



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POSTGRADO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y
CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**ESTUDIOS DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRAS DE LA
ALEACIÓN API 5L -52 SUMERGIDAS EN UN MEDIO
HIDROGENADO**

**Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al título de Ingeniero Metalurgico
Por la Bra. Raiza Maria Ortiz Domínguez.**

Caracas, Mayo de 2010



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POSTGRADO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y
CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**ESTUDIOS DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRAS DE LA
ALEACIÓN API 5L -52 SUMERGIDAS EN UN MEDIO
HIDROGENADO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Freddy Fraudita

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO METALURGICO
POR LA BRA. RAIZA MARIA ORTIZ DOMÍNGUEZ**

Caracas, Mayo de 2010



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

Ciudad Universitaria de Caracas – Patrimonio Cultural de la Humanidad

Telef. 6051027/1033 - Fax. 6051515 www.ucv.ve/metalurgia.htm Caracas-Venezuela



ACTA

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado titulado:

“ESTUDIOS DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRAS DE LA ALEACIÓN API 5L X52 SUMERGIDAS EN UN MEDIO HIDROGENADO”

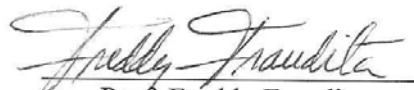
Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela por la

Br^a Raiza Ortiz D.

dejan constancia de lo siguiente:

Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrando que el mismo es suficiente contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los doce días del mes de Mayo de dos mil diez.


Prof. Freddy Fraudita
Tutor Académico


Prof. Carlos González
Jurado


Prof. Sonia Camero
Jurado



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
Ciudad Universitaria de Caracas – Patrimonio Cultural de la Humanidad
Telef. 6051027/1033 - Fax. 6051515 www.ucv.ve/metalurgia.htm Caracas-Venezuela



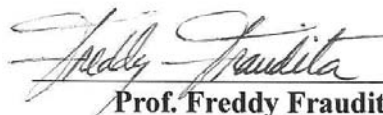
VEREDICTO

Los suscritos, Miembros del Jurado examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela por la **Br^a Raiza Ortiz D., CI. 14.173.120**, el cual lleva por título:

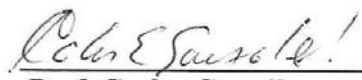
**“ESTUDIOS DE CONDUCTIVIDAD EN MUESTRAS DE LA ALEACIÓN
API 5L X52 SUMERGIDAS EN UN MEDIO HIDROGENADO”**

decidimos conferirle una **MENCIÓN HONORÍFICA** como premio al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de esta Tesis de Grado.

En fe de lo cual se levante la presente Acta en Caracas, a los doce días del mes de Mayo de dos mil diez, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente actuó como Coordinador del Jurado examinador el Prof. Freddy Fraudita.



Prof. Freddy Fraudita
Tutor - Coordinador



Prof. Carlos González
Jurado



Profa. Sonia Camero
Jurado

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso por guiar siempre mis pasos y darme salud y fortaleza para el logro de mis metas.

A mi madre por toda la confianza y apoyo incondicional que siempre me ha brindado.

A la memoria de mi padre por inculcarme principios y valores para hacer de mi una mujer de bien.

A mis hijos Dany y Félix por ser lo más hermoso que la vida me ha dado.

A mis hermanos: Luis, Diego, Jesús, José, Félix, Guiomar, Victoria, Nohemi, Iván y Aida por apoyarme en los momentos más difíciles.

A mi esposo porque a pesar de todo siempre estuvo a mi lado apoyandome.

A mis amigos: Francia, Franklin, Dalitza, Eddy, Luz, Pedro, Alejandro, Frank, William y Luis por su valiosa colaboración y por compartir conmigo el día a día de esta investigación.

A los Profesores y Tutores Freddy Fraudita y Carlos González por compartir sus conocimientos conmigo y darme la oportunidad de realizar esta investigación.

A la Profesora Maribel Suárez y al Profesor Edwin Carrasquero por su valiosa colaboración.

Un especial agradecimiento a mi Profesora y Amiga Sonia Camero por alentarme a seguir con mi carrera a pesar de los obstáculos.

A la gloriosa Universidad Central de Venezuela “la casa que vence las sombras y patrimonio cultural de la humanidad”, especialmente a la escuela de Ingeniería y Ciencia de los materiales por permitirme formar como ingeniero.

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a la memoria de mi padre. Gracias por
todo el amor y la ternura que me diste,
vivirás eternamente en
mi corazón.*

*A mi madre por la fé que siempre tuvo en mí. Llenaste mi
vida de esperanza y me enseñaste a ser paciente
y perseverar por el logro de
mis objetivos.*

*A mis maravillosos hijos por darme la inspiración y la
fuerza necesaria para alcanzar esta meta y por
llenar mi vida de luz y
de alegría.*

RESUMEN

Raiza M. Ortiz D.

ESTUDIOS DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN MUESTRAS DEL ACERO API 5L-X52 SUMERGIDAS EN UN MEDIO HIDROGENADO

**Tutor Académico: Prof. Freddy Fraudita. Tesis, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2010, pág.**

Palabras claves: acero API 5L-X52, ampollamiento por hidrogeno, conductividad eléctrica, método de corrientes inducidas, método cuatro puntas.

En el presente trabajo se estudiaron los cambios de conductividad eléctrica que presenta el acero API 5L-X52 cuando es sometido a un medio hidrogenado a diferentes tiempos de exposición.

Las muestras a objeto de estudio fueron obtenidas del trabajo de investigación realizado por Camero⁽³⁾ y corresponde a una tubería de línea del acero API 5L-X52 a partir de las cuales se fabricaron muestras de tracción de sección plana. Estas muestras fueron sometidas a tratamientos térmicos de temple, recocido, normalizado y expuestas al daño por hidrógeno a tiempos de 0, 1, 3 y 6 horas.

Las muestras ensayadas al daño por hidrogeno y traccionadas fueron evaluadas mediante ensayos no destructivos a través de mediciones de conductividad eléctrica del material. Para medir la conductividad eléctrica se utilizaron dos métodos de ensayos: método de corrientes inducidas por reflexión y el método de cuatro puntas. La finalidad de la aplicación de estos ensayos es verificar el cambio de conductividad eléctrica producido por el daño generado a diferentes tiempos de carga en el material de entrega, y el tratado térmicamente con estas técnicas.

Los resultados arrojados por el estudio determinaron que es posible evaluar el daño por hidrógeno manifestado por la presencia de ampollas en el acero API 5L X52, mediante el método de las corrientes inducidas por reflexión y el método de las cuatro puntas.

De igual manera se puede determinar que la conductividad eléctrica disminuye más pronunciadamente en las muestras que han sido sometidas a un tratamiento térmico de temple y varían de manera similar para la recocidas y normalizadas.

Por otro lado es importante señalar que estos resultados son coherentes con los obtenidos en otras investigaciones ⁽³⁾, donde evaluaron el daño utilizando otras técnicas como microscopía óptica y electrónica.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	3
2.1. DAÑO POR HIDRÓGENO	3
2.1.1. Definición	3
2.1.2. Clasificación del daño por hidrógeno	4
2.1.3. Mecanismos del agrietamiento por hidrógeno	7
2.1.4. Factores externos e internos que influyen en la susceptibilidad al daño por hidrógeno	9
2.1.5. Características del daño inducido por hidrógeno	12
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN DE ACERO API 5L X-52	15
2.2.1. Composición Química	16
2.2.2. Propiedades Mecánicas	16
2.3. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	16
2.3.1. Conductividad Eléctrica	18
2.3.2. Control de la Conductividad Eléctrica	20
2.3.3. Efecto de la Temperatura en la Conductividad Eléctrica	20
2.3.4. Efectos de los Defectos de la Red	21
2.4. MÉTODO DE LAS CUATRO PUNTAS O DE KELVIN	21
2.5. MÉTODOS DE CORRIENTES INDUCIDAS	23
2.5.1. Aplicaciones de la técnica de corrientes inducidas	24
2.5.2. Tipos de bobina o sensores	26

2.5.2.1. Bobinas de superficie	26
2.5.2.2. Bobinas exteriores	27
2.5.2.3. Bobinas para interiores	28
2.5.2.4. Bobina única	28
2.5.2.5. Bobinas dobles	29
2.5.2.6. Bobinas diferenciales	30
2.5.3. Parámetros que dependen de la conductividad eléctrica	30
2.5.4. Sensibilidad del método de corrientes inducidas	32
2.5.4.1. Impedancia de la bobina (Z)	32
2.5.4.2. Permeabilidad magnética	36
2.5.4.3. Factor de distancia bobina-pieza (lift-off)	39
2.5.4.4. Factor de relleno (fill factor)	44
2.5.4.5. Efectos de borde o frontera (Edge Effect)	46
2.5.4.6. Efecto piel (Skin Effect)	47
2.5.4.7. Efecto de los materiales Ferromagnéticos	50
CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	52
3.1. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS	52
3.2. ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL DE ENTREGA	54
3.3. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. APLICACION DE LOS MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	55
3.3.1. Método de Corrientes Inducidas	55
3.3.2. Método de las Cuatro Puntas	60

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
4.1. MÉTODO DE CORRIENTES INDUCIDAS	63
4.2. MÉTODO DE LAS CUATRO PUNTAS	73
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	82
CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.	Ilustración esquemática del efecto del hidrógeno en el inicio de una grieta.	8
Fig.2.	Morfología de las grietas en un ambiente de H ₂ S acuoso	12
Fig.3.	Esquema del proceso de escalonamiento de las grietas	15
Fig.4.	Efecto sobre el electrón al paso por las distintas formaciones de red. a) Cristal perfecto b) Cristal a alta temperatura c) Cristal con defecto de red.	21
Fig.5.	Circuito usado para medir resistividad eléctrica	22
Fig.6.	Representación esquemática de la técnica de corrientes inducidas	23
Fig.7.	Bobinas de superficie	27
Fig.8.	Bobinas exteriores	27
Fig.9.	Bobinas interiores	28
Fig.10.	Arreglo de bobina única	29
Fig.11.	Arreglo para medición absoluta de bobinas doble	29
Fig.12.	Arreglo de bobinas diferenciales. a) Comparación externa b)Autocomparación	30
Fig.13.	Representación vectorial de la Impedancia	33
Fig.14.	Curva en el plano de impedancia para piezas con diferente conductividad eléctrica	34
Fig.15.	Circuito equivalente del sistema bobina – pieza	35
Fig.16.	Curvas de magnetización para Hierro	37
Fig.17.	Determinación de la permeabilidad magnética (máxima) para un material Ferromagnético	37
Fig.18.	Curva $\mu - H$ para un material ferromagnético	38
Fig.19.	Diagrama de impedancia y efecto de Lift – Off	40

Fig.20.	Variación de las corrientes de Eddy en función del porcentaje de reducción en frío.	42
Fig.21.	Variación de la de austenita en función del porcentaje de reducción en frío	43
Fig.22.	Variación de Lift off en función del porcentaje de reducción en frío	43
Fig.23.	Efecto del Factor de Llenado	44
Fig.24.	Efecto de Borde	46
Fig.25.	Variación de la intensidad de corriente con la profundidad	47
Fig.26.	Profundidad normalizada de penetración, como función de la frecuencia y para varios materiales	49
Fig.27.	Organigrama general del procedimiento experimental propuesto	52
Fig.28.	Probeta de tracción proporcional a la muestra estándar	53
Fig.29.	Zona de inspección en las probetas estudiadas	53
Fig.30.	Equipo de corrientes inducidas	56
Fig.31.	Muestras estudiadas	57
Fig.32.	(a) Medición de la variación de las corrientes de Eddy y (b) Saturación magnética de la probeta	58
Fig.33.	a) Aplicación de corrientes inducidas y b) Valores observados en la pantalla del equipo.	59
Fig.34.	Variación en el diagrama de impedancia debida a diferentes tiempos de carga.	59
Fig.35.	Montaje para medición por el método de cuatro puntas.	60
Fig.36.	Esquema del montaje del método de las cuatro puntas.	61
Fig.37.	Variación de las Corrientes de Eddy en función del Tiempo de carga por el método de Corrientes Inducidas. Muestras 1.	65
Fig.38.	Variación de las Corrientes de Eddy en función del Tiempo de carga por el método de Corrientes Inducidas. Muestras 2.	66
Fig.39.	Variación de las Corrientes de Eddy en función del Tiempo de carga por el método de Corrientes Inducidas. Muestras 3.	66

Fig.40.	Fotomicrografías por microscopia óptica del acero API 5L X52 en condición de entrega. Se observan las ampollas a los diferentes tiempos de carga	69
Fig.41.	Fotomicrografías por microscopia óptica del acero API 5L X52 normalizado. Se observan las ampollas a los diferentes tiempos de carga	70
Fig.42.	Fotomicrografías por microscopia óptica del acero API 5L X52 recocido Se observan las ampollas a los diferentes tiempos de carga	71
Fig.43.	Fotomicrografía por microscopia óptica del acero API 5L X52 templado. Se observan ampollas y grietas (3 y 6h).	72
Fig.44.	Conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 1.	76
Fig.45.	Variación de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntos. Muestras 1.	77
Fig.46.	Variación Relativa de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.	77
Fig.47.	Conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 2.	78
Fig.48.	Variación de conductividad en función del tiempo de carga por el método de las Cuatro Puntas. Muestras 1.	78
Fig.49.	Variación Relativa de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.	79
Fig.50.	Conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.	79
Fig.51.	Variación de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.	80
Fig.52.	Variación Relativa de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla.1.	Parámetros que actúan sobre el comportamiento al agrietamiento inducido por hidrógeno	9
Tabla.2.	Composición química del acero API 5L X52	16
Tabla.3.	Propiedades mecánicas de tracción del acero API 5L X52	16
Tabla.4.	Conductividad relativa de algunos metales y aleaciones	31
Tabla.5.	Identificación de las muestras	54
Tabla.6.	Composición química del acero API 5L X52	55
Tabla.7.	Valores de Corrientes de Eddy correspondientes a las muestras 1.	63
Tabla.8.	Valores de Corrientes de Eddy correspondientes a las muestras 2.	64
Tabla.9.	Valores de Corrientes de Eddy correspondientes a las muestras 2.	64
Tabla.10.	Valores de conductividad y resistividad eléctrica obtenida por el método de las cuatro puntas. Muestras 1.	73
Tabla.11.	Valores de conductividad y resistividad eléctrica obtenida por el método de las cuatro puntas. Muestras 2.	74
Tabla.12.	Valores de conductividad y resistividad eléctrica obtenida por el método de las cuatro puntas. Muestras 3.	75

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los procesos de caracterización de un material involucran cambios en sus condiciones físicas iniciales, es decir, son destructivos. Sin embargo, existen técnicas que permiten caracterizar un material sin dañarlo.

La conductividad eléctrica, es una propiedad natural del material que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él, varía con la temperatura y es considerada como una de las características más importantes de los materiales.

Dentro del área de los ensayos no destructivos existen, técnicas como el conocido método de las corrientes inducidas que debido a su alta sensibilidad a la conductividad del material, permite su uso para evaluar aleaciones o composiciones de los diferentes materiales. Además permite detectar zonas afectadas por esfuerzos residuales, discontinuidades superficiales y subsuperficiales (como grietas, porosidades e inclusiones), comparar tratamientos térmicos, medir tamaño de grano y dureza. De igual forma, a través de la conductividad eléctrica se miden espesores, tanto de recubrimientos metálicos, como de pinturas.

También, existen técnicas como el método de cuatro puntas que permite determinar la resistencia eléctrica de un material prismático preferiblemente de sección rectangular.

El objetivo de esta investigación es estudiar la variación de la conductividad en muestras de la aleación API 5L X52 sumergidos en un medio hidrogenado a diferentes tiempos después de someterse a ensayos de tracción, con el objeto de determinar la posibilidad de aplicar esta técnica de manera confiable en la caracterización de éste material. Con la finalidad de llevar a cabo éste estudio se

aplicaron distintos métodos de ensayos no destructivos tales como: el método de corrientes inducidas y el método de las cuatro puntas.

El acero API 5L-X52 es un acero que se utiliza para la fabricación de tuberías de línea para la industria petrolera, por lo tanto es un material que está expuesto a un medio hidrogenado, y en consecuencia puede presentar problemas de ampollamiento por hidrogeno por lo que es necesario contar con técnicas de evaluación preventivas adecuadas.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. DAÑO POR HIDROGENO

2.1.1. Definición

El daño por hidrógeno es un fenómeno complejo que ha concentrado el interés de muchos investigadores en el afán de prevenir y reducir el daño que éste genera, tratando de seleccionar materiales que además de cumplir con los requerimientos mecánicos, ofrezcan una alta resistencia a la corrosión. Por muchos años se ha tratado de entender el fenómeno considerando la interacción del hidrógeno con la microestructura, estableciendo diversos mecanismos en función de la permeación del hidrógeno en el metal y por supuesto considerando el efecto de los factores ambientales que están participando.

El hidrógeno se puede encontrar frecuentemente en los metales como un resultado de los procesos de producción, fabricación, procesamiento y/o condiciones de servicio. La evolución de hidrógeno es una característica común en estos procesos⁽¹⁾.

El daño por hidrógeno se manifiesta en aleaciones ferrosas y no ferrosas de muchas maneras, tales como: agrietamiento, ampollamiento, formación de hidruros y pérdida de la ductilidad⁽²⁾.

El daño inducido por hidrogeno es también considerado como el daño mecánico ocasionado por la interacción del hidrógeno con el metal cuando éste es expuesto a un medio acuoso que contenga H₂S con valores de pH bajos, de tal manera que se crean condiciones agrias ó ácidas. Este daño en los aceros, resulta de la absorción del hidrógeno atómico ó iónico por el material en sitios colectores potenciales que pueden

causar tres tipos principales de daños: agrietamiento, ampollamiento y fragilización del acero⁽³⁾.

2.1.2. Clasificación del daño por hidrógeno

Los tipos específicos de daño ocasionados por el hidrógeno han sido categorizados con la finalidad de ampliar la comprensión de los factores que afectan el comportamiento en aleaciones y proporcionar de esta manera una base para el desarrollo y análisis de las numerosas teorías que sustentan los diferentes mecanismos involucrados en el daño⁽⁴⁾. Los principales tipos de daño generado por hidrógeno se pueden clasificar como⁽⁵⁾:

a) Fragilización por ambiente de hidrógeno: ocurre durante la deformación plástica de la aleación en contacto con gases cargados de hidrógeno o por una reacción de corrosión y es por lo tanto, dependiente de la velocidad de deformación. La degradación de las propiedades mecánicas de muchas aleaciones es mayor cuando la velocidad de deformación es baja y la presión y pureza del hidrógeno son altas.

b) Agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno: frecuentemente referido como agrietamiento inducido por hidrógeno ó fatiga estática, se caracteriza por una fractura frágil de una aleación normalmente dúctil sometido a carga en presencia de hidrógeno. Ocurre normalmente a esfuerzos por debajo de la resistencia a la fluencia. Este mecanismo de agrietamiento depende de la fugacidad de hidrógeno, nivel de resistencia mecánica del material, tratamiento térmico/microestructura, esfuerzo aplicado y temperatura. Para muchos aceros existe un esfuerzo crítico por debajo del cual el agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno no ocurre. Este esfuerzo es una función del nivel de resistencia mecánica del acero y específico para un ambiente cargado por hidrógeno. Por lo tanto, el esfuerzo crítico ó intensidad de esfuerzo para el agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno no es considerado una propiedad del material. Generalmente el esfuerzo crítico disminuye a medida que la resistencia a la

fluencia de la aleación aumenta. El agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno está asociado con la absorción del hidrógeno y el tiempo de incubación durante el cual el hidrógeno difunde a regiones de altos esfuerzos triaxiales. Este tipo de daño puede promover un modo de fractura en una aleación que no es normalmente observado en un ambiente benigno. Por lo tanto, todos los modos de agrietamiento han sido observados en la mayoría de los sistemas de aleaciones comerciales, sin embargo, el agrietamiento bajo esfuerzo inducido por hidrógeno usualmente produce grietas agudas aisladas en contraste con las grietas ramificadas observadas por agrietamiento inducido por hidrógeno por corrosión bajo tensión.

c) Pérdida de ductilidad: constituye una de las primeras formas reconocidas del daño por hidrógeno. Se ha observado una disminución significativa en la elongación y reducción de área en aceros inoxidable, aleaciones a base de níquel, aleaciones de aluminio, y en aleaciones de titanio expuestas a hidrógeno. Este modo de falla es frecuentemente observado en aleaciones de menor resistencia mecánica y la extensión de la pérdida de la ductilidad es una función del contenido de hidrógeno en el material. La pérdida en la ductilidad es sensible a la velocidad de deformación y se hace más pronunciado a medida que la velocidad de deformación disminuye.

d) Ataque por hidrógeno: es un daño por hidrógeno que se genera a temperaturas altas, y ocurre en aceros al carbono y aceros de baja aleación expuestos a una presión de hidrógeno alta y temperaturas altas, por tiempo prolongado. El hidrógeno entra al acero y reacciona con el carbono, ya sea en solución ó como carburo, para formar gas metano. Este daño puede generar grietas y fisuras o puede simplemente descarburizar el acero, resultando en una pérdida de resistencia de la aleación. Este modo de daño es dependiente de la temperatura, con una temperatura crítica de aproximadamente 200 °C (400F).

e) Ampollamiento: ocurre predominantemente en aleaciones de baja resistencia cuando el hidrógeno atómico difunde a defectos internos, tales como laminaciones ó inclusiones

metálicas, y luego precipita como hidrógeno molecular (H_2). La presión del hidrógeno molecular puede alcanzar valores tan altos que puede ocurrir una deformación plástica localizada, formando una ampolla que frecuentemente sufre ruptura. Las ampollas son generalmente encontradas en aceros de bajo carbono que han sido expuestos a ambientes corrosivos agresivos (tales como H_2S) o limpiado por decapado electroquímico.

f) Grietas seccionadas, hojuelas y ojos de pez: son características comunes del daño por hidrógeno en materiales forjados, soldados y aleaciones coladas. Estos defectos son atribuidos al hidrógeno atrapado durante las operaciones de fundición, donde el baño fundido tiene una mayor solubilidad al hidrógeno que en la aleación sólida. Durante el enfriamiento desde el metal fundido, el hidrógeno difunde y precipita en cavidades y discontinuidades, produciendo una disminución de la solubilidad del hidrógeno en el metal sólido. En muchos aspectos, estas características son comparables al ampollamiento y este pudiera ser considerado un caso especial de esta clase de daño.

g) Microperforación: ocurre por presiones de hidrógeno extremadamente altas cerca de la temperatura ambiente. Este defecto es frecuente en aceros y se manifiesta en si como una red de pequeñas fisuras que permiten la permeación de la aleación por gases y líquidos.

h) Degradación en propiedades de fluencia: ocurre en ambientes hidrogenados, han sido encontrados a temperatura ambiente en el hierro y acero, y a elevadas temperaturas en algunos sistemas de aleaciones. Se ha observado que la resistencia al creep en estado estacionario bajo carga constante incrementa en presencia de hidrógeno en algunas aleaciones a base de níquel.

i) Formación de hidruros: produce fragilización en magnesio, tántalo, niobio, vanadio, uranio, torio, zirconio, titanio y sus aleaciones, así como también en muchos otros metales y aleaciones menos comunes. La degradación de las propiedades mecánicas y agrietamiento de estos metales y sus aleaciones es atribuida a la precipitación de fases de

hidruros de metales. El hidrógeno atrapado frecuentemente proviene de la soldadura, tratamiento térmico, etc., cargado desde el proceso de corrosión o durante la fundición de la aleación. La formación de hidruros incrementa en algunos sistemas metal-hidrógeno por la aplicación de esfuerzos, conocido como formación de hidruros inducidos por esfuerzo. Los sistemas de aleación que forman hidruros son generalmente dúctiles a temperaturas altas (>300 K) y bajas (< 100 K), en las cuales estas se fracturan por ruptura dúctil. Esta dependencia con la temperatura es comparable a la observada por fragilización por hidrógeno de aleaciones ferrosas de aleaciones de níquel. Algunas de estas aleaciones son además susceptibles a fallas por hidrógeno por mecanismos diferentes a la formación de hidruros.

