las discontinuidades que presenta la pieza ensayada por Corrientes de Eddy.
- 4) Anotar todas las incidencias y observaciones durante el ensayo.
- 5) Finalmente, anotar el nombre y firma de los integrantes del grupo que desarrollo el ensayo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

[1] [https://www.pce-instruments.com/espanol/api/getartfile?\\_fnr=1509089&\\_dsp=inline](https://www.pce-instruments.com/espanol/api/getartfile?_fnr=1509089&_dsp=inline)

## **PRÁCTICA PROPUESTA: INSPECCIONAR GRIETAS EN LA SUPERFICIE DE UNA PLACA DE ACERO PARA HERRAMIENTAS**

### **Equipo y materiales a utilizar**

- Equipo de corrientes inducidas,
- Sondas de superficie absoluta,
- Muestra de calibración y
- Muestra que contiene grietas.

### **Procedimiento**

- 1) Para frecuencias de prueba de 20 kHz, 100 kHz y 1 MHz, utilizar la sonda adecuada.
- 2) Equilibre el instrumento con la sonda en la muestra de calibración y configure la fase de manera que la señal de despegue esté en la dirección X negativa cuando la sonda se levanta de la muestra.
- 3) Seleccione una sensibilidad adecuada. Observe las imágenes de señal de los defectos y las señales del ruido material.
- 4) Compárelos con los de la muestra de calibración.

### **Resultados**

Dibuje las imágenes de la señal XY que se ven en el monitor.

Responda lo siguiente según los resultados observados:

- 1) ¿Cómo cambiaron las señales de ruido y defectos del material en fase en relación con el despegue?
- 2) ¿Con qué frecuencia cambiaron las señales?
- 3) ¿Cómo cambió la señal de la corriente parásita con un defecto de Calibración?
- 4) ¿Qué variaciones de material o de tecnología causaron el ruido del material?





Atentamente

Lic. Luis Ramírez  
Supervisor Cuentas Claves

Ing. Ana del Carmen Vásquez  
Ejecutiva de cuentas Claves

## ANEXO C: FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO



### Defectoscopio PCE-USC 30

#### PCE-USC 30

El defectoscopio se usa para la comprobación no destructiva de materiales. El defectoscopio le permite hacer visibles fallas en la superficie y cerca de la superficie. La medición por corriente de Foucault es un procedimiento eléctrico para medir sobre materiales conductores. En la medición por corriente de Foucault se sitúa una sonda con una tensión alterna sobre una pieza eléctricamente conductora. Las líneas del campo magnético generadas perpendicularmente a la superficie de la pieza inducen la corriente de Foucault de forma circular y cercana a la superficie, lo que a su vez produce campos magnéticos secundarios en la pieza de ensayo. Los campos secundarios actúan contra los campos primarios y los cambian con relación a la amplitud y la fase, y esto se puede medir. Las inhomogeneidades y las fallas de las piezas cambian la trayectoria de la corriente de Foucault y la permeabilidad de la pieza de ensayo, y por tanto también los campos secundarios. Todo esto permite localizar y clasificar los defectos. El defectoscopio ha sido diseñado para realizar ensayos no destructivos, y también se puede usar para la medición de conductividad y determinar el espesor de revestimiento.

El diseño ergonómico del defectoscopio, el peso inferior a 1 kg, la duración de la batería de aprox. 8 h, una amplia selección de sondas para cubrir un rango de frecuencia hasta 3,5 MHz así como un software para realizar documentaciones son las condiciones para realizar un trabajo efectivo y cómodo. El defectoscopio es un equipo ideal para la comprobación no destructiva de piezas en los sectores de la aeronáutica, como por ejemplo, las aspas de turbinas u orificios, los ensayos de soldaduras y fisuras, la comprobación de tanques y tuberías en las industrias químicas, petroleras o la industria del gas, o también en los sectores de la ingeniería mecánica para el control de productos semifabricados o componentes individuales. También es posible comprobar las propiedades de un material por comparación estructural, lo que permite realizar una medición comparativa.

- ✓ Amplio rango de frecuencia
- ✓ Gran pantalla TFT de 4.3 pulg
- ✓ Ensayo no destructivo de la superficie
- ✓ Clasificación del material
- ✓ Rango de frecuencia hasta 3.5 MHz
- ✓ Duración de las baterías: ~8 h.

Especificaciones técnicas	
Rango de frecuencia	0.01 ... 16000 kHz
Alimentación sonda	0, 5, 1, 2, 4, 6 V
Desfase de la seña	0 ... 360 °
Velocidad de muestreo	0 ... 10 kHz
Duración de la señal en pantalla	0 / 0,5 / 1 / 2 / 3 / 4 segundos
Alarma	Circular Línea horizontal Sector Cut-off
Pantalla	TFT a color
Dimensiones pantalla	4,3 " (diagonal)
Resolución pantalla	800 x 480 píxeles
Ajustes amplificación	0 ... 100 dB
Filtros	Filtro Lowpass (1 ... 4000 Hz) Filtro Highpass (1 ... 4000 Hz) Filtro de banda Filtro diferencial Filtro valor promedio
Intervalo promedio entre errores de medida	4000 horas
Alimentación	Acumulador de 12 V
Capacidad del acumulador	4500 mAh
Tiempo operativo con cada carga	>8 horas
Temperatura operativa	-20 ... +45 °C
Peso	<0,9 kg
Dimensiones	230 x 135 x 98 mm

Contenido del envío	
1 x Defectoscopio PCEUSC 30	
1 x Sonda de corriente Foucault	
1 x Estándar de calibración	
1 x Cable para la sonda	
1 x Cable de conexión al PC	
1 x Sonda de medición de conductividad	
1 x Acumulador	
1 x Cargador para el acumulador	
1 x Maletín de transporte	
1 x Manual de instrucciones	