2.1.3. Mecanismos del agrietamiento por hidrógeno

L. Coudreuse y J. Charles⁽⁶⁾ señalan que no existe un mecanismo universal válido para explicar el daño por hidrógeno, por lo tanto es razonable sugerir que todos estos pueden ocurrir por separado o combinados, como se muestra esquemáticamente en la figura 1⁽⁷⁾. Para el caso, por ejemplo, de una inclusión elongada de sulfuro de manganeso (MnS), se tiene:

a) **En ausencia de hidrógeno:** no se iniciaría grieta en el extremo del sulfuro, debido a que el del esfuerzo total, la suma de los esfuerzos aplicados (σ_a^0) y/o los esfuerzos residuales (σ_r^0), es menor que el de los esfuerzos cohesivos (σ_c^0), es decir :

$$\sigma_T^0 = \sigma_a^0 + \sigma_r^0 < \sigma_c^0 \quad (3)$$

σ_T^0 = esfuerzo total de hidrógeno presente

σ_a^0 = esfuerzo aplicado sin hidrógeno presente

σ_r^0 = esfuerzo residual sin hidrógeno presente

σ_c^0 = esfuerzo cohesivo sin hidrógeno presente

b) **En presencia de hidrógeno:** varios fenómenos pueden ocurrir simultáneamente o consecutivamente:

- Recombinación del H₂ gaseoso en la interfase defecto/matriz generando una presión elevada de hidrógeno.
- Disminución de la energía superficial del extremo de la grieta debido a la adsorción del hidrógeno.
- Interacción hidrógeno/dislocaciones en el extremo del defecto en la zona plástica, conduciendo a una pérdida de ductilidad en esa zona.
- Disminución de los esfuerzos cohesivos.

Por lo tanto, en el defecto el esfuerzo aplicado total puede aumentar debido a la presión de hidrógeno, tal que si: $\sigma_T^H = \sigma_a^H + \sigma_r^H > \sigma_c^H$ (4)

y se puede iniciar la grieta.

σ_T^H =esfuerzo total con hidrógeno presente

σ_a^H =esfuerzo aplicado con hidrógeno presente

σ_r^H = esfuerzo residual con hidrógeno presente

σ_c^H = esfuerzo cohesivo con hidrógeno presente.

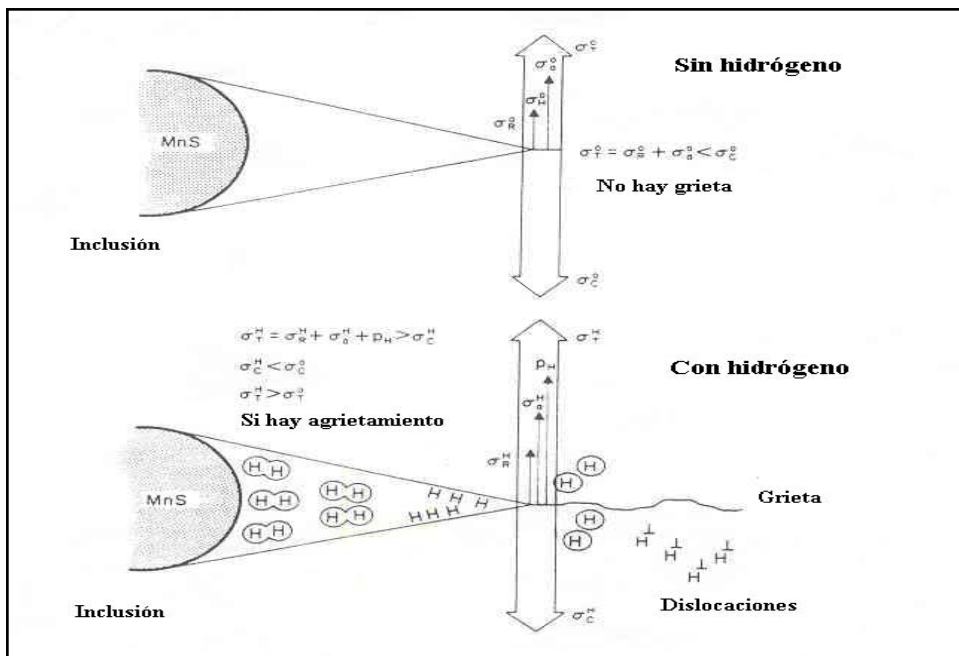


Fig. 1. Ilustración esquemática del efecto del hidrógeno en el inicio de una grieta⁽⁷⁾.

2.1.4. Factores externos e internos que influyen en la susceptibilidad al daño por hidrógeno

Todos los fenómenos ya descritos anteriormente pueden conducir a fallas catastróficas en los materiales expuestos a ambientes agrios en la industria petrolera. Ha sido bien reconocido que la severidad y tipo de daño por hidrógeno depende de factores metalúrgicos tales, como: composición química, heterogeneidad de la estructura (segregaciones), tipo de microestructura, dureza, inclusiones no metálicas (naturaleza, nivel, forma y distribución), defectos estructurales (dislocaciones, bordes de grano), tratamiento térmico, esfuerzos internos y factores ambientales tales como naturaleza de la solución, concentración de H₂S, pH del medio, tiempo de exposición, temperatura y presión, esfuerzos aplicados⁽⁶⁻⁹⁾.

Los factores ambientales actúan sobre la actividad del hidrógeno y la cinética de absorción. Estos factores juegan un rol importante en la inducción de este fenómeno y han sido responsables de numerosas fallas en tuberías de acero expuestas a medios agrios⁽⁶⁻⁹⁾.

Los parámetros que actúan sobre el agrietamiento por hidrógeno para una actividad externa dada del hidrógeno, se resumen en la tabla 1⁽⁶⁾.

Tabla 1. Parámetros que actúan sobre el comportamiento al agrietamiento inducido por hidrógeno⁽⁶⁾.

Parámetros externos	Parámetros metalúrgicos
Naturaleza de la solución	Composición química (Cu, Ni, P, S etc)
Concentración de H ₂ S	Microestructura
pH	Inclusión (número, forma y distribución)
Reacciones electroquímicas	Segregación
Temperatura	Defectos (carburos, dislocaciones, bordes de grano)
Tiempo	Esfuerzos internos
Estos parámetros actúan sobre la actividad del hidrógeno y la cinética de absorción.	

Todos los parámetros metalúrgicos pueden ejercer una influencia sobre la concentración de hidrógeno, ya que cada uno de estos tiene influencia en las características de las trampas.

Generalmente se ha observado que la presencia de zonas heterogéneas en la microestructura de un acero, donde se presentan fases como por ejemplo bainita y martensita, aumenta la susceptibilidad al daño. Estas zonas presentan una alta dureza (20 HRC) y pueden promover la propagación de la grieta⁽¹⁰⁾. Turn y colaboradores⁽¹¹⁾ señalan que a pesar de que ha sido una práctica aceptada que los aceros con durezas menores que 22 HRC exhiban un comportamiento aceptable en ambientes agrios⁽¹²⁾, a partir de los resultados obtenidos de su investigación, se debe tener la precaución sobre la aplicación de este criterio, puesto que las fallas parecen ser principalmente asociadas a la severidad del ambiente y esfuerzos aplicados y no a las propiedades tensiles (o dureza), en aceros utilizados en tuberías de línea.

Se ha establecido que la resistencia al daño por hidrógeno en aceros incrementa según el siguiente orden⁽⁷⁾:

Martensita revenida> bainita no revenida>estructuras normalizadas>martensita y bainita revenida> estructuras esferoidales.

Amarnath y colaboradores⁽¹³⁾ evaluaron el efecto del tratamiento térmico sobre la susceptibilidad al daño por hidrógeno en un acero API X-65 utilizado como tubería de línea, encontrando que la resistencia a la fragilización por hidrógeno resultó en el siguiente orden: el proveniente de laminación controlada (condición de entrega) mayor que el acero templado y revenido, y esta a su vez mayor que la que ofreció el acero normalizado, y el modo de fractura inducido por el hidrógeno en todas las condiciones fue dúctil, con la coalescencia típica de microcavidades.

Szklarska y colaboradores⁽¹⁴⁾ estudiaron el fenómeno de atrapamiento de hidrógeno en un acero X-52 laminado en frío usando la técnica de permeación (potenciostática de

impulso) para la evaluación del coeficiente de difusión aparente y el de la red, y encontraron que la susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno del acero trabajado en frío resultó mayor que el acero sin trabajar en frío.

Amarnath y colaboradores⁽¹⁵⁾ investigaron el efecto del trabajo en frío sobre el retardo de la falla inducida por hidrógeno, en tuberías de acero API X-52 y señalan que el trabajo en frío aumenta la susceptibilidad con la reducción en la resistencia tensil al entalle, el período de incubación y el límite de fatiga estática, a medida que incrementaron el trabajo en frío. Aceros sometidos a severas deformaciones en frío altamente (30% o más) resultaron menos susceptibles a la fragilización por hidrógeno, probablemente por la disminución en la cantidad de hidrógeno difusible disponible en el material. La fractura inducida por hidrógeno ocurrió por un mecanismo que involucró la nucleación de cavidades en inclusiones no metálicas, su crecimiento probablemente asistido por la presión de hidrógeno y una fractura final de manera escalonada.

Los principales factores ambientales y metalúrgicos, considerados anteriormente, que afectan la susceptibilidad de los aceros al daño por hidrógeno, indican la importancia de un control en el proceso de manufactura del acero, desde la producción del acero líquido y durante el proceso de desoxidación y desulfuración del mismo hasta las etapas finales del proceso de conformado del tubo, que afectan su microestructura final.

Existe un gran acuerdo acerca de los parámetros que afectan la susceptibilidad al daño por hidrógeno en aceros, sin embargo, la susceptibilidad difiere por la composición química, niveles de resistencia, elementos aleantes, microestructuras, tratamiento térmico, entre otros. Por lo tanto, es complejo establecer la correlación entre estos factores, numerosas investigaciones han mostrado que para una mejor comprensión del fenómeno, se debe seguir haciendo énfasis en las características microestructurales del material seleccionado^(6,8,10,13,16,17).

2.1.5.- Características del daño inducido por hidrógeno

El daño inducido por hidrógeno en aceros que han sido expuestos a un ambiente agrio (H_2S) acuoso, se puede presentar principalmente como ampollas, agrietamiento recto o continuo y agrietamiento escalonado. En la figura 2 ⁽¹⁸⁾ se muestran los ejemplos típicos de estos tipos de daño comunes en aceros, los cuales se originan sin la aplicación de esfuerzos externos.

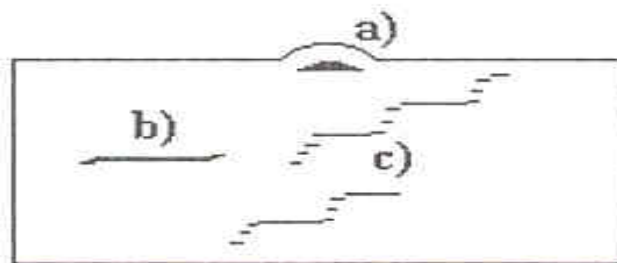


Fig. 2. Morfología de las grietas en un ambiente de H_2S acuoso ⁽¹⁸⁾:

- a) Ampollamiento.
- b) Agrietamiento continuo inducido por hidrógeno.
- c) Agrietamiento escalonado inducido por hidrógeno.

Las ampollas y las grietas se forman como resultado de la combinación de hidrógeno atómico absorbido por el material a hidrógeno molecular en sitios de defectos. Las inclusiones no metálicas pueden especialmente formar tales sitios de defectos. Debido a la formación de presiones altas de hidrógeno molecular, que son alcanzadas en estos defectos, se produce agrietamiento y generación de esfuerzos cizallantes en el extremo de la grieta ^(19, 20).

Obviamente, presiones bajas serán suficientes para producir grietas cercanas a la superficie más que en el lado interno del material. Está claro que las grietas cercanas a la superficie no crecen simplemente paralelas a la superficie y que sus longitudes están limitadas por las grietas que yacen inclinadas a la superficie. Las grietas cercanas a la superficie se observan como ampollas. La ocurrencia de estas grietas está restringida a

una zona estrecha cercana a la superficie del material. En la mayoría de los casos no existe relación entre estas grietas y las inclusiones no metálicas que pueden ser reveladas por microscopía óptica. Éstas pueden estar presentes en materiales puros, los cuales contienen solamente pequeñas cantidades de inclusiones no metálicas. Por otro lado, las grietas a una distancia más de 1 mm de la superficie en materiales susceptibles al agrietamiento inducido por hidrógeno, están siempre asociadas con las inclusiones no metálicas. Éstas pueden formar grietas discretas ó un arreglo de grietas las cuales yacen paralelas unas de otras y son conectadas por grietas entre ellas. En este caso son llamadas grietas escalonadas. Las grietas que se conectan a las grietas principales y conducen al agrietamiento escalonado son causadas por los esfuerzos cizallantes entre las grietas principales^(19,20).

Las ampollas en la superficie y las grietas internas se encuentran en ausencia de esfuerzos externos cuando hay un ingreso de hidrógeno en el material. Los factores que influyen en el número y tamaño de estas grietas son⁽²¹⁾:

- *. Actividad del hidrógeno en el material y
- *. Tamaño, forma y número de inclusiones no metálicas, especialmente en combinación con microestructuras susceptibles como bainita y martensita no revenida.

Cuando el agrietamiento ocurre en inclusiones no metálicas en ausencia de esfuerzos externos es referido como agrietamiento inducido por hidrógeno⁽²³⁾.

a) Ampollamiento inducido por hidrogeno

Muchas investigaciones se han realizado con el fin de estimar la presión que se alcanza dentro de la muestra de acero por la precipitación de hidrógeno, y la presión necesaria para producir microgrietas y ampollas en tales muestras. Determinaciones aproximadas basadas en varias suposiciones y simplificaciones han reportado valores entre 10^3 y 10^7 at.; termodinámicamente, presiones (ó fugacidades) de más 10^{10} atm. se pueden alcanzar, mientras que valores mayores observados experimentalmente en cátodos huecos están entre 200 y 300 atm.⁽²²⁾. La resistencia del material representa un

límite natural, obviamente, no puede ser excedido, pero suficiente información falta aún sobre datos básicos, los cuales deben ser considerados para aceros cargados por hidrógeno.

b) Agrietamiento inducido por hidrógeno

Es normal observar tipos de grietas continuas y escalonadas al mismo tiempo. Estas grietas individuales tienen la apariencia de una cavidad y coalescen unas con otras a lo largo de los planos locales de cizallamiento⁽¹⁹⁾. Estos dos tipos de grietas, pueden estar acompañados de ampollas, las cuales ocurren por las altas concentraciones y presiones parciales de H₂S. En esta condición existe una gran cantidad de hidrógeno atómico capaz de recombinarse para formar hidrógeno molecular y de esta manera generar cavidades, apreciables incluso a simple vista.

Frecuentemente una grieta se desarrolla en forma escalonada. Ésta puede ser causada por la coalescencia de dos o más grietas, las cuales pueden tener diferentes procesos de desarrollo como se ilustra en la figura 3⁽¹⁹⁾.

- A.** Unión directa, la cual puede ocurrir entre inclusiones que se encuentran a corta distancia.
- B.** Creación de una pequeña grieta debido a la interacción de dos grietas principales que pueden estar a gran distancia. La unión entre la grieta principal y la grieta pequeña se realiza como en el caso de la unión directa.
- C.** Generación de una pequeña grieta delante de otra principal. El escalonamiento se puede llevar a cabo repitiendo este procedimiento.

Es importante resaltar que en el proceso de propagación de las grietas, no solo participan las inclusiones no metálicas, sino además componentes microestructurales como la perlita laminar, micro inclusiones y penetraciones de ferrita^(19,20).

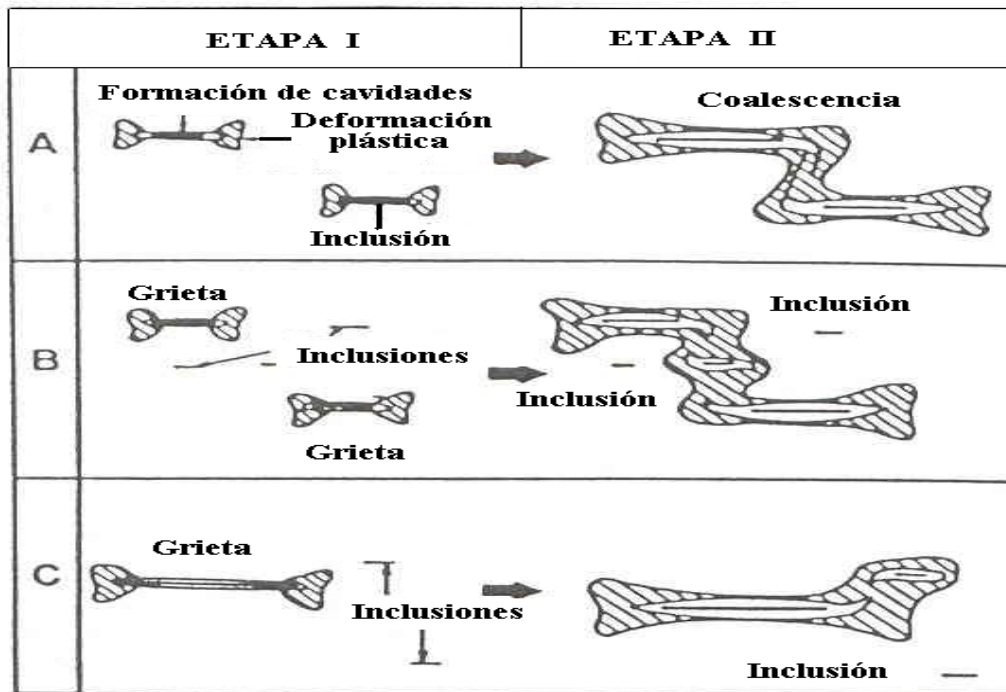


Fig. 3. Esquema del proceso de escalonamiento de las grietas⁽¹⁹⁾.

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN DE ACERO API 5L X-52

El acero API 5L X-52 corresponde a una designación del Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) para su utilización en tuberías de línea con costura o soldado.

En la tabla 2^(24,25) y en la tabla 3^(24,25) se detallan los límites máximos de los elementos químicos principales y las propiedades mecánicas, respectivamente establecidos para un acero API 5L X52 empleado como una tubería de línea.

2.2.1. Composición Química

Tabla 2. Composición química del acero API 5L X52^(24,25)

Elemento	C	Mn	P	S
(% en peso)	0,30	1,35	0,04	0.05

2.2.2. Propiedades Mecánicas

Tabla 3. Propiedades mecánicas de tracción del acero API 5L X52^(24,25)

Esfuerzo de fluencia (min)	Esfuerzo de fluencia (min)
52.000 Psi 358 MPa	66.000 Psi 455 MPa

2.3. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La medición de Conductividad eléctrica “ σ ” se ha convertido en un método potencial para la investigación de diferentes cambios en los materiales, por ejemplo, en las aleaciones comerciales de aluminio especialmente en la industria aeronáutica⁽²⁶⁾. Es bien conocido que el proceso de dispersión de electrones es altamente sensible a los cambios microestructurales a escala atómica. Típicamente en los procesos de recocido o donde el material ha sido tratado térmicamente, en los procesos de precipitación o envejecimiento y en los cambios de fases, se llevan a cabo investigaciones usando métodos de medición de conductividad eléctrica debido a su alta sensibilidad para la detección de pequeños cambios⁽²⁷⁾.

En las mediciones de resistencia eléctrica de valores muy bajos (1Ω hasta $0,00001 \Omega$), se utiliza el puente de Kelvin o mejor conocido como el Método de las Cuatro Puntas⁽²⁸⁾. Adicionalmente, también se utilizan equipos de Corrientes Inducidas

con diagramas de impedancia^(29,30), para la determinación de cambios de conductividad eléctrica.

Es por ello, que es indispensable conocer los principios bajo los cuales se rigen estas técnicas. Para la medición de conductividad eléctrica DC se determina conforme al conocido método de las Cuatro Puntas, mediante el cual se determina la resistencia de un objeto prismático, preferiblemente de sección rectangular. El punto de partida lo fundamenta la Ley de Ohm⁽³¹⁾. Para la medición de conductividad eléctrica AC por Corrientes Inducidas, la técnica se fundamenta en el fenómeno de Inducción Electromagnética, descubierto por Michael Faraday en 1.831. Faraday demostró que al pasar una corriente eléctrica cuyas características dependen del tiempo, a través de una espira (alambre enrollado), esta era capaz de producir (inducir) una corriente eléctrica en otra espira adyacente. El desarrollo teórico lo explican las ecuaciones de James Maxwell (1864)⁽²⁹⁾.

Gallipoli et al.⁽²⁷⁾, estudiaron cambios de resistividad eléctrica en la aleación comercial de aluminio AA3003, durante el proceso de recristalización. Las probetas objetos de estudio fueron deformadas por laminación y preparadas mediante la aplicación de tratamiento térmico. La metodología empleada para la medición de resistividad de la corriente consistió en la aplicación de métodos de ensayos no destructivos, tales como el método de las cuatro puntas, método de corrientes inducidas, método de la fuerza y método de la transmisión. Los resultados muestran la posibilidad de determinar de manera no destructiva, pequeñas variaciones de resistividad, las cuales se pueden correlacionar con cambios en las propiedades como la dureza y el grado de recristalización.

Lee et al.⁽²⁶⁾, evaluaron mediante simulación los efectos de daño por calor en aleaciones de aluminio utilizadas en la industria aeronáutica, con el objeto de determinar la correlación existente entre las propiedades mecánicas y la conductividad eléctrica. Para ello se utilizaron las aleaciones de aluminio 2014-T6, 2024-T3, 6061-T6, 7050-

T7451 y la 7075-T6, tratadas térmicamente (177-482°C) y expuestas a diferentes tiempos (1 min a 20 días). Las aleaciones fueron expuestas térmicamente en baño de sal y de aceite para tiempos de exposición por debajo de 30 minutos, para tiempos superiores las aleaciones fueron tratadas en hornos. Evaluaron conductividad eléctrica mediante un conductímetro además de dureza y otras propiedades mecánicas. Los resultados indican que a temperaturas inferiores a 260°C las cinco aleaciones mostraron una clara correlación entre las propiedades mecánicas y físicas.

2.3.1. Conductividad Eléctrica:

La conductividad eléctrica “ σ ” es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica. También puede ser definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con que los electrones pueden pasar por el, varía con la temperatura y puede ser considerada como una de las características más importantes de los materiales^(29,32).

La intensidad de corriente **I**, que circula por un circuito con una resistencia **R**, y un voltaje **V** fijo, viene dado por la Ley de Ohm⁽³²⁾.

$$V = R * I \quad (5)$$

El valor de la resistencia depende de la geometría de la muestra; **R** aumenta con la longitud **L**, y disminuye con el área **A**. Como consecuencia, se define una propiedad característica de un determinado material e independiente de la geometría, la resistividad “ ρ ”⁽³²⁾.

$$\rho = \frac{R * A}{L} \quad (6)$$

Las unidades de la resistividad son $\Omega \cdot m$, y la conductividad es la inversa de la resistividad y sus unidades son $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ó S/m (siemens por metro)⁽³²⁾.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

Se mide la resistividad eléctrica para medir la corriente I y la diferencia de la potencial V.

El transporte de la electricidad en un metal (corriente eléctrica) se realiza por los electrones. Admitiendo que la conductividad eléctrica se debe a la circulación de los electrones en el metal, esta por consiguiente, se encuentra en relación con el número de “Electrones Libres” y con una libertad de circulación en la masa del metal. Los electrones son frenados por sus choques con los átomos y se puede concebir que la conductividad eléctrica resulte afectada por todo aquello que destruye la continuidad de la materia a cualquier escala^(29,27).

Para tener una idea de la trayectoria libre media de los electrones en un metal, se tiene que considerar la dinámica de las colisiones de los electrones. Donde el conductor es electrostáticamente neutro solo en promedio, hay grandes variaciones en el potencial a distancias del orden de un Ångstrom, y una partícula cargada, como un electrón, deberá chocar y dispersarse por variaciones de potencial. La conductividad finita de los metales proviene de las imperfecciones en la red cristalina. Estas imperfecciones son de dos tipos: impurezas o imperfecciones en su forma geométrica (límites de grano, átomos de impureza, átomos intersticiales y dislocaciones), e imperfecciones térmicas inducidas que provienen del movimiento térmico de los átomos en la estructura. Ambos tipos de imperfecciones contribuyen independientemente a la variación de la conductividad^(27,33). Esta norma es una base fundamental para entender el comportamiento de resistividad de los metales y aleaciones, y es mejor conocida como la Regla de Matthiessens.

La medida de la conductividad eléctrica y las características metalúrgicas que las afectan tales como impurezas, elementos aleantes, la microestructura, el tamaño de grano, etc., facilitan los siguientes controles: pureza de metales no aleados, clasificación

de aleaciones, estado de deformación, control del estado del tratamiento, tamaño de grano, determinación de la profundidad de capas endurecidas, cementación y temple superficial o de la descarburización superficial en aceros, nitruración y carbonitruración, medidas de espesores de un recubrimiento metálico (diferencias de conductividad entre el recubrimiento y el metal base)⁽²⁹⁾.

2.3.2. Control de la Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica de un metal libre de defectos es determinada por la estructura electrónica de los átomos. Pero la conductividad eléctrica puede verse afectada significativamente por la influencia de la movilidad de los electrones. La movilidad es proporcional a la velocidad de la corriente, la cual es baja si los electrones chocan con imperfecciones de la red. El camino libre medio es la distancia promedio entre colisiones, en consecuencia, un largo camino medio libre, permite altas movilidades y alta conductividad⁽²⁷⁾.

2.3.3. Efecto de la Temperatura en la Conductividad Eléctrica

Cuando la temperatura de un metal aumenta, la energía térmica causa que los átomos vibren. En algún instante, los átomos no pueden estar en su posición de equilibrio y entonces interaccionan y esparcen los electrones (**Fig. 4b**). En el camino libre medio, la movilidad de los electrones es reducida, y la conductividad eléctrica disminuye⁽²⁷⁾.

A muy bajas temperaturas la agitación térmica de los átomos alrededor de los nudos de la red llega a ser nula; los trenes de onda de los electrones se desplazan por consiguiente en una red perfecta y su encuentro con los átomos engendra ondas difusas que refuerzan las ondas iniciales, dada la coherencia de la red. El haz incidente se propaga entonces sin sufrir debilitamiento y la resistividad eléctrica de un metal exento

de toda impureza y perfectamente recristalizado tiende a cero en la proximidad del cero absoluto⁽¹²⁾.

2.3.4. Efectos de los Defectos de la Red

Las irregularidades como átomos extraños, dislocaciones, nodos reticulares, vacancia y límites de granos, también provocan disminuciones de la conductividad eléctrica del metal (**Fig. 4c**)^(29,27).

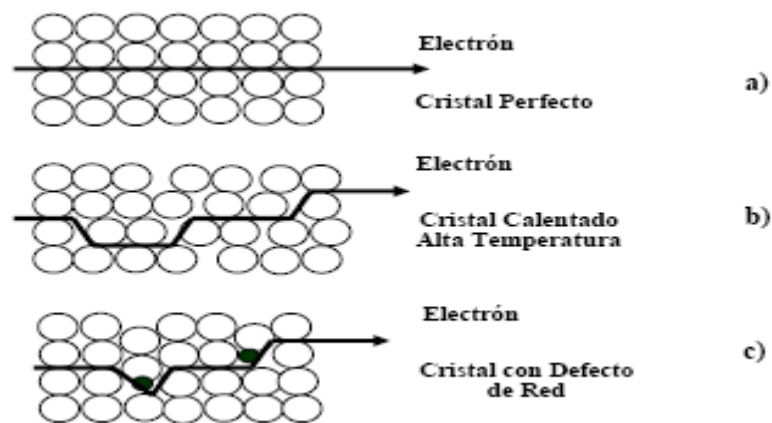


Fig. 4. Efecto sobre el electrón al paso por las distintas formaciones de red ⁽²⁷⁾. **a)** Cristal perfecto **b)** Cristal a alta temperatura **c)** Cristal con defecto de red.

2.4. MÉTODO DE LAS CUATRO PUNTAS O DE KELVIN

El método consiste en cuatro electrodos de puntas agudas alineadas (**Fig.5**), dos de los cuales mantienen una corriente fija circulando por la muestra (electrodos periféricos) y el resto permite medir una diferencia de potencial en el interior de la misma (electrodos internos)^(28,34).

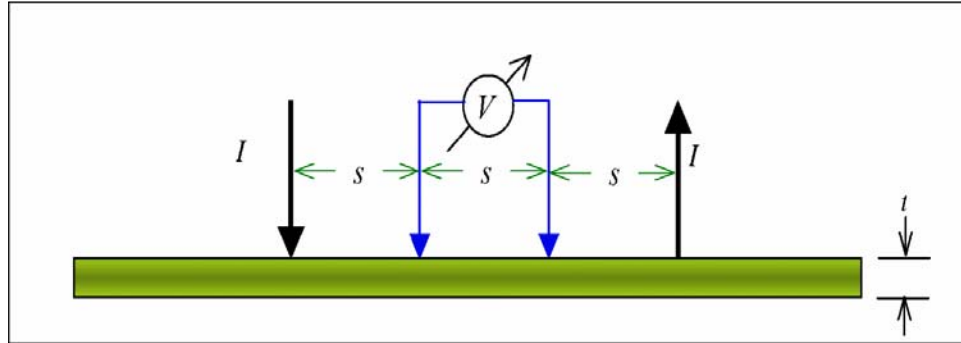


Fig.5. Circuito usado para medir resistividad eléctrica⁽³⁴⁾.

Este método permite obtener la mayor precisión posible en la medida como es el caso de calibración de patrones de resistencia en laboratorio. Esta técnica es una de las mas utilizadas, aunque su precisión dependa totalmente del aparato de medida, sin embargo, en la actualidad hay equipos, que por ejemplo, permiten eliminar de la medición, la resistencia de los potenciales de contactos (cables), o vienen preparados para la determinación de resistencias por este método o por el de dos puntas únicamente^(28,34).

Gazoni et al.⁽³⁴⁾, estudiaron resistividad eléctrica de diversos materiales en muestras con distintas geometrías por medio de la técnica de cuatro puntas. En este trabajo se analiza la validez de considerar a las distintas muestras como isotropicas o anisotrópicas. Para ello estudiaron resistividad de muestras cilíndricas de cobre y laminas de cobre, aluminio y bronce. En el caso de las láminas metálicas de cobre, aluminio y bronce se evaluó resistividad en dos direcciones ortogonales para evaluar la posibilidad de considerar el material como isotrópico. Como resultado se logro obtener mediante la utilización del método de cuatro puntas un coeficiente de resistividad tanto para probetas planas como para probetas cilíndricas.

2.5. MÉTODOS DE CORRIENTES INDUCIDAS

Las técnicas de corrientes inducidas, o corrientes Eddy, se utilizan en materiales conductores basándose en el análisis de las variaciones que las grietas, o defectos superficiales producen en un flujo de corrientes inducidas. Para inducir estas corrientes se utiliza una bobina externa con corriente alterna que genera un campo magnético variable (**Fig.6**). Como las corrientes inducidas provocan un campo magnético secundario que tiende a contrarrestar el primero, las variaciones en las primeras se miden a través del campo magnético secundario, el cual se mide con una bobina que puede ser la misma que induce las corrientes u otra independiente^(29,35).

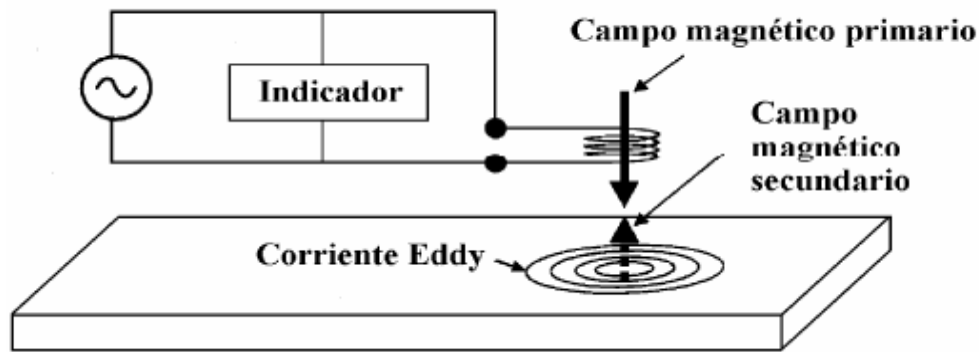


Fig. 6 Representación esquemática de la técnica de corrientes inducidas⁽³⁵⁾.

Las corrientes inducidas, y por tanto, las inspecciones no destructivas basadas en este principio, dependen de varios factores que incluyen la conductividad del material, la permeabilidad magnética, la densidad del espécimen, los esfuerzos residuales, la microestructura, factores geométricos, el acoplamiento magnético, y los defectos o grietas^(31,35).

Ma et al.⁽³⁶⁾, estudiaron la conductividad eléctrica en espuma de aluminio fabricada por sinterización, mediante la técnica de corrientes inducidas. Para ello emplearon bobinas dobles de aire construidas para evaluar muestras cilíndricas. Los

resultados obtenidos a partir de las mediciones experimentales, son considerados en buen estado cuantitativos de acuerdo con las simulaciones de elementos finitos. En esta investigación se observó la dependencia de la porosidad y el tamaño de poro sobre la conductividad eléctrica en la espuma de aluminio. También observaron una disminución de conductividad con el aumento del tamaño de poro. Estos resultados además son contrastados con mediciones de fuerza electromotriz fem.

2.5.1. Aplicaciones de la técnica de corrientes inducidas

La sensibilidad de esta técnica la hace atractiva para gran cantidad de aplicaciones como por ejemplo:

- Detección de discontinuidades en materiales: Ferromagnéticos y No Ferromagnéticos.
- Medición de conductividad eléctrica en materiales no ferromagnéticos.
- Medición de espesores de recubrimientos no conductores sobre un material conductor.
- Separación de materiales en base a: composición química (sorting), dureza, microestructura, tratamiento térmico⁽²⁹⁾.

Sin embargo, siempre estará limitada a que el material sea conductor, y para identificar anomalías superficiales o muy cercanas a la superficie. El punto de partida en la comprensión de la técnica de Corrientes Inducidas, lo constituyen las cuatro ecuaciones fundamentales que describen por completo los fenómenos electromagnéticos propuestos por Maxwell y ellas son⁽³¹⁾:

Ley de Faraday:

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

Ley de Amper Generalizada:

$$\vec{\nabla}_x \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + J \quad (9)$$

Ley de Gauss para el Campo Magnético:

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = 0 \quad (10)$$

Donde:

\vec{E} = Campo eléctrico.

\vec{B} = Densidad del flujo magnético.

t = Tiempo.

\vec{H} = Intensidad del campo magnético.

\vec{D} = Densidad de flujo eléctrico.

\vec{J} = Densidad de corriente.

Para el desarrollo de esta investigación es importante mencionar las expresiones que dieron origen a la técnica, sin hacer énfasis en el formalismo matemático. Ya que el objetivo principal es la aplicación de la técnica de Corrientes Inducidas.

Obrutsky et al⁽³⁷⁾, utilizaron la técnica de Corrientes Inducidas para la caracterización de discontinuidades en tubos rectos con costura de acero inoxidable AISI 304L, del condensador de vapor de una central termoeléctrica. En el análisis de señales por Corrientes Inducidas realizada durante la inspección se observaron indicaciones que

presentaban una importante disminución del espesor de pared, donde el análisis de fase determinó la presencia de defectología externa, por lo que se decidió la extracción de un tubo para su análisis. Mediante examen visual se verificó que el tubo no presentaba discontinuidades externas, sólo se observaron algunas manchas de óxido coincidentes con la soldadura y la zona adyacente a la misma. En la reinspección por Corrientes Inducidas, del tubo extraído se verificó la ubicación de las señales a lo largo de todo el tubo. Mediante el ensayo de Radiografía Industrial (RI), con Rayos X, se determinó la presencia de las discontinuidades halladas por Corrientes Inducidas, y su evaluación proporcionó información del tipo, forma y ubicación dentro del tramo en estudio. Posteriormente los datos fueron utilizados para la ejecución de los análisis metalográficos que determinaron su caracterización.

2.5.2. Tipos de bobina o sensores

La sonda o bobina de ensayo es uno de los componentes de mayor importancia en la inspección mediante corrientes inducidas, ya que mediante ellas se obtiene toda la información que puede producirse en una aplicación específica. En base a sus posibles configuraciones, ellas pueden ser clasificadas de distintas maneras, siendo la de mayor aceptación la siguiente:

- 1.- Bobinas externas (Envolventes)
- 2.- Bobinas internas.
- 3.- Bobinas superficiales (sondas)^(29,35).

2.5.2.1. Bobinas de superficie

Se emplean para inspecciones en superficies relativamente planas, donde la corriente inducida sigue un patrón circular con un diámetro similar al de la bobina. Por lo general, la bobina se envuelve en un núcleo ferromagnético que concentra el flujo de

campo magnético en un volumen mucho menor, con lo que se aumenta la sensibilidad a las discontinuidades muy pequeñas (Fig. 7)^(29,35).

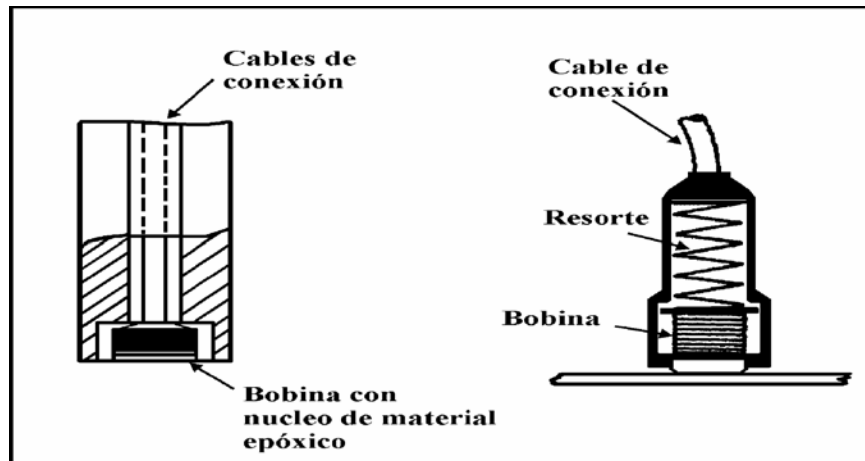


Fig. 7. Bobinas de superficie⁽³⁵⁾.

2.5.2.2. Bobinas Exteriores

Se conocen también como sensores de diámetro exterior o envoltentes, y se aplican en la detección de defectos longitudinales en tubos y barras metálicas. En este tipo de sensores, las bobinas se enrollan alrededor del espécimen de manera que las corrientes inducidas fluyen en dirección circunferencial, lo que permite sean muy sensibles a los defectos orientados en la misma dirección del eje de la bobina (Fig.8)^(29,35).

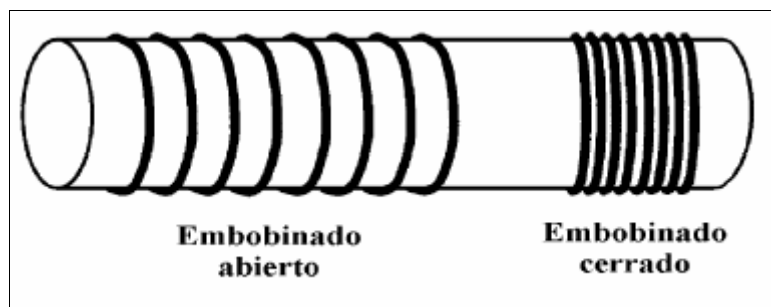


Fig. 8. Bobinas exteriores⁽³⁵⁾.

2.5.2.3. Bobinas para interiores

Son sensores muy semejantes a las bobinas exteriores; se conocen también como sensores de diámetro interno y se emplean para inspecciones en el interior de barras o tubos (Fig. 9). Tienen muy alta sensibilidad a los defectos superficiales con orientación paralela al eje de la bobina ^(29,35).

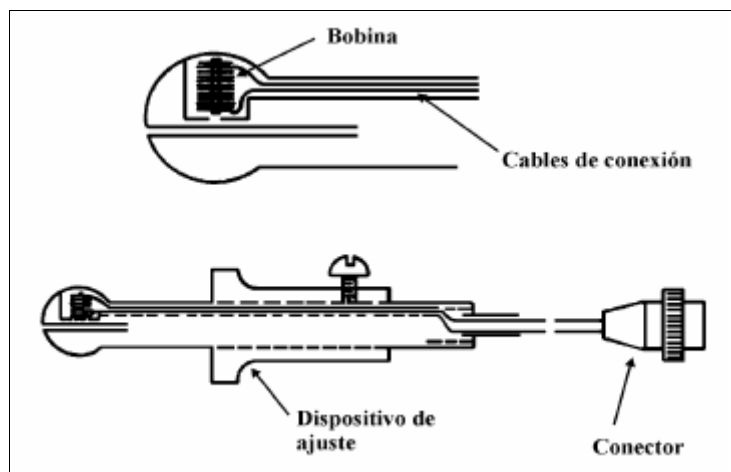


Fig. 9. Bobinas interiores⁽³⁵⁾.

Otra forma para clasificar las bobinas que se emplean, es con base en el arreglo eléctrico, y pueden ser de los siguientes tipos: a) Bobina única. b) Bobinas dobles. y c) Bobinas diferenciales^(29,35).

2.5.2.4. Bobina única (Absoluta)

Estos sensores (Fig. 10) utilizan una sola bobina para inducir la corriente parásita, y medir las variaciones del campo magnético secundario. En este caso, el dispositivo de medición puede ser un voltímetro, amperímetro u osciloscopio^(29,35).

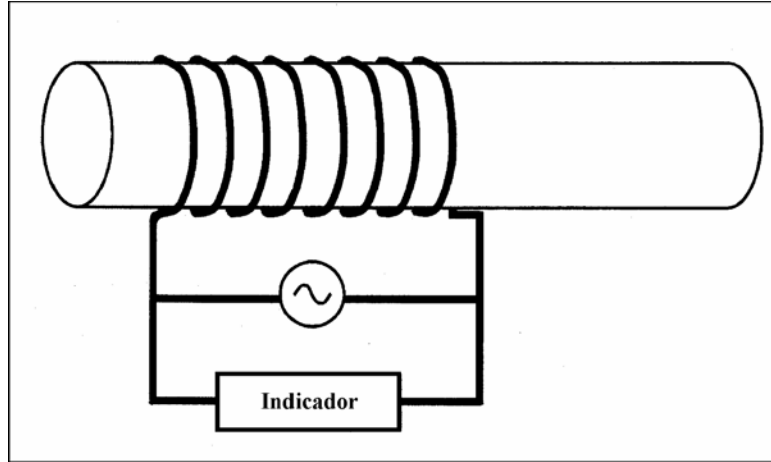


Fig. 10. Arreglo de bobina única⁽³⁵⁾.

2.5.2.5. Bobinas dobles

En este arreglo una bobina, llamada primaria, genera el campo magnético para inducir las corrientes inducidas; y una segunda bobina, conocida como secundaria, mide las variaciones del campo magnético secundario. Aunque los dos circuitos eléctricos son independientes, es común que una bobina se enrolle sobre la otra de forma que ambas prácticamente ocupan el mismo espacio. Sin embargo, existen otras configuraciones que se pueden adoptar, lo cual depende de la aplicación en particular (Fig.11)^(29,35).

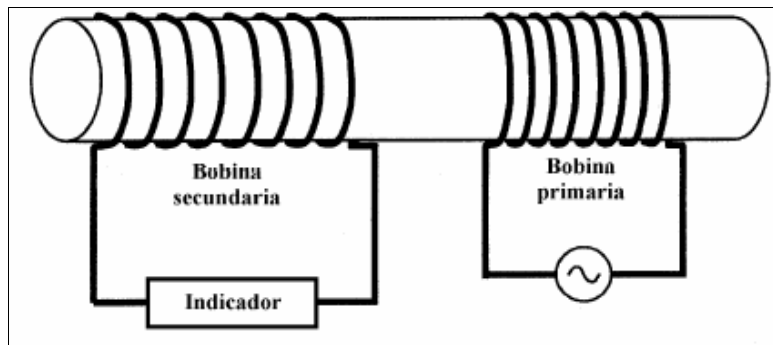


Fig. 11. Arreglo para medición absoluta de bobinas doble^(29,35).

2.5.2.6. Bobinas diferenciales

Los arreglos diferenciales conectan dos bobinas en serie, de manera que la corriente de Eddy se induce a dos piezas diferentes (la de referencia y la que se evalúa) (**Fig.12**), o a dos segmentos de una misma pieza. Con ello se obtiene una medición relativa entre ambas, y el circuito eléctrico se balancea de modo que sólo hay una medición diferente a cero cuando hay una diferencia entre ambos segmentos de material, resultando un método muy práctico⁽³⁵⁾.

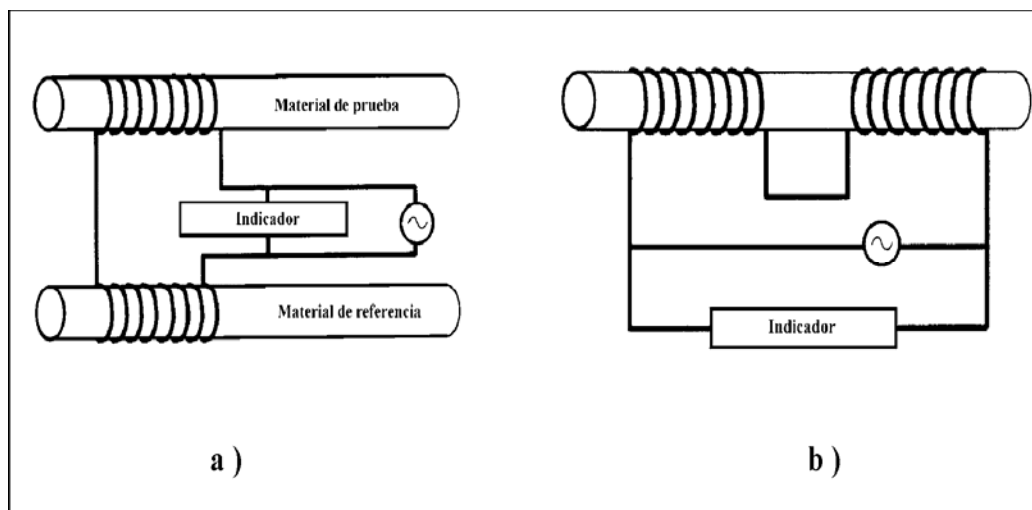


Fig 12. Arreglo de bobinas diferenciales. a) Comparación externa
b) Autocomparación⁽³⁵⁾

2.5.3. Parámetros que dependen de la conductividad eléctrica

El parámetro principal que describe el fenómeno de las corrientes inducidas es la conductividad, por lo que se aplica fundamentalmente en materiales conductores, y especialmente metales. Así, mediante una inspección por corrientes inducidas se pueden evaluar parámetros que dependen de la conductividad, tales como la temperatura; el tipo de aleación; el tratamiento térmico y su microestructura (tamaño de grano); la dureza; los esfuerzos residuales, y las discontinuidades. En general, a mayor conductividad,

mayor sensibilidad del método con una menor capacidad de penetración superficial (tabla.4)⁽³⁵⁾.

La aplicación del método de corrientes inducidas en los materiales conductores que incluyen a la mayoría de los metales, permite determinar el valor de su conductividad eléctrica tanto en miliohms/metro (mhos/m) como en porcentaje IACS (Patrón Internacional de Cobre Recocido). En este ultimo caso, se asigna al cobre recocido en estado puro, un valor de 100% IACS, a una temperatura de 20° Celsius, y los valores para los demás materiales, se expresan como porcentajes de este valor de referencia. En la tabla # 4, se recogen valores de resistividad eléctrica para diferentes materiales medidos en Ohm cm x 10⁻⁶ mientras que para la conductividad eléctrica se expresa en % IACS.

Tabla 4. Conductividad relativa de algunos metales y aleaciones⁽³¹⁾.

MATERIAL	RESISTIVIDAD (Ohm•cm 10 ⁻⁶)	CONDUCTIVIDAD (IACS)
Plata	1,63	105
Cobre recocido	1,72	100
Oro	2,44	70
Aluminio	2,82	61
Aluminio 6061-T6	4,1	42
Aluminio 7075-T6	5,3	32
Magnesio	4,6	37
Latón 70-30	6,2	28
Bronce Fosforado	16	11
Monel	48,2	3,6
Zirconio	50	3,4
Zircaloy – 2	72	2,4
Titanio	54,8	3,1
Acero Inox. 304	70	2,5
Inconel 600	98	1,7
Hastelloy X	115	1,5
Waspaloy	123	1,4

2.5.4. Sensibilidad del método de corrientes inducidas

La técnica de inspección por corrientes inducidas depende de varios parámetros, que corresponden a las propiedades del material que se va a inspeccionar, a las características de los sensores empleados, o del procedimiento mismo de inspección. La versatilidad de esta técnica depende en gran medida, del conocimiento de cómo interviene y se controla cada uno de los parámetros para una correcta aplicación e interpretación. Dichos factores son: Impedancia de la bobina, conductividad eléctrica del material ensayado; permeabilidad magnética del material ensayado; factor de distancia; factor de llenado; efecto de borde, y efecto pantalla^(29,35).

2.5.4.1. Impedancia de la bobina (Z)

Al hacer circular una corriente directa (DC) mediante la aplicación de una diferencia de potencial a través de un circuito, se encuentra que este se opone al paso de dicha corriente. Dicha oposición recibe el nombre de “Resistencia Ohmica” y es producida por los cables así como por los componentes del circuito propiamente dichos, su unidad de medida en el Sistema Internacional (SI) es el Ohmio (Ω) y se representa por la letra “ R ” Su principal efecto es que limita el valor de la corriente eléctrica que se alcanza en el circuito y el del campo magnético que se produce.

La situación es algo diferente cuando a través del circuito circula una corriente alterna (AC) ya que además de la resistencia ohmica (R) aparece una nueva resistencia la cual recibe el nombre de “Reactancia Inductiva” Esta también se mide en ohmios y se simboliza por la letra “ X_L ”. Esta nueva resistencia es producida por la combinación de dos efectos, a saber:

- Frecuencia (f) de la señal AC
- Efecto de la inductancia (L) de la bobina

En este caso ambos efectos (R y X_L) se combinan para producir una oposición resultante al paso de la corriente conocida como “Impedancia Eléctrica” simbolizada por la letra “ Z ”. Desde el punto de vista matemático, la *impedancia eléctrica* puede ser representada como un “*vector*” de dos componentes, una de ellas es la resistencia ohmica propiamente dicha mientras que la otra es la *reactancia inductiva* X_L . Esto se muestra en la figura 13.

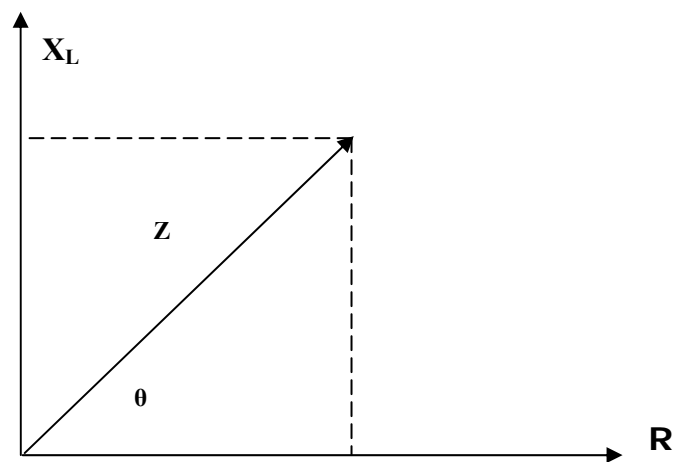


Fig. 13. Representación vectorial de la Impedancia ⁽³⁸⁾.

Cuando una pieza metálica es colocada dentro de una bobina o en su proximidad, el campo magnético que ella produce varía en respuesta al producido por las corrientes inducidas que se generan dentro de la misma. En general, tanto la resistencia ohmica como la reactancia inductiva varían. En especial, la resistencia “observada” por la bobina cuando se encuentra cerca de una pieza, está conformada por dos componentes: la resistencia producida por el alambre con el cual se encuentra hecha la bobina, al paso de la corriente alterna, junto con otra resistencia adicional debida a las propiedades del material de la pieza y su geometría. La variación de estas componentes, refleja las características de la pieza que se esta inspeccionando.

Es importante notar que cada condición característica de la pieza bajo estudio, puede producir un determinado valor de la impedancia del sistema (**Fig.13**) el cual se

mostraría en el gráfico como un “punto”. Al variar dichas propiedades este punto mostrará un “movimiento aparente”. Esto se ilustra en la figura 14 en la cual se muestra como cambia la posición del mencionado “punto” al variar los valores de conductividad eléctrica de la pieza (% IACS) cuando una bobina fue colocada en contacto directo con diferentes materiales.

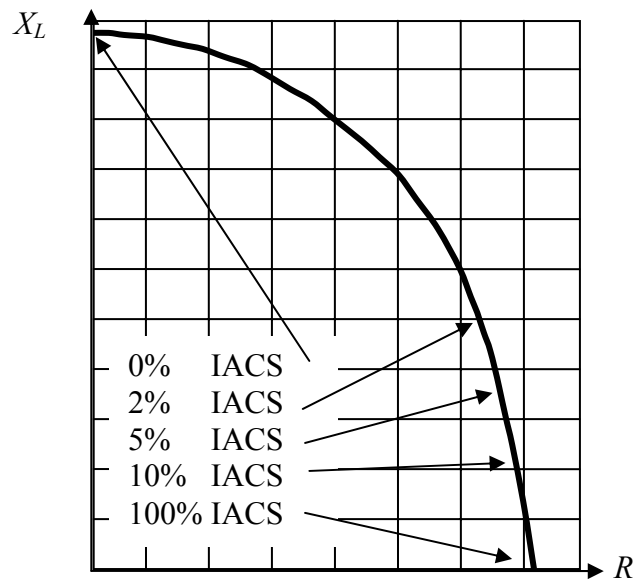


Fig. 14. Curva en el plano de impedancia para piezas con diferente conductividad eléctrica⁽³⁸⁾.

De la misma manera pueden construirse curvas que muestran como cambia la posición de punto que representa el valor de la impedancia del sistema con diferentes características de la pieza como aleantes, dureza, tratamiento térmicos, espesores de recubrimientos y discontinuidades entre otros⁽³⁸⁾.

Eléctricamente hablando, el sistema bobina – pieza puede ser visualizado como un circuito acoplado magnéticamente, por lo tanto puede ser representado de manera simplificada, por el circuito eléctrico que se muestra en la figura 15.

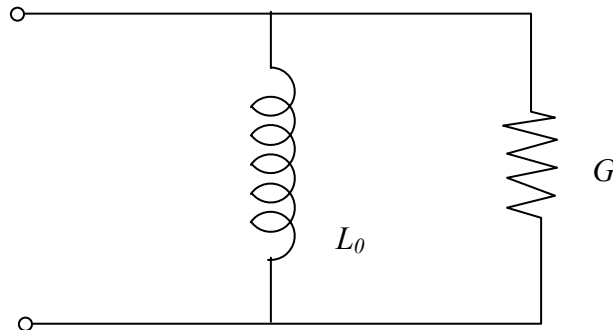


Fig. 15. Circuito equivalente del sistema bobina – pieza⁽³⁸⁾.

En el circuito anterior, la bobina contribuye con una constante de inducción L_0 junto con una resistencia ohmica la cual generalmente es despreciable (su valor aumenta con el número de vueltas del alambre con el cual se construye la bobina). Supondremos que la pieza bajo estudio es un tubo de paredes finas con una Conductancia Eléctrica (inverso de la resistencia) “ G ”. A medida que la corriente alterna circula por la bobina, durante cada uno de sus ciclos, parte de la energía es almacenada en la inductancia y devuelta al generador mientras que el resto es disipado en forma de calor (efecto Joule) en la resistencia. Se encuentra que la reactancia Inductiva (X_L) es proporcional a la energía almacenada en cada ciclo, mientras que la resistencia (R) es proporcional a la energía disipada en cada ciclo. Por otra parte, la impedancia (Z) es igual a la relación entre el voltaje aplicado (ε) y la intensidad de corriente (I) que circula por el circuito, como lo estipula la Ley de Ohm. En general, estas dos magnitudes varían en el tiempo de forma no sincronizada, hay un retardo temporal entre ellas, el cual se conoce como “*corrimiento en fase*” que viene representado numéricamente en unidades de ángulo. Cuando esta falta de sincronización sucede, se dice que las magnitudes se encuentran desfasadas entre sí⁽³⁸⁾.

2.5.4.2. Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética μ , es la capacidad de un material para permitir el paso de líneas de flujo magnético a través de él. Dicho de otra manera, es una medida de la facilidad con que el material es magnetizado ⁽²⁹⁾.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (11)$$

Donde:

B = Densidad del flujo magnético.

H = Intensidad del flujo magnético.

$\mu_r = 1$ Materiales no magnéticos.

$\mu_r \gg 1$ Materiales ferromagnéticos.

La relación anterior al ser graficada, forma lo que se conoce como *curva de magnetización* y se observa que debería ser una línea recta, desafortunadamente los valores de la permeabilidad van a depender no solo del material, sino de la fuerza magnetizante. En la figura 16 se muestra la forma típica de estas curvas para Hierro, se observa que al aumentar la intensidad del campo H (Fuerza magnetizante) el campo magnético que produce el material aumenta rápidamente al principio, pero luego este aumento se hace mas lento hasta que llega un momento en el cual ya no aumenta más a pesar de que H siga creciendo, cuando esto sucede se dice que el material esta magnéticamente saturado y como podemos observar, los valores de saturación dependen del material.

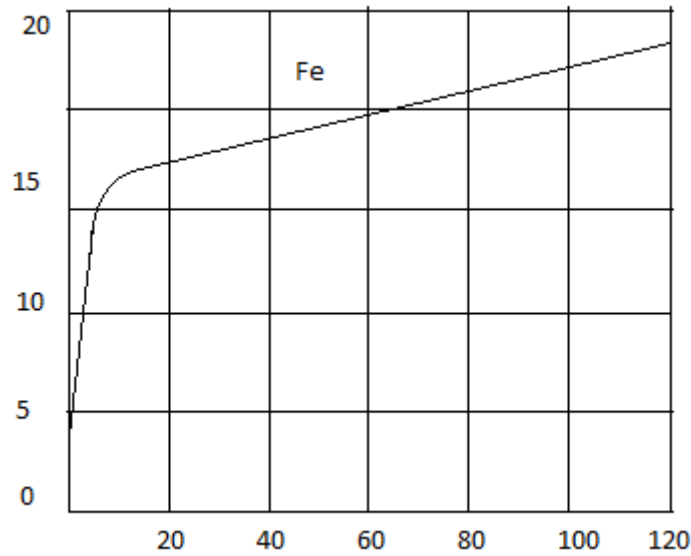


Fig. 16. Curvas de magnetización para Hierro⁽³⁸⁾.

En vista del comportamiento anterior, cuando se da el valor de la permeabilidad magnética de un material, se entiende que es el máximo valor que se puede obtener a partir de la curva de magnetización, como se muestra en la figura 17.

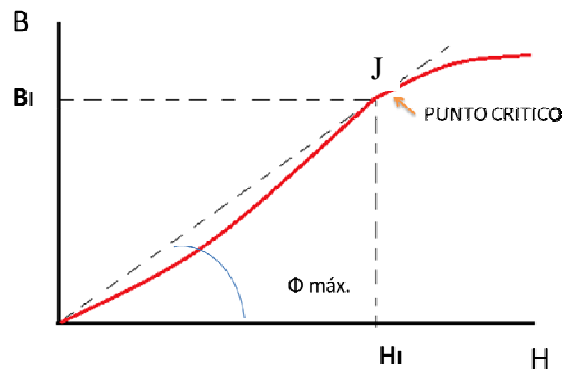


Fig. 17. Determinación de la permeabilidad magnética (máxima) para un material Ferromagnético⁽³⁸⁾.

Se observa que la pendiente da una recta tangente a la curva de magnetización en el punto en el cual la tasa de crecimiento cambia, en los valores de B y H en ese punto son los que se utilizan para determinar el máximo valor de la permeabilidad magnética. Esto se puede asumir, debido a que al comparar la definición (11) se ve que es igual a la de una pendiente, es decir:

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow m = \tan(\phi) = \frac{B}{H} \Rightarrow \mu = \tan(\phi) \quad (12)$$

Con esto en mente, puede verse que es posible trazar una curva que nos de el comportamiento de la permeabilidad magnetiza contra la fuerza magnetizante como puede apreciarse en la figura 18. En ella se observa que los valores de la permeabilidad crecen hasta alcanzar un valor máximo, luego disminuyen hasta alcanzar un valor aproximadamente constante el cual corresponde al caso en el cual el material esta saturado magnéticamente.

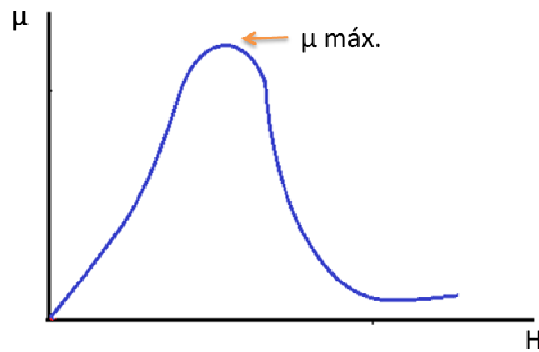


Fig. 18.- Curva $\mu - H$ para un material ferromagnético⁽³⁸⁾.

Un aspecto muy importante que debe ser tomado en cuenta a la hora de inspeccionar un material mediante la técnica de corrientes inducidas, es el efecto que la permeabilidad magnética tiene; ya que dichas corrientes son producidas por campos magnéticos variables, se tendrá que a mayor valor de permeabilidad del material, mayor será el flujo de corrientes inducidas producido ya que habrá una mayor intensidad de

campo. En los materiales ferromagnéticos, el efecto de la permeabilidad magnética es mucho mayor que el de la conductividad eléctrica, esto es particularmente mas acentuado cuando se utilizan bajas frecuencias ya que puede llegar a enmascarar la contribución de las otras variables. Las características del material responsables de producir los cambios en la conductividad eléctrica (composición química, tratamientos térmicos, etc.) también producen variaciones en la permeabilidad magnética.

2.5.4.4. Factor de distancia bobina-pieza (lift-off)

Las indicaciones de las corrientes inducidas son muy sensibles a la distancia entre la bobina y la superficie del material, debido a que la densidad de corriente disminuye rápidamente a medida que la bobina se separa de la superficie de la pieza (aproximadamente 20 micras). Es por ello que es necesario mantener una relación constante entre el tamaño y forma, tanto de la bobina como de la pieza a inspeccionar^(29,35).

Para eliminar o compensar este efecto, los equipos de corrientes inducidas tienen circuitos electrónicos adicionales, así como bobinas con dispositivos adicionales (resortes o curvaturas que permiten que la bobina siempre se mantenga en contacto con la pieza, o que sea constante la distancia bobina - pieza)

Las variaciones de la impedancia de la bobina con la distancia bobina-pieza, pueden verse sobre las curvas del Diagrama de Impedancia que corresponde a los cambios en Conductividad Eléctrica (por ejemplo) como se muestra en la figura 19.

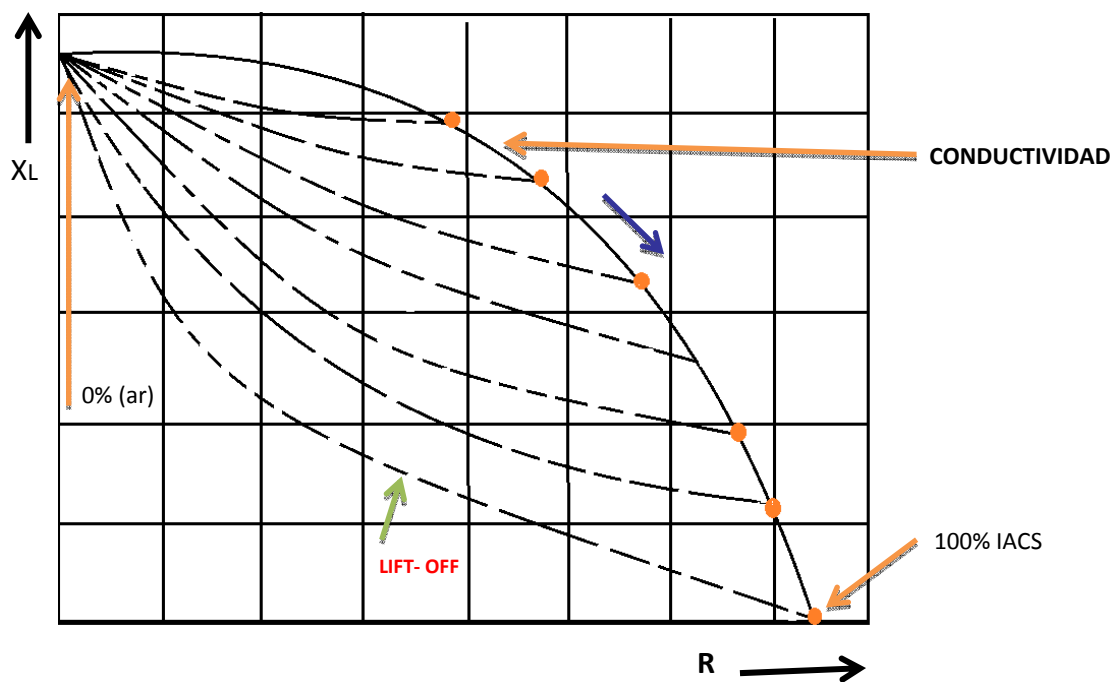


Figura 19. Diagrama de impedancia y efecto de Lift – Off⁽³⁸⁾.

Cuando la bobina se encuentra suspendida en el aire (lejos del material conductor) el valor de la impedancia que adquiere el sistema es el que se muestra en el lado izquierdo de la figura 19. A medida que la bobina se acerca al material conductor, este valor de impedancia cambia, su variación puede ser determinada ya que el punto de operación se mueve a lo largo de las líneas segmentadas de la figura anterior. Una vez que la bobina se encuentra en contacto con la pieza, la impedancia del sistema toma el valor correspondiente a cada material formándose de esta manera la línea sólida. Este comportamiento puede ser explicado de la siguiente manera:

- 1.- La bobina y la pieza forman un sistema acoplado magnéticamente a través del proceso de Inducción Electromagnética, esto tiene como consecuencia que los

principales parámetros eléctricos que caracterizan el sistema, sean el resultado de las contribuciones de ambos elementos, es decir:

$$X_L^{Sist} = X_L (X_L^{Bob.}, X_L^{Pieza}) \text{ y } R^{Sist.} = R (R_{Bob.}, R_{Pieza}) \quad (13)$$

2.- En general, las bobinas se fabrican con un número de vueltas pequeño, esto hace que los valores de su inductancia y resistencia sean menores que los producidos por el material conductor sobre el cual ellas se colocan (pieza). Esto hace que el punto de operación se coloque sobre la línea sólida.

3.- Al alejarse la bobina de la pieza, el efecto que ésta produce sobre los valores de inductancia y resistencia del sistema disminuye, luego solo quedan los que corresponden a la bobina los cuales por diseño cumplen la siguiente relación:

$$X_L^{Bob.} \gg R^{Bob.} \quad (14)$$

4.- En los modernos equipos de Corrientes Inducidas, el diagrama de impedancias que se representa en las pantallas se conoce como **Diagrama de Impedancias Normalizado** cuya característica principal es que los valores que se grafican en los ejes son:

$$X_{Graf} \rightarrow \frac{X_L^{Sist.}}{X_L^{Bob.}} \text{ y } R_{Graf} \rightarrow \frac{R_{Sist.}}{X_L^{Bob.}} \quad (15)$$

5.- En base a lo ya mencionado, podemos ver que el efecto de la normalización (división) de la impedancia es el siguiente:

$$\text{Aire} \Rightarrow X_{Graf} \rightarrow \frac{X_L^{Bob.}}{X_L^{Bob.}} \rightarrow 1 \text{ y } R_{Graf} \rightarrow \frac{R_{Bob.}}{X_L^{Bob.}} \rightarrow 0 \quad (16)$$

$$\text{Material} \Rightarrow X_{Graf} \rightarrow \frac{X_L^{Pieza}}{X_L^{Bob.}} \text{ y } R_{Graf} \rightarrow \frac{R_{Pieza}}{X_L^{Bob.}} \quad (17)$$

Lo cual tiene como consecuencia que al colocar la bobina en el aire, el punto de operación toma el valor de “1” sobre el eje vertical, y al colocarla sobre la pieza, este se coloca en algún lugar sobre la línea sólida dependiendo del valor de resistividad de la pieza. Este proceso es el responsable de que al variar el *Lift – Off* el punto de operación siga las líneas segmentadas. Es importante señalar que este efecto es muy intenso cuando las frecuencias que se aplican a las bobinas exploradoras son altas. Más adelante se mostrara la importancia de identificar este movimiento⁽³⁸⁾.

Khan et al.⁽³⁹⁾, estudiaron las variaciones en el flujo de corrientes de eddy en un acero inoxidable austenítico después de reducciones en frío. Las muestras fueron evaluadas después de cada paso de reducción en frío (de pasos de 10% de reducción hasta 80%) por deformación en el flujo de corrientes de eddy, cambios de fase de la lift off , dureza Vickers y difracción de rayos X. Se obtuvo como resultado que sólo la variación del porcentaje de austenita afecta el flujo de corrientes de Eddy y sus fases de lift off como se muestra en las figuras 20, 21 y 22.

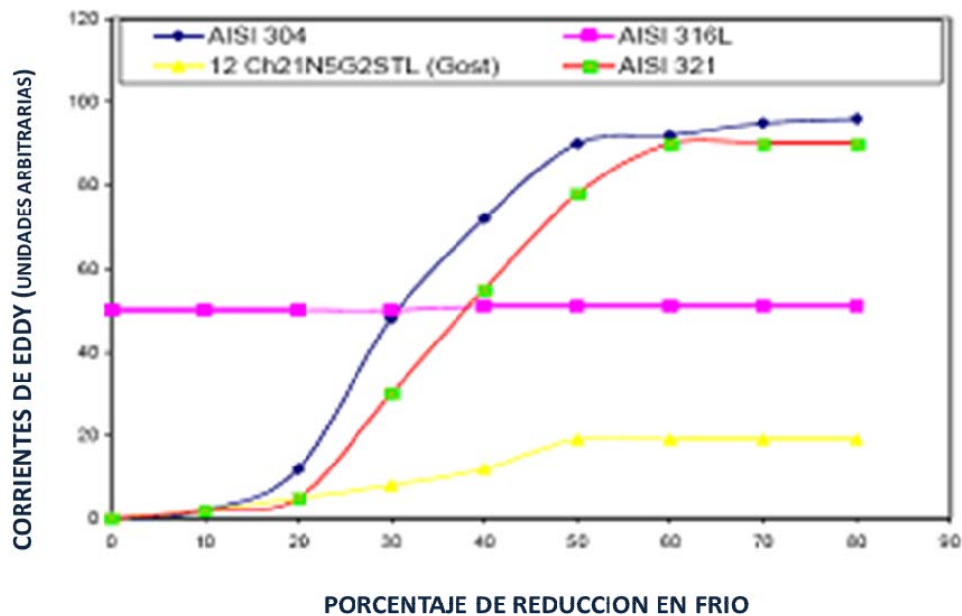


Fig. 20. Variación de las corrientes de Eddy en función del porcentaje de reducción en frío.

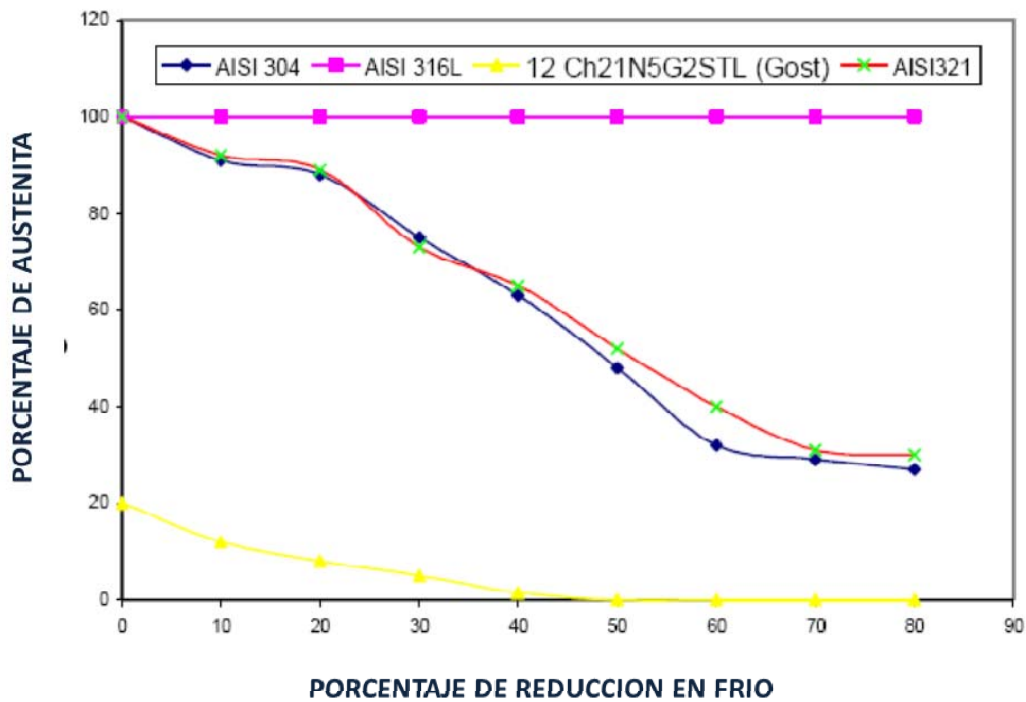


Fig. 21. Variación de la de austenita en función del porcentaje de reducción en frío⁽³⁹⁾.

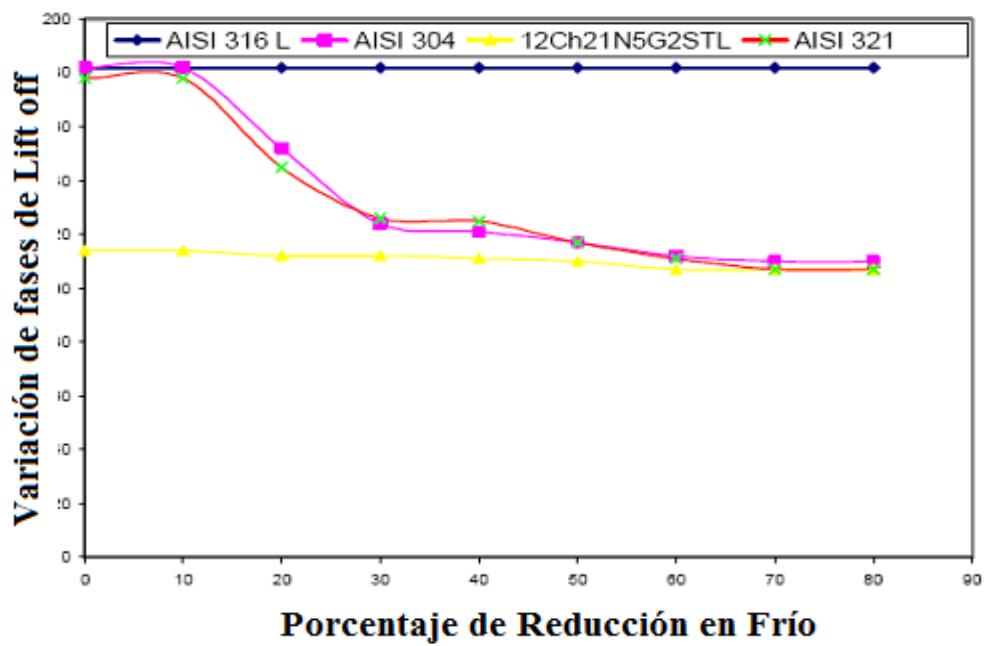
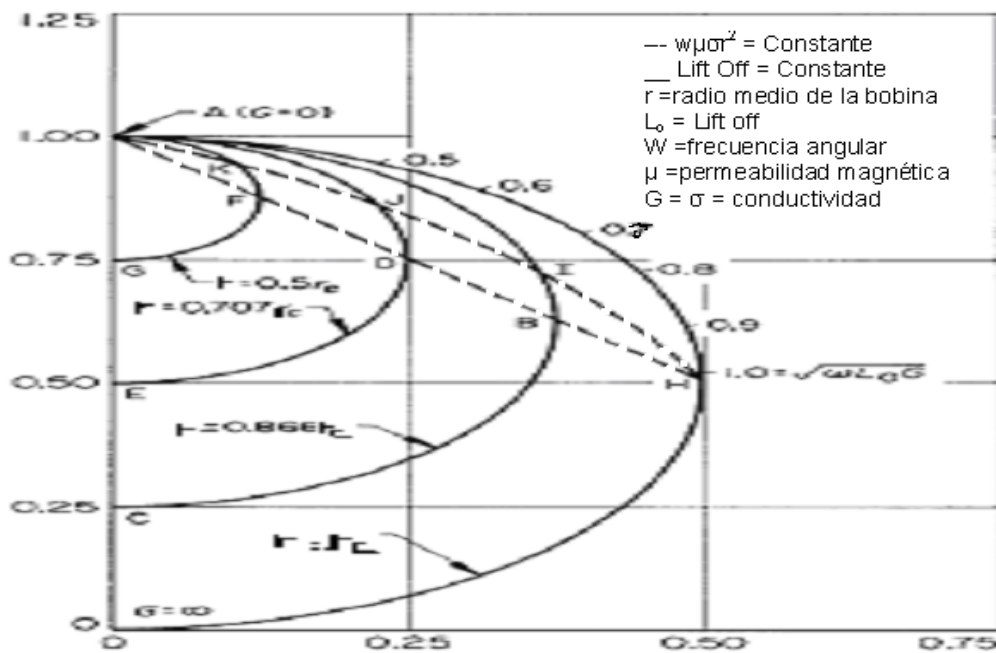


Fig.22. Variación de Lift off en función del porcentaje de reducción en frío⁽³⁹⁾.

2.5.4.4. Factor de relleno (fill factor)

El factor de relleno, describe el caso de bobinas exteriores o interiores, que no están en contacto con productos tubulares (como por ejemplo una tubería), es el mismo efecto que en el lift off, pero para las bobinas de superficies. Al respecto, el factor de relleno es sensible a la distancia que hay entre la superficie del material y la bobina, que fundamentalmente se deben a las variaciones en el diámetro (interior o exterior, según sea el caso) de la pieza y del diámetro de la bobina^(29,35).

Para el caso en el cual se inspeccionan productos tubulares (Por ejemplo tuberías) ya sea con bobinas envolventes o internas, se producirá un efecto similar al de Lift – Off ya que es muy difícil en la práctica que este tipo de bobinas se encuentre en contacto con el componente a inspeccionar. Para este tipo de productos, el análogo del efecto del Lift – Off se conoce como **Factor de Llenado (η_f)** Su efecto ha sido estudiado experimentalmente y su influencia se muestra en la figura 23.



Resistencia Normalizada (ohms) versus Reactancia Inductiva Normalizada (ohms)

Fig. 23. Efecto del Factor de Llenado⁽³⁸⁾.

En el caso de la inspección mediante bobinas envolventes (externas) con un diámetro interno (D_{ib}) de una tubería con un diámetro externo (D_{et}).

El factor de Llenado se define como:

$$\eta_t = \left(\frac{D_{et}}{D_{ib}} \right)^2 \quad (18)$$

De la definición anterior se puede observar que los valores del factor de llenado se encuentran entre 0 y 1. Para el caso en el cual se inspecciona una tubería con un diámetro interno (D_{it}) mediante una bobina interna con diámetro externo (D_{eb}) la definición de factor de llenado cambia a:

$$\eta_t = \left(\frac{D_{eb}}{D_{it}} \right)^2 \quad (19)$$

Lo deseable en una inspección, es que las bobinas que se emplean tengan las dimensiones suficientes para que el valor del factor de llenado sea el mayor posible. En la mayoría de los casos, se recomienda una separación entre la bobina y la pieza entre 2 y 3 mm, esto permite aumentar la sensibilidad a la hora de detectar discontinuidades pequeñas. En otras aplicaciones como clasificación de materiales en base a su composición química (Sorting), tratamientos térmicos o dureza, se pueden utilizar valores menores del factor de llenado. En estos casos, si una pieza tiene un espesor mayor que el grosor del enrollado de la bobina, se puede usar un valor alrededor del 25 % (Puede usarse hasta un 10 %) en el caso contrario, se recomienda usar valores mayores al 50 %⁽³⁸⁾.

2.5.4.5. Efectos de borde o frontera (Edge Effect)

El efecto de borde se relaciona con la distorsión en el flujo de corriente inducida, cuando la bobina se aproxima al borde de la pieza o a una unión entre materiales (**Fig. 24**). Una distorsión grande en el flujo de corriente puede tener cambios importantes en las mediciones y, por tanto, enmascarar variaciones por otro tipo de anomalías. A pesar de que existen diseños de bobinas que reducen el área de inspección minimizando el efecto de borde, éste no se puede eliminar completamente, y es recomendable que el área de inspección se mantenga a una distancia determinada de los bordes o fronteras. En general, se establece 3,175 mm (1/8") como la distancia mínima a la que se puede aproximar el área de inspección al borde; sin embargo, el valor depende del tipo y tamaño de bobina y la frecuencia de la corriente alterna de prueba⁽³⁵⁾.

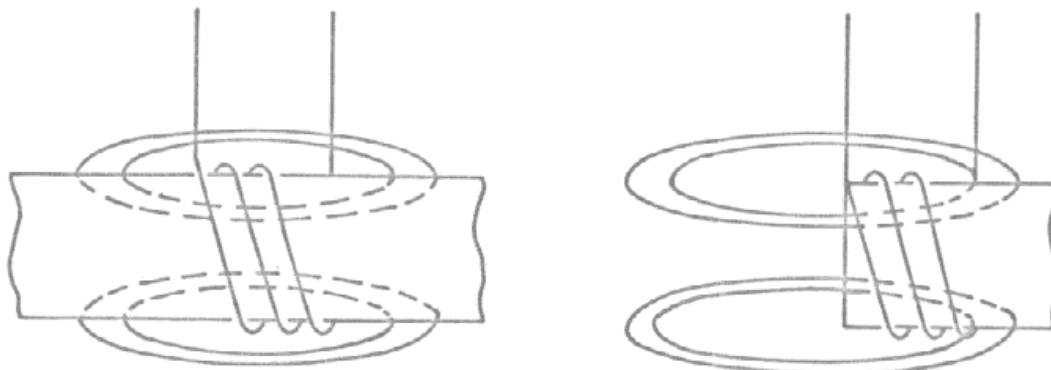


Fig. 24. Efecto de Borde⁽³⁸⁾.

La magnitud de este efecto puede ser tan pronunciada, como para enmascarar las señales producidas tanto por discontinuidades como por cambios en las propiedades magnéticas presentes en esas zonas. Algunas recomendaciones que permiten en principio minimizar este efecto son las siguientes⁽³⁸⁾:

- En el caso de inspección mediante bobinas, se recomienda que estas tengan dimensiones pequeñas.

- Se recomienda **No Inspeccionar** a distancias menores de 3 mm del borde de la pieza.
- En inspección de tubos o barras con equipos automatizados, el equipo es “desconectado” cuando los extremos del material pasan por las bobinas. Esta región por lo tanto no es inspeccionada., Se debe evaluar mediante alguna otra técnica.

2.5.4.6. Efecto piel (Skin Effect)

Además de la relación geométrica existente entre la bobina y la pieza de ensayo, el espesor de esta última condiciona también el flujo de las corrientes inducidas⁽²⁹⁾. La variación de la densidad de corriente varía en función de la profundidad; puede observarse (**Fig. 25**) cómo disminuye rápidamente la densidad de corriente a medida que aumenta la profundidad, por lo que prácticamente las corrientes inducidas se presentan en la superficie del material. A este fenómeno se le denomina “efecto piel” y se debe al campo magnético secundario que las mismas corrientes inducidas producen⁽³⁵⁾.

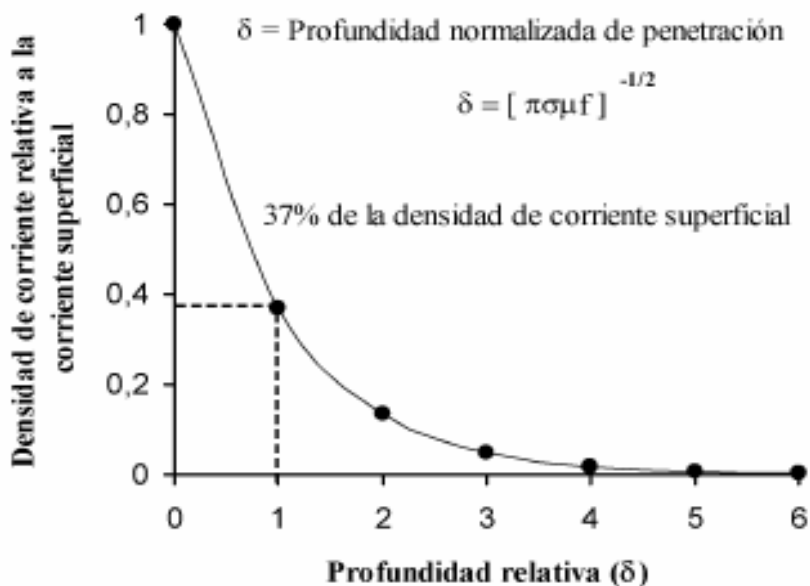


Fig. 25. Variación de la intensidad de corriente con la profundidad⁽³⁵⁾.

En esta figura se observa que las corrientes inducidas parten de un valor máximo cerca de la superficie, este valor disminuye a medida que aumenta la profundidad en la pieza, hasta que se llega a un punto en el cual solo queda el 37 % del valor que se tenía en la superficie.

Este valor tan especial de profundidad, se define como la **Profundidad Estándar de Penetración (δ)**:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma \mu_r \mu_0 f}} \quad (20)$$

Donde : δ = Prof. Estándar de Penetración (mt)

σ = Conduct. Eléctrica del Material (Mhos /m , m / Ω m²)

μ_r = Perm. Magnética Relativa (Adimensional)

μ_0 = Perm. Magnética del vacío (= 1,25 x 10⁻⁶ Herios / mt)

f = Frecuencia de la señal AC (Hz)

La expresión anterior se puede simplificar, si se conoce la Permeabilidad Magnética del material, pero esto no siempre es posible.

En la figura 26 se aprecian las gráficas típicas de la profundidad normalizada de penetración como función de la frecuencia para diferentes materiales. Nótese que dicha profundidad aumenta inversamente con la frecuencia, por lo que se definen dos rangos de inspección: corrientes de Eddy de baja frecuencia (LFEC), que corresponden a valores de frecuencia entre 100 Hz y 50 kHz; y corrientes de Eddy de alta frecuencia (HFEC) para frecuencias mayores de 100 kHz.

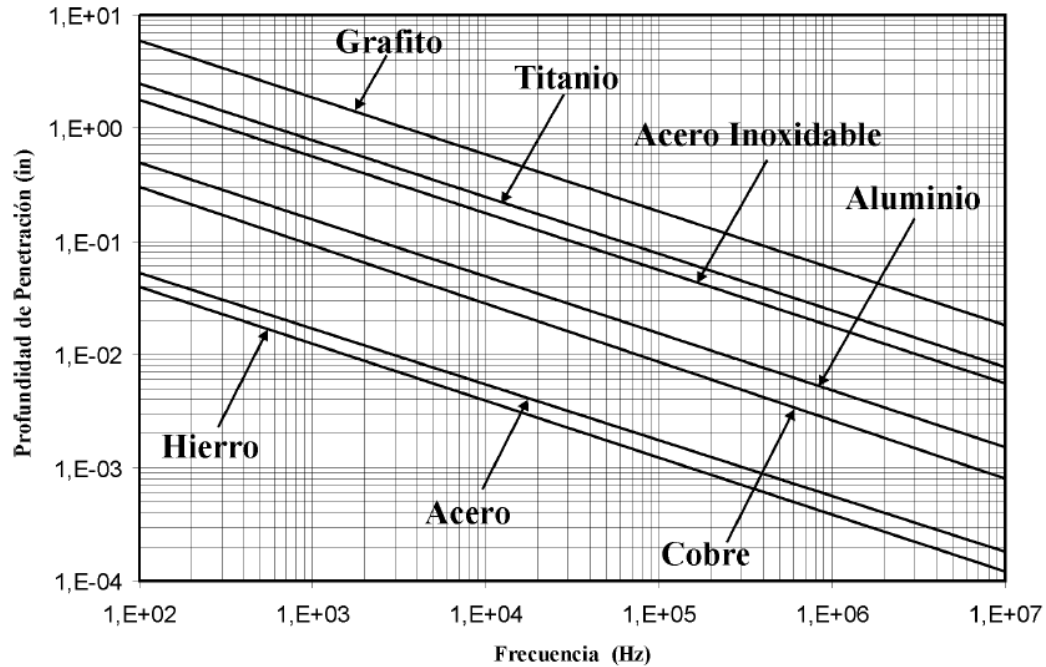


Figura 26 Profundidad normalizada de penetración, como función de la frecuencia y para varios materiales⁽³⁸⁾.

También se observa que el valor de (δ) aumenta cuando la conductividad disminuye, con lo que se tiene mayor penetración en materiales que no son buenos conductores. Adicionalmente, la capacidad de penetración es menor para materiales ferromagnéticos (es decir, la profundidad disminuye cuando aumenta μ). Como se mencionó, los materiales ferromagnéticos generalmente se pueden saturar magnéticamente con una bobina adicional, por lo que el valor de μ no presenta variaciones cuando se cambia la frecuencia.

El efecto de pantalla hace que exista un espesor límite para realizar una inspección no destructiva por corrientes de Eddy; cuando se evalúan espesores, la capacidad de medición está restringida hasta el valor de la profundidad de penetración normalizada (δ) para el material y la frecuencia utilizada. Por tanto, se puede afirmar que la técnica por corrientes Eddy es más precisa para piezas delgadas, en contraste con la

inspección por ultrasonido que es mejor para piezas gruesas. En consecuencia, se concluye que ambas técnicas son complementarias en ciertos casos.

Las características principales de la profundidad estándar de penetración (δ) son:

- a.- Depende de las propiedades electromagnéticas del material.
- b.- Depende de la frecuencia de la señal AC con la cual se producen las corrientes inducidas.
- c.- Implica que el 63 % de las corrientes inducidas, se encuentra a profundidades menores.
- d.- Establece límites prácticos en la aplicación de la técnica.

2.5.4.7. Efecto de los materiales Ferromagnéticos.

Al realizar un ligero análisis de la expresión para la profundidad estándar de Penetración, puede concluirse que los materiales ferromagnéticos plantean fuertes problemas a la hora de ser inspeccionados mediante corrientes inducidas. En especial los altos valores de permeabilidad magnética relativa que ellos tienen, producen el indeseable efecto de reducir los valores de δ que se pueden alcanzar en el material ya que esta es inversamente proporcional a dicha permeabilidad. Una alternativa para minimizar este efecto surge cuando recordamos las curvas de magnetización de un material ferromagnético (**Fig. 16**). De ellas se desprende que si saturamos magnéticamente el material, este alcanzará un valor de permeabilidad magnética relativa aproximadamente constante, en especial este valor no será alto lo cual puede ser observado en la figura 17, en el punto a partir del cual el campo magnético del material se hace independiente de la fuerza magnetizante. Esta disminución en el valor de la permeabilidad magnética tendrá como consecuencia inmediata un aumento en la profundidad de penetración⁽³⁸⁾.

Zhou et al.⁽⁴⁰⁾, por medio del uso de las corrientes de Eddy estudiaron defectos superficiales en un material variando los siguientes parámetros dimensionales: profundidad del defecto, ancho del defecto y ambos casos. Determinaron que se puede evaluar cuantitativamente el defecto superficial en términos de su posición y tamaño en función del valor de los picos de salida diferencial del equipo. Y llegaron a la conclusión de que dichos picos son más sensibles a la variación de profundidad del defecto que a la variación del ancho en una medida estática.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental fue llevado a cabo según el esquema que se muestra en la figura 27.

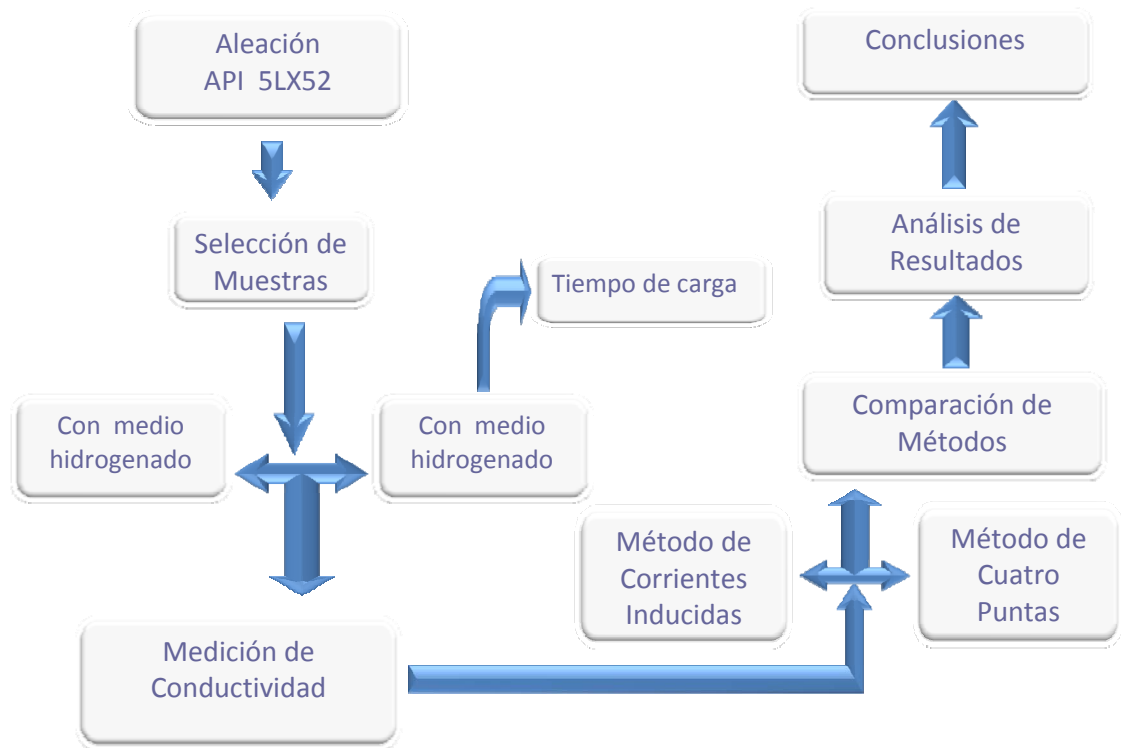


Fig.27. Organigrama general del procedimiento experimental propuesto

3.1. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras a utilizar en este estudio fueron obtenidas en el trabajo de grado de la Dra. Sonia Camero⁽³⁾ y corresponden a una tubería API 5L X52 con un diámetro externo $\approx 16,83\text{cm}$, diámetro interno $\approx 15,41\text{cm}$, espesor $\approx 0,71\text{cm}$ y con una longitud $\approx 1,20\text{m}$, de la cual se prepararon muestras de tracción de sección plana, con dimensiones proporcionales a la estándar según la norma ASTM E-8. Estas

muestras se sometieron a diferentes tratamientos térmicos y fueron expuestas a un medio hidrogenado y caracterizadas por microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB) y transmisión (MET). Las dimensiones de las probetas sin traccionar se indican en la figura 28.

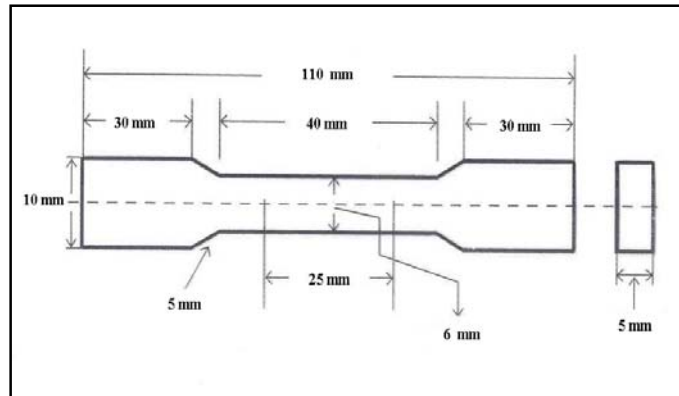


Fig. 28. Probeta de tracción proporcional a la muestra estándar⁽³⁾.

En la investigación, se utilizaron tres grupos de probetas (muestras 1, muestras 2, muestras 3) de las cuales se tomó una muestra del material de entrega sin exposición al medio hidrogenado y sin tratamiento térmico como patrón, y se tomaron muestras con diferentes tratamientos térmicos (recocido, normalizado y temple) a diferentes tiempos de carga (0, 1, 3 y 6 horas).

En la siguiente figura se señala la zona de las probetas donde se realizaron las mediciones mediante los ensayos no destructivos (método de corrientes inducidas y método de las cuatro puntas).

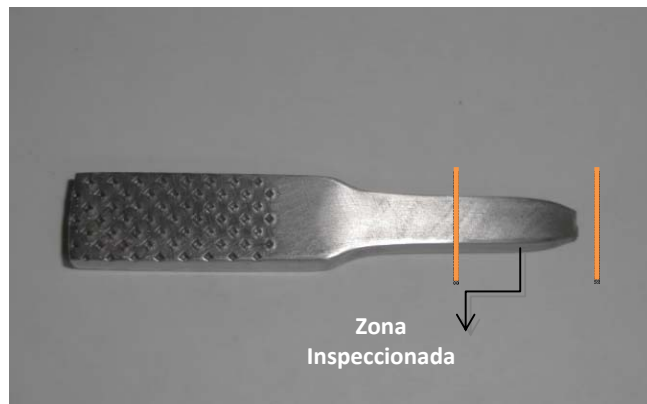


Fig.29. Zona de inspección en las probetas estudiadas.

La identificación de las probetas analizadas se indica en la tabla 7.

Tabla 5. Identificación de las muestras.

CONDICION	TIEMPO DE CARGA (horas)	IDENTIFICACION
Material de Entrega	0	ME
	1	ME 1H
	3	ME 3H
	6	ME 6H
Material Normalizado	0	MN
	1	MN 1H
	3	MN 3H
	6	MN 6H
Material Recocido	0	MR
	1	MR 1H
	3	MR 3H
	6	MR 6H
Material de Temple	0	MT
	1	MT 1H
	3	MT 3H
	6	MT 6H

3.2. ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL DE ENTREGA

La composición química promedio de la muestra de tubería⁽³⁾, se encuentra dentro del intervalo de composición química establecido por el Instituto Americano de Petróleo [API] para este tipo de tubería de línea, como se puede verificar a partir de los valores contenidos en la tabla 6.

Tabla 6. Composición química del acero API 5L X52

Elementos (% en peso)									
C	Mn			P			S		
0,09	0,89			0,019			0,001		
C*	Mn**						S*		
0,083	0,733						0,0021		
Si	Al	Cu	V	Mo	Nb	Ti	Cr	Ni	Ca
0,14	0,027	0,01	0,06	0,001	0,007	0,001	0,001	0,02	0,1461
Si**	Al**	Cu**						Ni**	
0,15	0,034	0,011						0,0131	

Sin * Espectrómetro de chispa (planta).

* Método gasométrico (laboratorio)

** Espectrofotometría de absorción atómica de llama (laboratorio)

3.3. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Para medir la conductividad eléctrica del material se utilizaron dos métodos de ensayos no destructivos: método de corrientes inducidas (reflexión) y método de las cuatro puntas. La finalidad de estos ensayos es verificar el cambio de conductividad eléctrica producidos por el ampollamiento de hidrogeno a diferentes tiempos de carga en el material de entrega y el tratado térmicamente.

3.3.1. Método de Corrientes Inducidas

Equipo:

Para la aplicación del método de corrientes inducidas se utilizó un equipo de inducidas marca MAFNAFLUX modelo ED 810 (Fig. 30) con bobinas con núcleo de aire. El equipo consta de una pantalla dividida en cuadrículas, estas permiten obtener valores de conductividad eléctrica de un material conductor de forma cualitativa mediante un patrón de referencia.

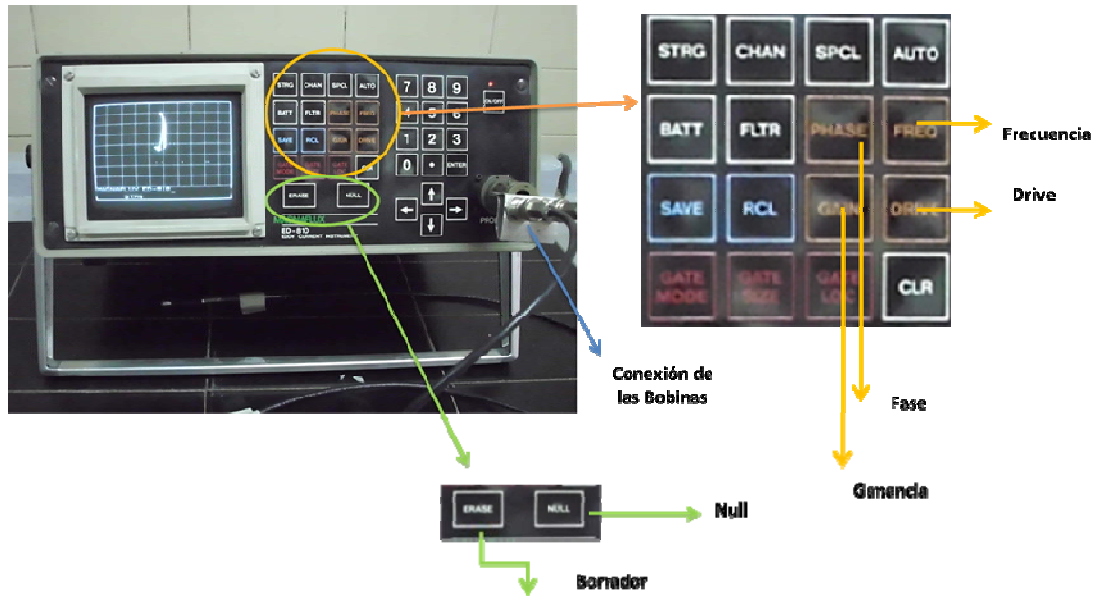


Fig. 30. Equipo de corrientes inducidas.

La técnica utilizada de corrientes inducidas fue de reflexión, la cual consiste en inducir corrientes de Eddy por medio de una bobina externa con corriente alterna que genera un campo magnético variable. Estas corrientes inducidas originan un campo magnético secundario que tiende a contrarrestar el primero, y esta variación entre los campos es medida por la misma bobina.

Procedimiento:

Se evaluaron tres juegos de muestras traccionadas de acero API 5L-X52 (**fig.31**), cada uno con su respectiva muestra patrón, con la finalidad de medir la variación de conductividad en función del tiempo de carga. Cabe destacar que debido a que la señal captada por el equipo de corrientes inducidas varía según el tipo de tratamiento térmico, se selecciono una muestra patrón sin ser expuesta al medio hidrogenado en cada tratamiento térmico utilizado.

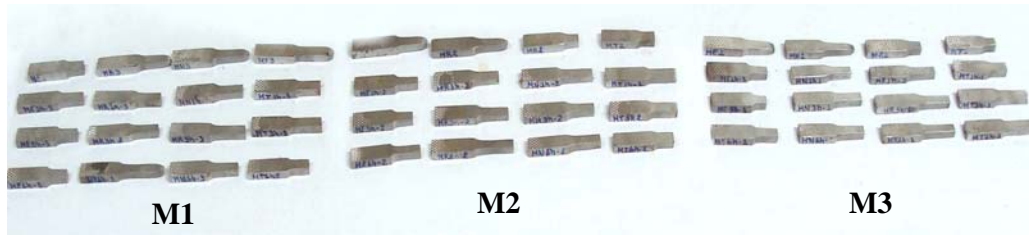


Fig. 31. Muestras de tracción ensayadas.

Las probetas analizadas permanecieron dentro de un imán marca MAFNAFLUX (**Fig. 32**) durante la realización del ensayo de manera de poder garantizar la saturación magnética de las mismas ya que se trata de un material ferromagnético. Al saturar magnéticamente el material, este disminuirá su valor de permeabilidad magnética relativa y por ende aumentará su profundidad estándar de penetración, como se puede observar en la ecuación 20⁽³⁸⁾.

La profundidad estándar de penetración de las muestras sin saturación magnética fue de 0,00049mm aplicando un valor de permeabilidad magnética relativa igual a 1. Sin embargo, en las muestras saturadas magnéticamente fue de 1,57mm., aplicando un valor de permeabilidad magnética relativa igual a 500.

El ensayo fue realizado bajo las siguientes condiciones:

- Humedad relativa: 41 %
- Temperatura: 25 °C
- Drive: 100 %
- Ganancia: 70 Khz
- Frecuencia: 130 Khz
- Lift off: Vertical
- Fase: 303°

Una vez estabilizado el equipo, desengrasado las probetas y colocado la lift off de las muestras patrón en el eje “Y” del sistema de referencia del diagrama de impedancia, se procedió a tomar tres (3) medidas por cada cara de las probetas,

utilizando siempre las probetas no expuestas al medio hidrogenado como patrón en cada caso, siendo el valor reportado el promedio de las seis (6) mediciones.

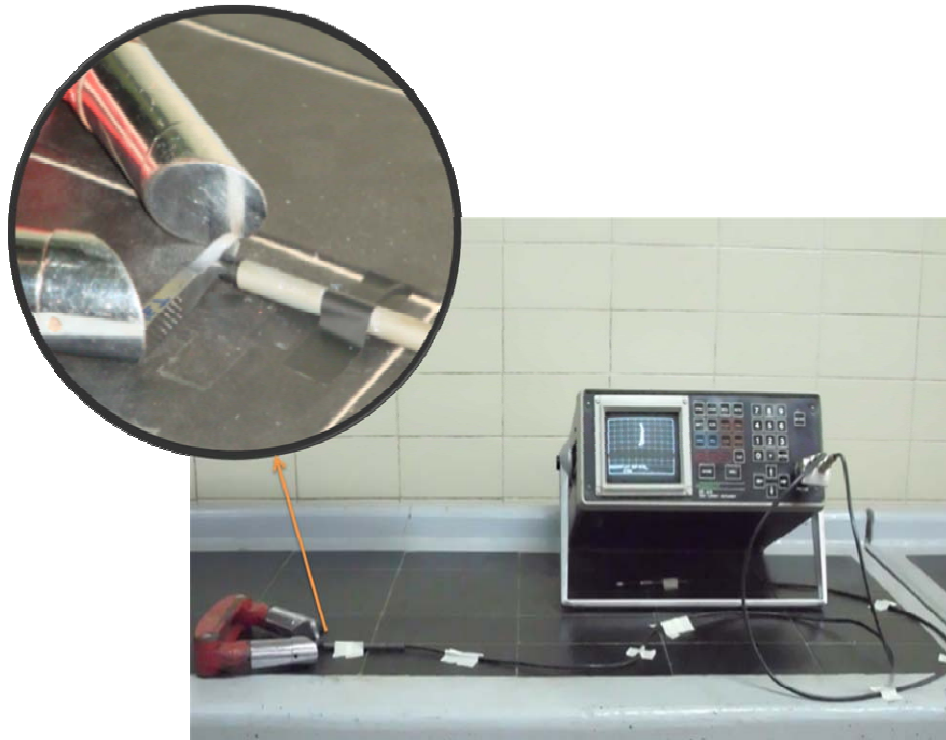


Fig. 32. (a) Medición de la variación de las corrientes de Eddy y (b) Saturación magnética de la probeta.

Las medidas tomadas se observan como trazos continuos en el diagrama de impedancia, por lo que se puede estimar el aumento o la disminución de la conductividad de acuerdo a como se desplacen los trazos, a lo largo y ancho de cada una de las divisiones según sea el caso, como se puede observar en la figura 34.

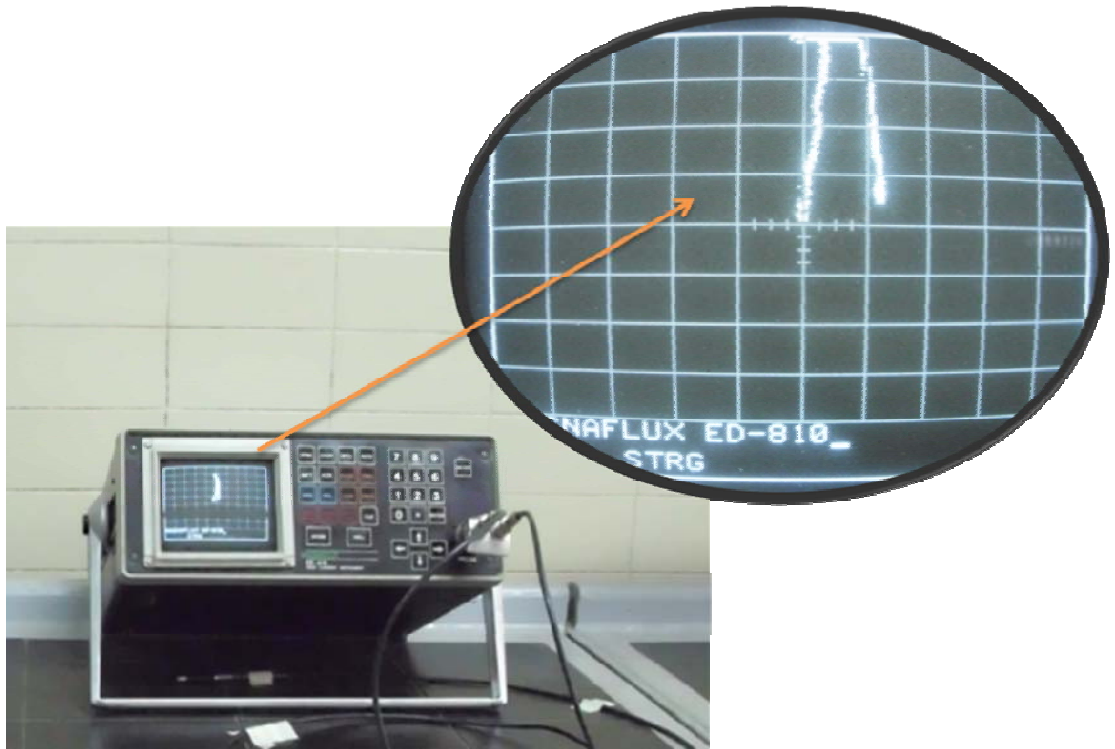


Fig. 33. a) Aplicación de corrientes inducidas y b) Valores observados en la pantalla del equipo.

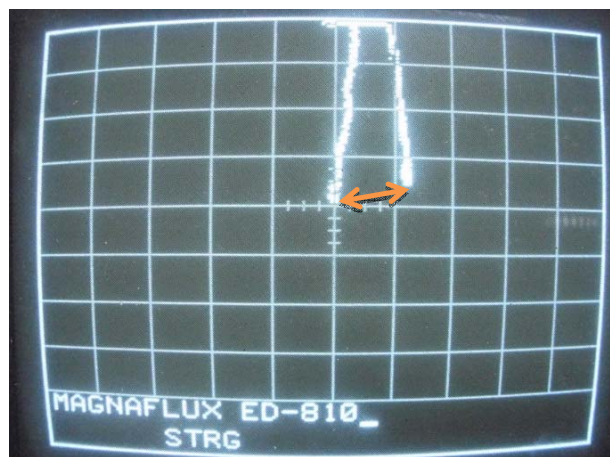


Fig.34. Variación en el diagrama de impedancia debida a diferentes tiempos de carga.

Para lograr colocar la señal vertical dentro de la pantalla, se fue variando la frecuencia, la ganancia y la fase. Al colocar las señales de las muestras patrón en el eje “Y”, se procedió a medir (en mm.) por medio de un vernier la distancia entre la curva patrón y las arrojadas en los diferentes tiempos de permeación en cada caso.

3.3.2. Método de las Cuatro Puntas

Para la aplicación del método de las cuatro puntas, corriente “DC”, se realizó un montaje con los siguientes equipos:

- Multímetro digital marca HP modelo 34401 A (voltaje).
- Fuente de poder triple output DC power supply 1660 modelo BK precisión.
- Amperímetro modelo 441B.
- Condensador de 40.000 microfaradios.
- Voltímetro (1000 V).

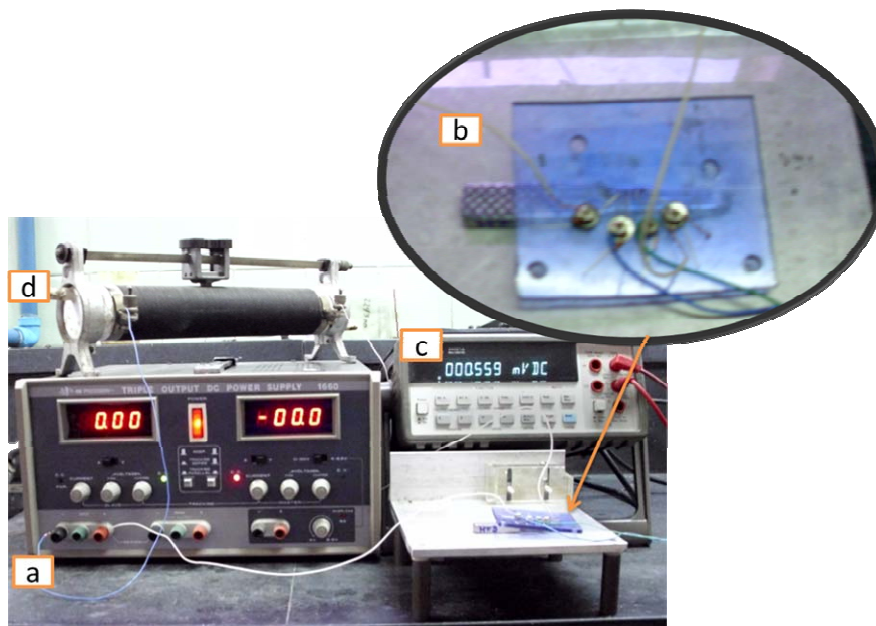


Fig. 35. Montaje para medición por el método de cuatro puntas. (a) Fuente de poder, (b) vista desde arriba de la toma de medición de conductividad eléctrica, (c) voltímetro y (d) condensador.

El montaje para la medición de conductividad eléctrica por el método de cuatro puntas se ilustra en la figura 35, y consta de cuatro (4) electrodos (dos puntas externas conectadas a la fuente de poder y dos puntas internas conectadas al multímetro), que se colocaron en línea recta a una misma distancia de separación entre ellas sobre las probetas de acero API 5L- X52. El valor de voltaje fue medido mediante un multímetro y comprobado por una fuente de poder, un amperímetro y un voltímetro.

En el ensayo montado, los dos puntos extremos (corriente) representan el dipolo y los dos puntos internos miden la diferencia de potencial, como se observa en la figura 36.

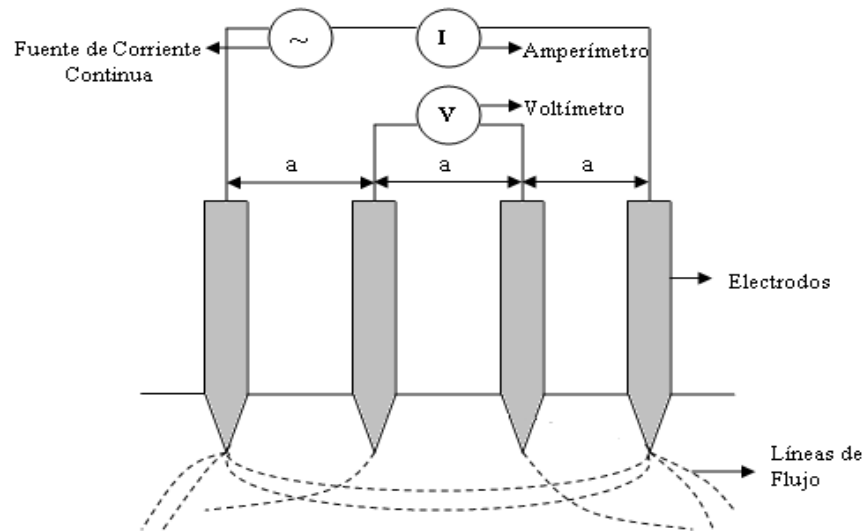


Fig.36. Esquema del montaje del método de las cuatro puntas.

La conductividad eléctrica se midió en S/m según la siguiente ecuación⁽⁴¹⁾:

$$\sigma = \frac{i}{2\pi aV} \quad (21)$$

Donde:

σ = Conductividad (S/m).

V = Voltaje (V).

i = Intensidad de corriente (Amperios).

a = Distancia de separación entre los electrodos (mm).

Una vez desengrasadas las probetas se procedió a tomar 10 medidas de diferencia de voltaje en cada una de dichas probetas, siendo el valor reportado el promedio entre ellas. La intensidad de corriente utilizada fue de 0,5 amperios y la distancia entre los electrodos fue de 1/16 mm.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MÉTODO DE CORRIENTES INDUCIDAS

La conductividad eléctrica es una medida de la resistencia presentada por la red metálica al flujo de electrones que es producido por un campo eléctrico⁽³²⁾. En consecuencia los materiales metálicos tienden a aumentar su conductividad al ser sometidos a tratamientos térmicos, esto debido a que hay crecimiento de la estructura de grano, eliminación de esfuerzos residuales, eliminación de defectos puntuales (vacancias y átomos intersticiales), entre otras. En las tablas 7, 8 y 9 se muestran los valores obtenidos por el método de corrientes inducidas.

Tabla 7. Valores de Corrientes de Eddy correspondientes a las muestras 1.

VALORES DE CORRIENTES DE EDDY - MUESTRAS 1								
IDENTIFICACION	Valores Registrados						PROMEDIO	DESVIACION ESTÁNDAR
ME1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ME1H	8,85	6,68	10,38	7,06	7,84	12,61	8,90	2,25
ME3H	7,81	7,81	7,07	11,43	10,00	11,55	9,28	1,97
ME6H	7,55	9,28	12,61	15,50	9,46	10,58	10,83	2,83
MR1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MR1H	7,45	7,40	13,45	9,50	11,10	8,75	9,61	2,34
MR3H	16,75	17,33	10,25	17,35	17,10	16,55	15,89	2,78
MR6H	22,82	19,32	22,45	14,72	14,64	18,75	18,78	3,57
MN1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MN1H	14,50	13,69	15,63	15,45	9,59	12,75	13,60	2,24
MN3H	13,05	15,10	17,15	13,00	15,55	10,23	14,01	2,44
MN6H	17,82	16,15	18,45	16,23	10,25	17,95	16,14	3,04
MT1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MT1H	22,75	20,55	17,45	19,28	17,45	22,25	19,96	2,30
MT3H	20,25	26,08	28,20	26,10	26,00	26,10	25,46	2,69
MT6H	35,50	28,19	27,05	28,19	28,19	28,19	29,22	3,11

Tabla 8. Valores de Corrientes de Eddy correspondientes a las muestras 2.

VALORES DE CORRIENTES DE EDDY - MUESTRAS 2								
IDENTIFICACION	Valores Registrados						PROMEDIO	DESVIACION ESTÁNDAR
ME2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ME1H	9,05	10,45	7,71	7,89	10,45	7,05	8,77	1,45
ME3H	10,45	13,23	10,45	7,89	10,38	17,35	11,63	3,27
ME6H	14,88	10,45	11,56	10,55	14,88	14,88	12,87	2,24
MR2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MR1H	17,55	13,75	14,55	12,45	10,75	10,48	13,26	2,65
MR3H	14,45	16,63	16,63	16,63	20,82	16,63	16,97	2,08
MR6H	15,12	17,55	20,55	16,80	17,30	23,82	18,52	3,14
MN2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MN1H	9,97	12,70	12,10	9,97	11,48	9,97	11,03	1,23
MN3H	11,93	15,25	18,10	17,35	13,25	16,22	15,35	2,38
MN6H	12,75	20,35	16,55	15,65	16,22	17,35	16,48	2,47
MT2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MT1H	14,75	15,50	13,75	20,35	12,75	15,70	15,47	2,64
MT3H	21,15	16,20	20,05	23,25	21,10	20,10	20,31	2,32
MT6H	22,34	28,19	27,05	28,19	28,19	28,19	27,03	2,34

Tabla 9. Valores de Corrientes de Eddy correspondientes a las muestras 3.

VALORES DE CORRIENTES DE EDDY - MUESTRAS 3								
IDENTIFICACION	Valores Registrados						PROMEDIO	DESVIACION ESTÁNDAR
ME3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ME1H	11,20	9,75	10,55	13,25	9,45	9,45	10,61	1,47
ME3H	17,35	12,16	17,10	13,04	12,16	15,50	14,55	2,41
ME6H	13,20	15,10	12,25	19,12	18,75	12,20	15,10	3,15
MR3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MR1H	19,50	12,50	11,68	16,81	10,55	12,75	13,97	3,44
MR3H	19,04	11,68	12,46	18,92	16,92	18,92	16,32	3,40
MR6H	21,25	18,25	20,75	13,24	24,38	17,90	19,30	3,78
MN3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MN1H	15,75	15,15	12,15	10,24	17,05	16,11	14,41	2,63
MN3H	18,55	14,59	13,27	20,62	14,25	15,50	16,13	2,85
MN6H	16,37	16,37	16,37	16,25	16,24	20,50	17,02	1,71
MT3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MT1H	20,25	20,15	23,15	18,00	20,25	20,30	20,35	1,64
MT3H	27,88	21,07	25,88	21,73	23,73	25,88	24,36	2,65
MT6H	28,25	28,00	22,70	28,00	23,60	28,35	26,48	2,60

El cambio de las corrientes de Eddy en las muestras estudiadas (ME, MR, MN y MT) en función del tiempo de exposición al medio hidrogenado se muestra en las figuras 37, 38, 39. Los resultados obtenidos en todas las condiciones indican claramente que los valores de las corrientes de Eddy dependen del tiempo de carga y del tipo de tratamiento térmico del material.

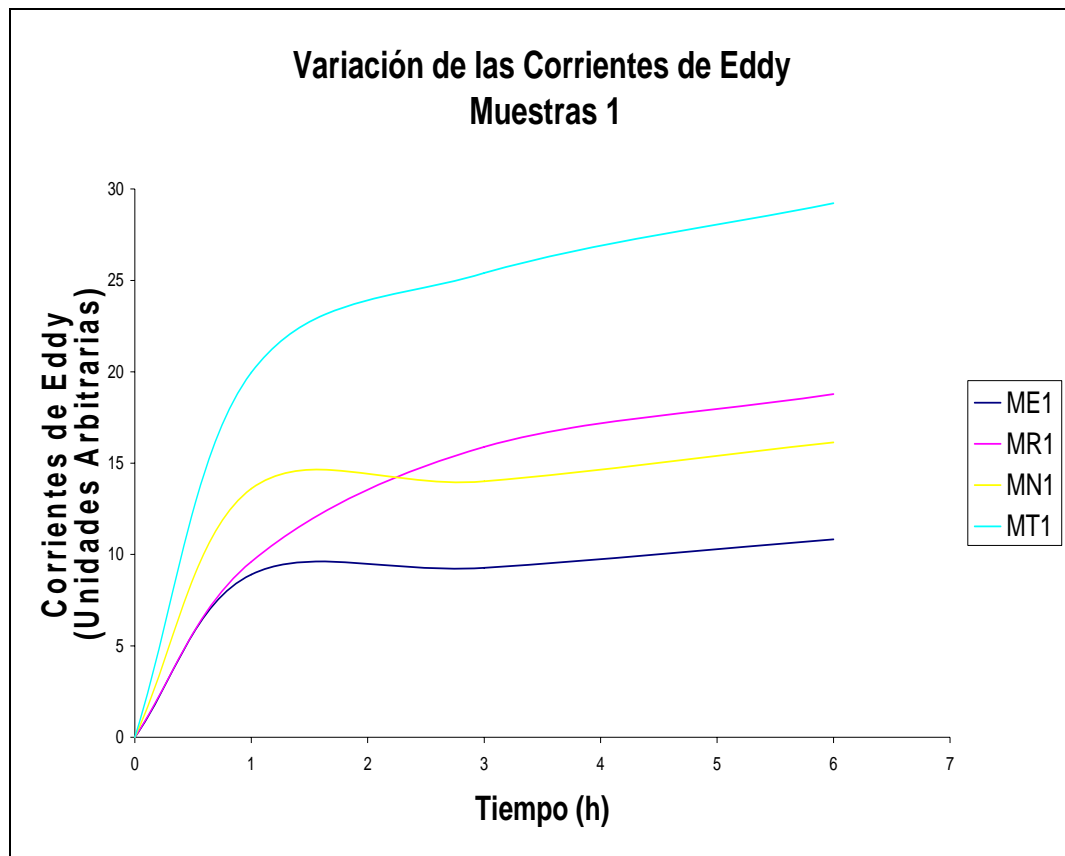


Fig.37. Variación de las Corrientes de Eddy en función del tiempo de exposición al medio hidrogenado por el método de Corrientes Inducidas. Muestras 1.

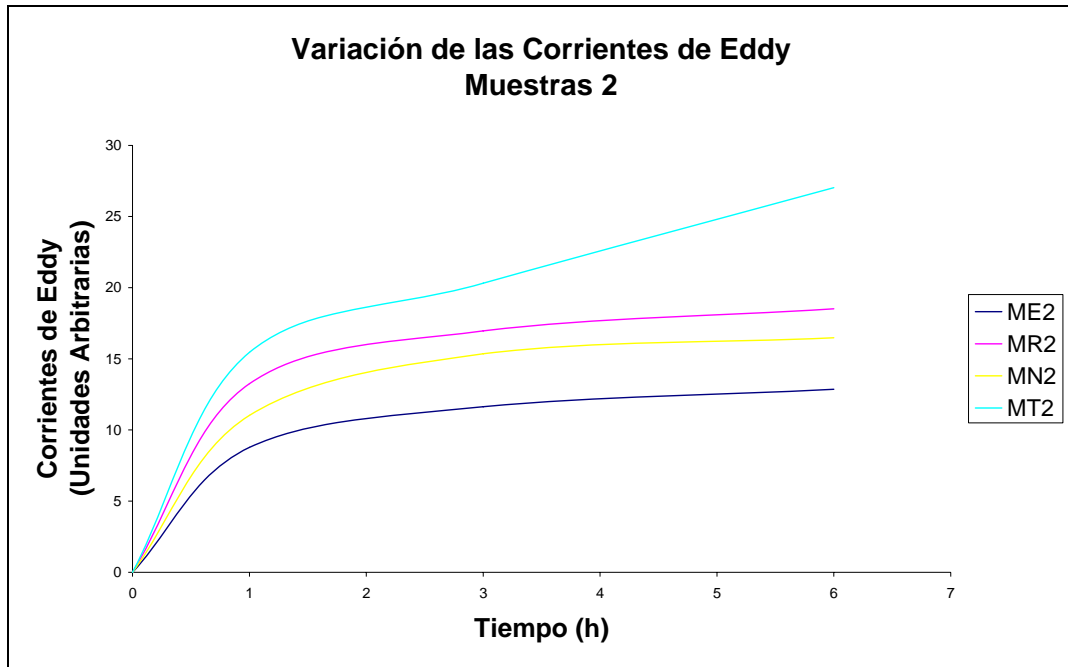


Fig.38. Variación de las Corrientes de Eddy en función del tiempo de exposición al medio hidrogenado por el método de Corrientes Inducidas. Muestras 2.

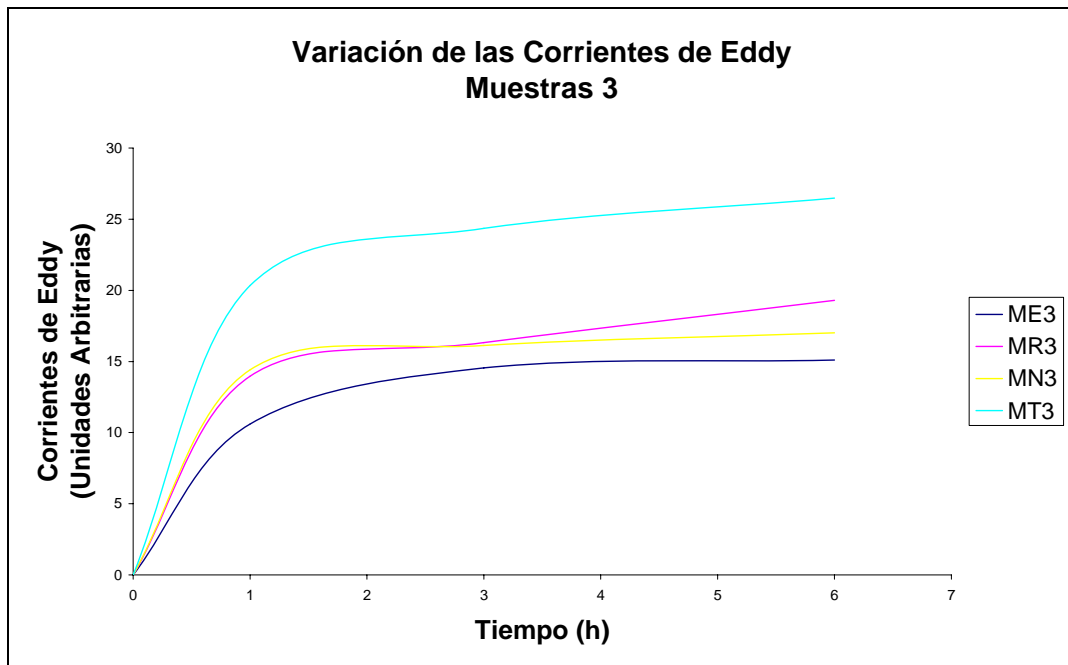


Fig.39. Variación de las Corrientes de Eddy en función del tiempo de exposición al medio hidrogenado por el método de Corrientes Inducidas. Muestras 3.

Las muestras que presentan una mayor variación de las corrientes de Eddy en función del tiempo de carga (1, 3, y 6 h) corresponden a las probetas templadas, seguidas de las recocidas, normalizadas y en condición de entrega. El hecho de que las muestras templadas presenten este comportamiento pudiera estar relacionado con la microestructura martensítica y la alta densidad de dislocaciones características en aceros con este tipo de tratamientos térmicos. Este tipo de microestructura ofrecería una mayor densidad de trampas para el atrapamiento de hidrógeno, cuando se les compara con el resto de las muestras en condición de entrega y tratadas térmicamente, las cuales presentan una microestructura constituida por granos de ferrita y colonias de perlita⁽³⁾.

Las muestras en condición de entrega, normalizadas y recocidas, tienen sitios de atrapamiento de hidrogeno más efectivos, por lo que es necesario un mayor tiempo para saturar las trampas de hidrógeno⁽³⁾. La variación de las corrientes de Eddy aumenta con el tiempo de exposición al medio hidrogenado en cada condición. Los valores de las corrientes de Eddy (**fig. 37, 38 y 39**) en el material en condición de recocido y de normalizado no muestran mucha variación en función del tiempo de carga a pesar de que corresponden a materiales con diferentes tratamientos térmicos, esto puede deberse a que las muestras inspeccionadas con la técnica de corrientes inducidas presentan una densidad de ampollamiento similar. El material en condición de entrega presentó los menores valores de corrientes de Eddy en los tres grupos de muestras estudiados, es decir, que dicho material exhibe los valores de conductividad eléctrica más altos, esto se debe probablemente a la densidad y naturaleza de las trampas de hidrógeno correspondiente a la microestructura del material.

En las figuras 40 a 43 se presentan fotomicrografías obtenidas por microscopia óptica del acero API 5L -X52 en condición de entrega, recocido, normalizado y templado a los diferentes tiempos de carga. Se evidencia a partir del análisis que para 1 hora de carga todas las muestras presentaron daño en la superficie, acentuándose a mayores tiempos de exposición al medio hidrogenado, como era de esperarse. El daño caracterizado consistió de ampollas de diferentes

tamaños incrementando su densidad con el tiempo de carga (**fig. 40 a 43**), siendo más significativo en el acero en condición de entrega y recocido, como se pudo determinar a partir del análisis por microscopia óptica de muestras metalográficas expuestas al medio hidrogenado, a los mismos tiempos que las probetas de tracción. Sin embargo la densidad de ampollas en el acero templado disminuyó a 6 horas de carga, probablemente asociado al agrietamiento predominante en estas muestras, iniciado ya a 3 horas de carga. Se observaron las típicas grietas escalonadas ocasionadas por el daño por hidrógeno y las grietas asociadas a las ampollas (**fig. 43d-43g-43h**). Además, en el acero templado, para 3 y 6 horas de carga, se alcanzó un mayor tamaño de ampollas generado probablemente por coalescencia de las mismas⁽³⁾. Estos resultados coinciden con los obtenidos a través del método de las corrientes inducidas, es decir, en el temple se observa el mayor ampollamiento (resultados de microscopia óptica) y se tiene una menor conductividad si se compara con la condición de entrega y con otros tratamientos térmicos. De igual manera, el recocido y el normalizado presentan daños similares y tienen una conductividad mayor que el temple.

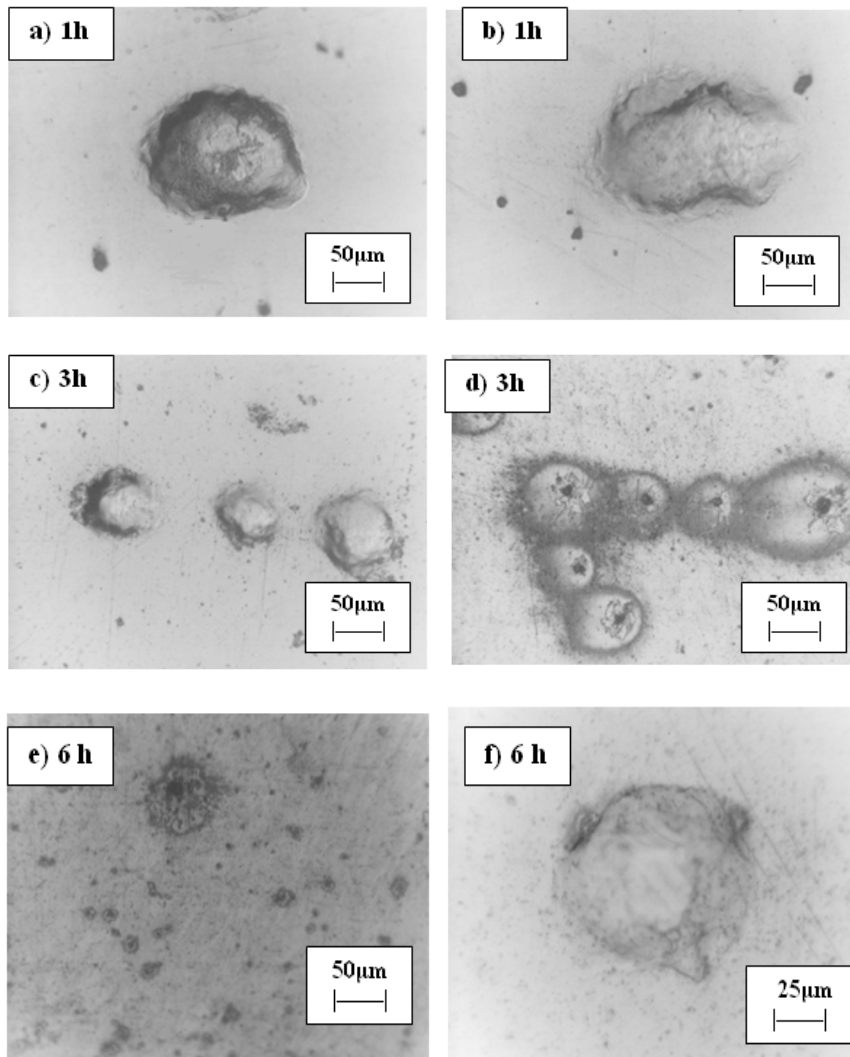


Fig. 40. Fotomicrografías por microscopía óptica del acero API 5L X52 en condición de entrega. Se observan las ampollas a los diferentes tiempos de carga⁽³⁾.

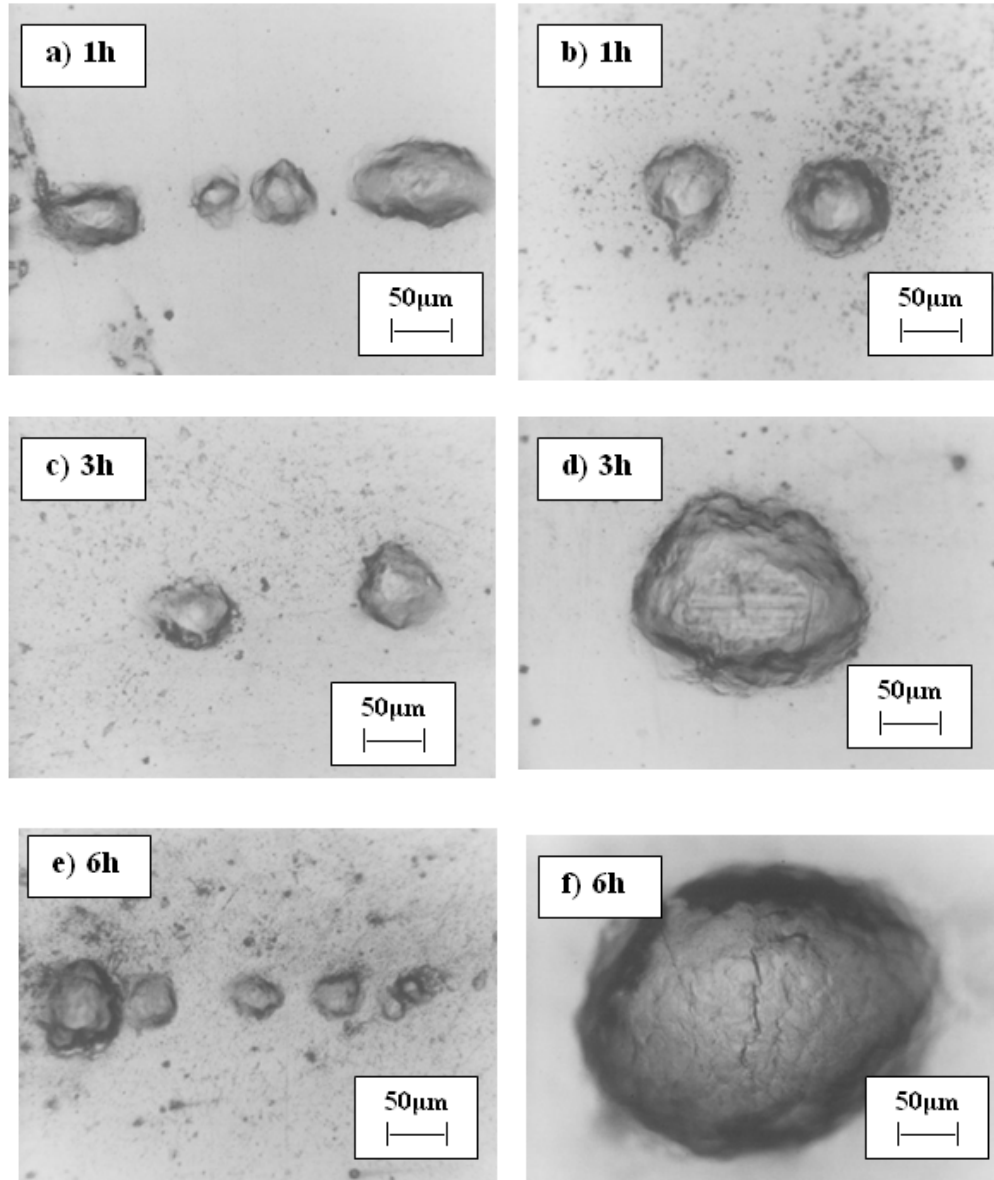


Fig. 41. Fotomicrografías por microscopía óptica del acero API 5L X52 normalizado. Se observan las ampollas a los diferentes tiempos de carga⁽³⁾.

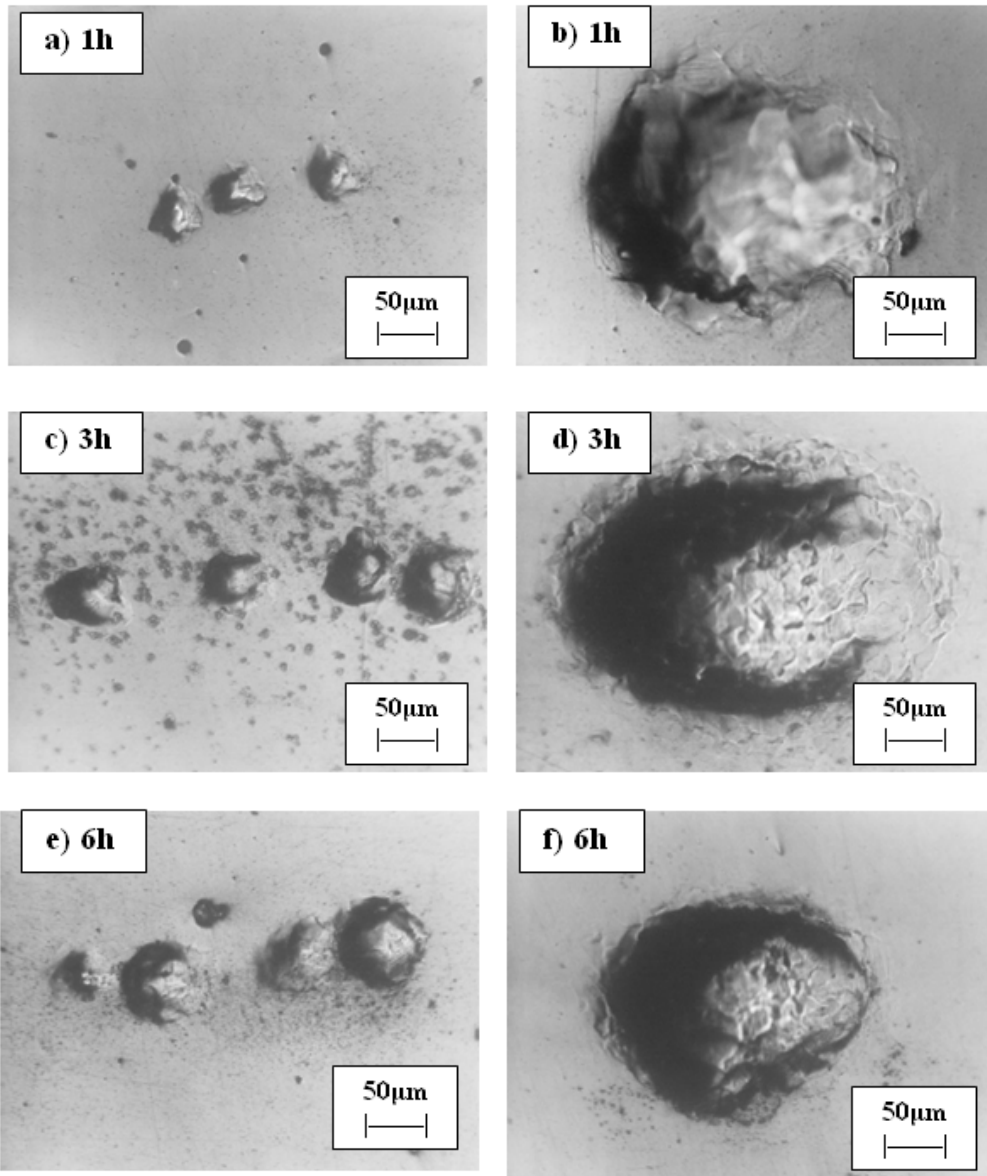


Fig. 42. Fotomicrografías por microscopía óptica del acero API 5L X52 recocido Se observan las ampollas a los diferentes tiempos de carga⁽³⁾

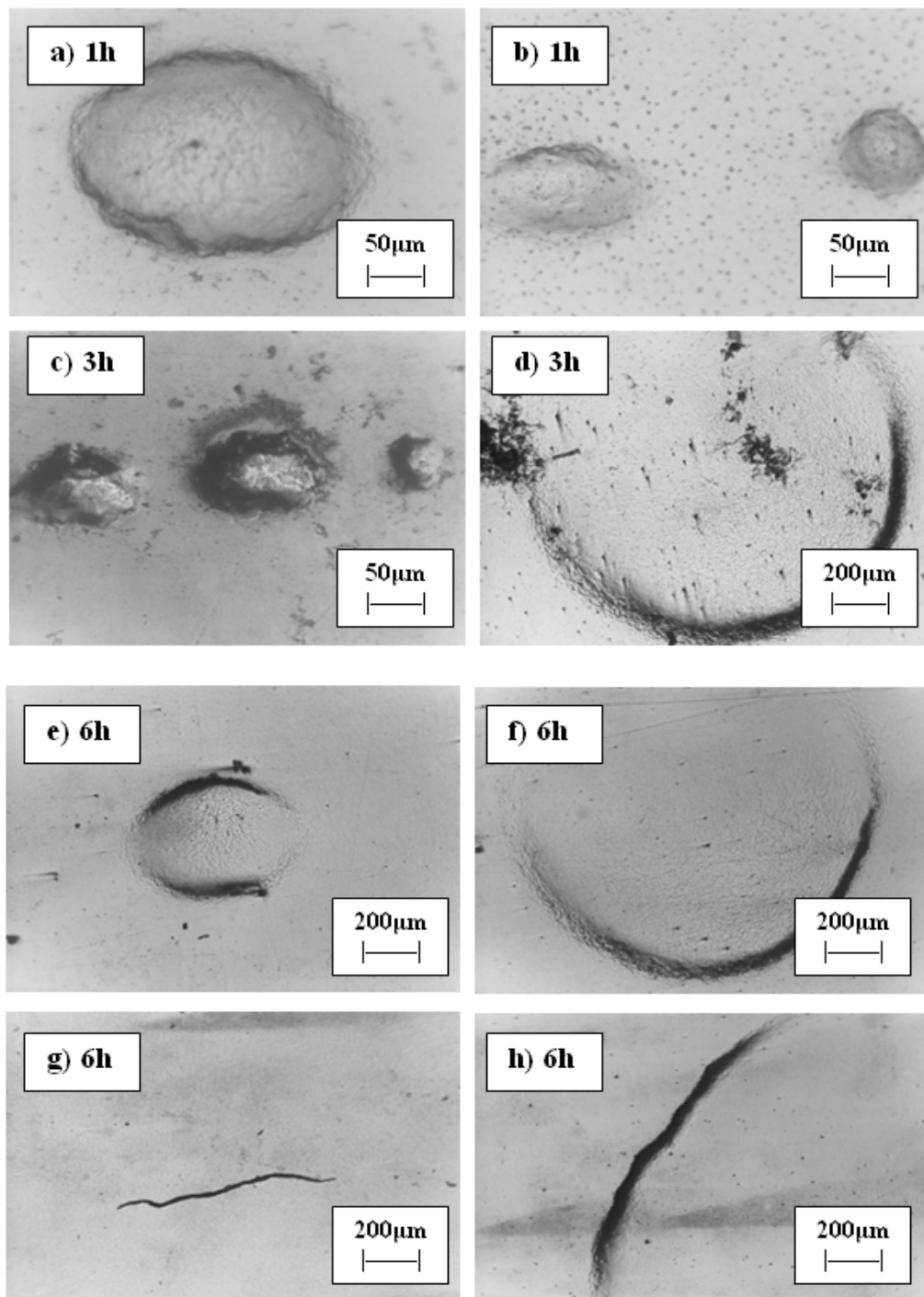


Fig. 43. Fotomicrografía por microscopía óptica del acero API 5L X52 templado. Se observan ampollas y grietas (3 y 6h).

4.2. MÉTODO DE LAS CUATRO PUNTAS

Los valores que aparecen en la tabla 10, nos indican los valores de conductividad eléctrica de las muestras inspeccionadas.

Tabla 10. Valores de conductividad y resistividad eléctrica obtenida por el método de las cuatro puntas. Muestras 1.

MUESTRAS	TIEMPO (h)	VOLTAJE (mv) x 10 ⁻⁵	RESISTIVIDAD (Ω* m) x10 ⁻⁶	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (S/m) x10 ⁶	DESVIACIÓN ESTANDAR x 10 ⁶
		PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
ME1	0	1,19	0,22	4,45	0,22
	1	1,29	0,25	4,04	0,11
	3	1,27	0,26	3,87	0,08
	6	1,30	0,28	3,62	0,05
MR1	0	1,31	0,26	3,87	0,24
	1	1,32	0,26	3,86	0,34
	3	1,40	0,28	3,63	0,22
	6	1,50	0,30	3,37	0,09
MN1	0	1,19	0,23	4,26	0,31
	1	1,39	0,27	3,64	0,24
	3	1,43	0,28	3,55	0,15
	6	1,47	0,29	3,44	0,11
MT1	0	1,45	0,29	3,50	0,21
	1	1,45	0,29	3,50	0,21
	3	1,50	0,29	3,39	0,25
	6	1,61	0,32	3,14	0,16

Tabla 11. Valores de conductividad y resistividad eléctrica obtenida por el método de las cuatro puntas. Muestras 2.

MUESTRAS	TIEMPO (h)	VOLTAJE (mv) x 10 ⁻⁵	RESISTIVIDAD ($\Omega \cdot m$) x 10 ⁻⁶	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (S/m) x 10 ⁶	DESVIACIÓN ESTANDAR x 10 ⁶
		PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
ME2	0	1,18	0,23	4,29	0,28
	1	1,20	0,24	4,24	0,33
	3	1,27	0,25	4,03	0,45
	6	1,39	0,27	3,69	0,46
MR2	0	1,31	0,26	3,88	0,31
	1	1,30	0,25	3,94	0,48
	3	1,34	0,26	3,80	0,28
	6	1,51	0,30	3,36	0,13
MN2	0	1,26	0,25	4,02	0,29
	1	1,33	0,26	3,83	0,31
	3	1,35	0,27	3,76	0,38
	6	1,42	0,28	3,58	0,21
MT2	0	1,40	0,28	3,61	0,21
	1	1,47	0,29	3,45	0,21
	3	1,52	0,30	3,33	0,19
	6	1,62	0,32	3,14	0,22

Tabla 12. Valores de conductividad y resistividad eléctrica obtenida por el método de las cuatro puntas. Muestras 3.

MUESTRAS	TIEMPO (h)	VOLTAJE (mv) x 10 ⁻⁵	RESISTIVIDAD (Ω* m) x10 ⁻⁶	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (S/m) x10 ⁶	DESVIACIÓN ESTANDAR x 10 ⁶
		PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
ME3	0	1,14	0,22	4,47	0,38
	1	1,19	0,23	4,28	0,40
	3	1,21	0,24	4,23	0,48
	6	1,27	0,25	4,05	0,57
MR3	0	1,24	0,24	4,12	0,40
	1	1,23	0,24	4,16	0,40
	3	1,25	0,25	4,07	0,36
	6	1,31	0,26	3,92	0,49
MN3	0	1,22	0,24	4,18	0,50
	1	1,25	0,24	4,09	0,51
	3	1,29	0,25	3,97	0,51
	6	1,30	0,26	3,92	0,31
MT3	0	1,28	0,25	3,99	0,50
	1	1,30	0,25	3,93	0,41
	3	1,32	0,26	3,87	0,44
	6	1,36	0,27	3,73	0,30

En la figura 44, 47 y 50 se puede observar la variación de conductividad en función del tiempo de exposición a un medio hidrogenado por el método de las cuatro puntas. En ellas se muestra claramente que la conductividad eléctrica disminuye a medida que aumenta el tiempo de carga, obteniéndose los valores más bajos de conductividad para el tiempo de 6 horas en todas las muestras analizadas.

Por otro lado, se puede observar también, que la disminución de la conductividad eléctrica es mas severa en el material que ha sido sometido a un tratamiento térmico de temple y que la disminución de la conductividad eléctrica varia de una manera similar para los tratamientos térmicos de recocido y

normalizado. El material de entrega presenta la menor disminución de la conductividad. Este comportamiento observado coincide con lo señalado por otros investigadores⁽³⁾, quienes señalan que el temple es el tratamiento térmico que produce ampollamiento por hidrogeno, debido probablemente a que la estructura que se produce con este tratamiento térmico constituye trampas para el atrapamiento de hidrogeno.

El cálculo de la variación de conductividad eléctrica (**fig. 45, 48 y 51**) y de su variación relativa muestra los resultados que se pueden observar en las figuras 46, 49 y 52. Allí se puede verificar que la variación relativa de la conductividad para cada uno de los tratamientos térmicos presenta un comportamiento con la misma tendencia que se observa en las figuras 44, 47 y 50, lo que demuestra una buena precisión de las mediciones realizadas en los respectivos ensayos.

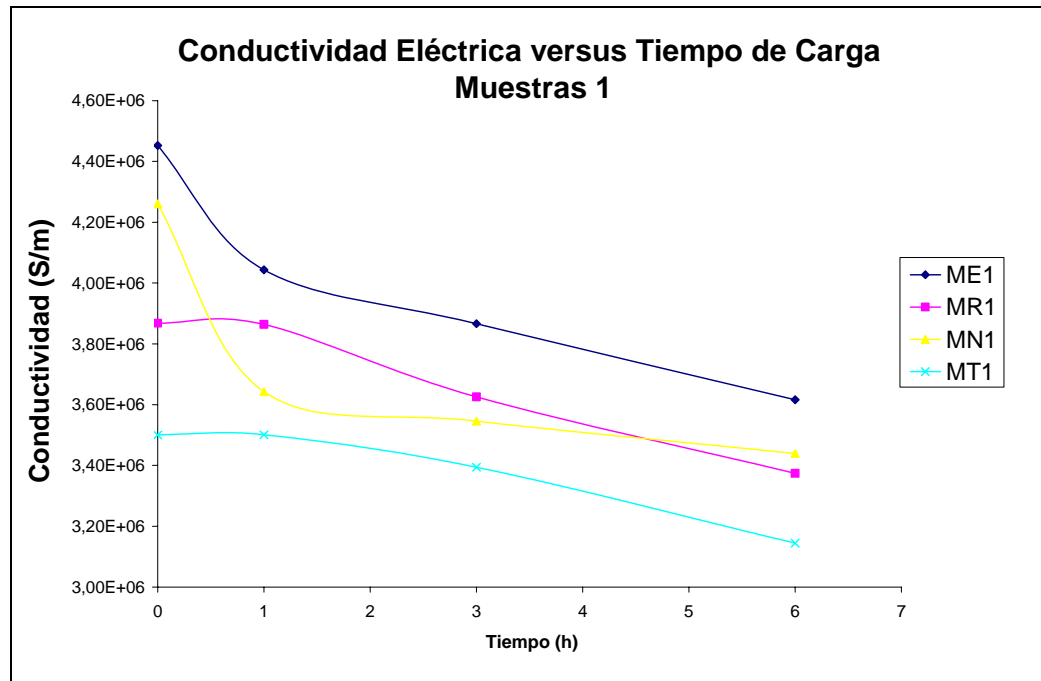


Fig. 44. Conductividad en función del tiempo de exposición al medio hidrogenado por el método de Cuatro Puntas. Muestras 1.

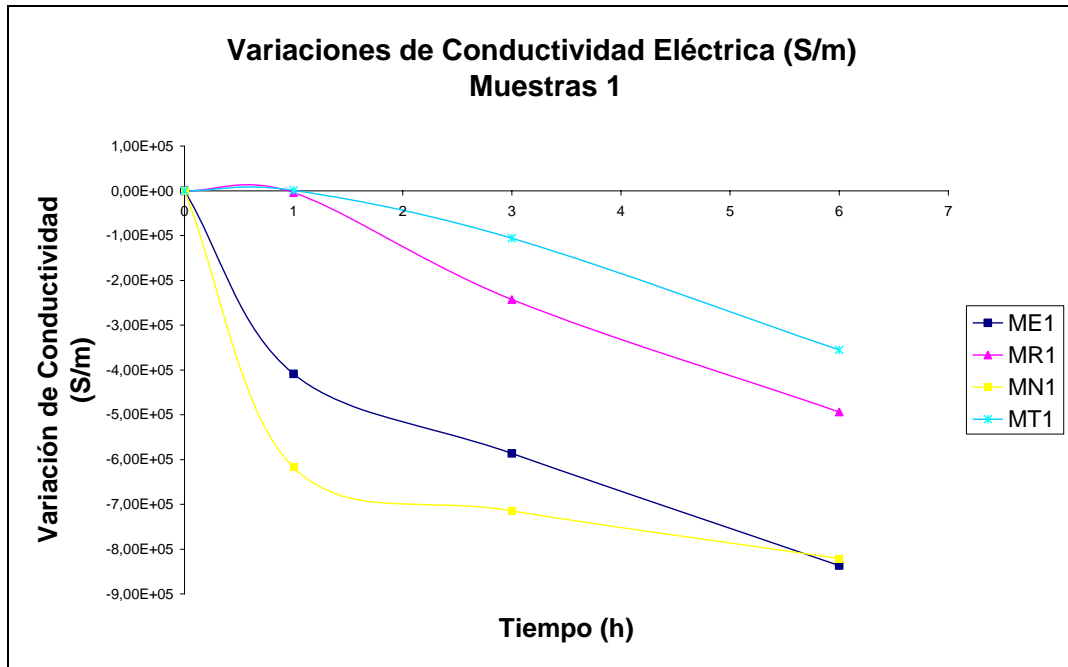


Fig. 45. Variación de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntos. Muestras 1.

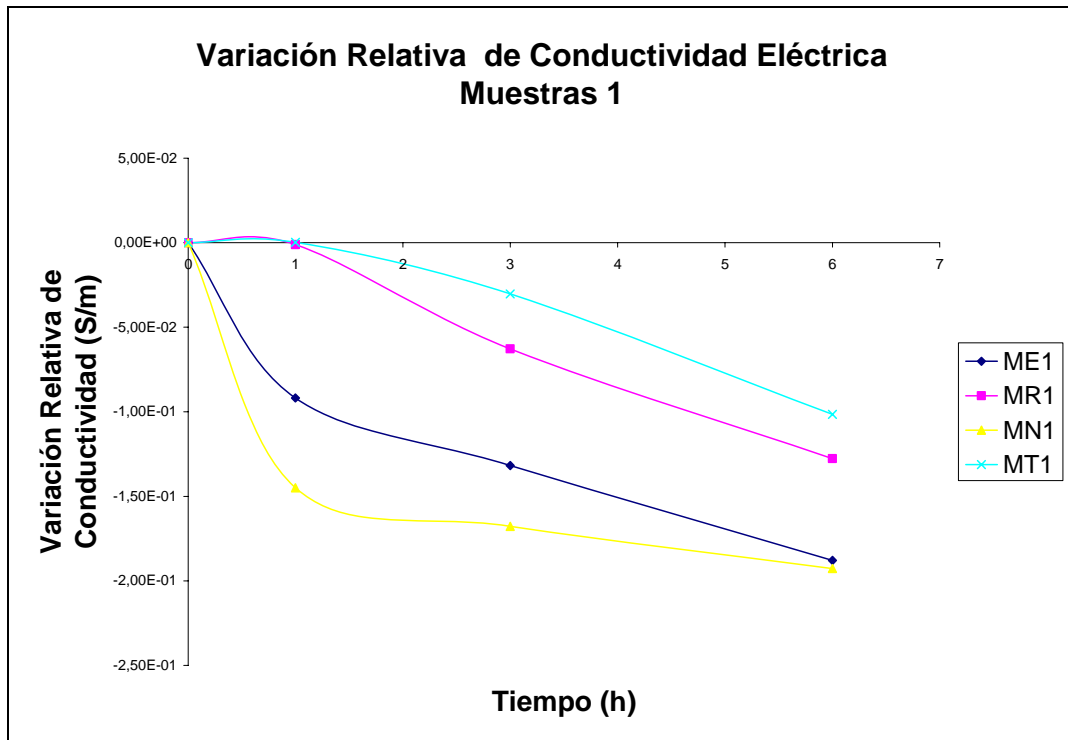


Fig. 46. Variación Relativa de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntos. Muestras 3.

**Conductividad Vs. Tiempo de Carga
Muestras 2**

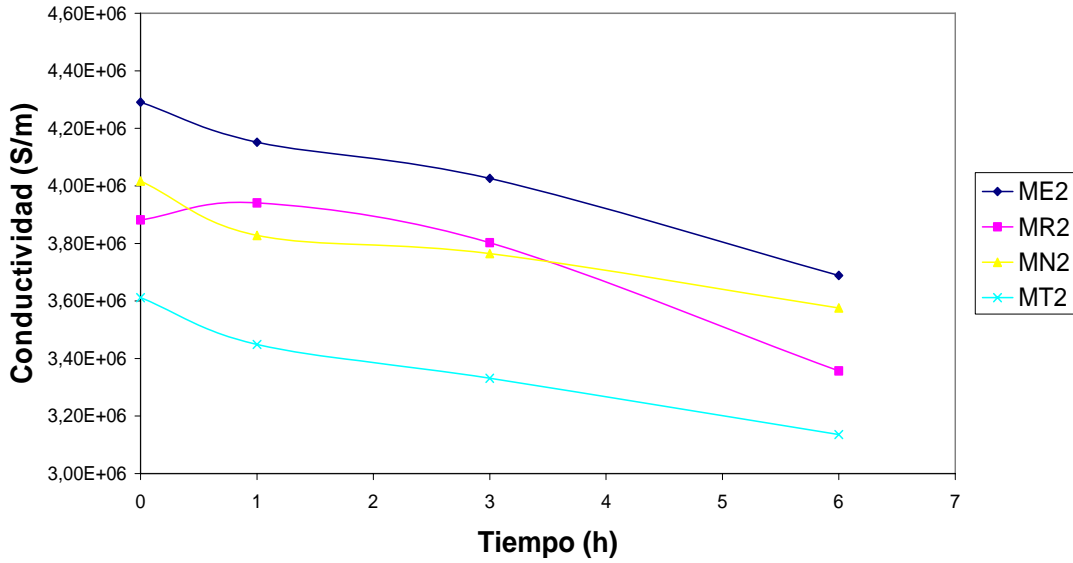


Fig. 47. Conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 2.

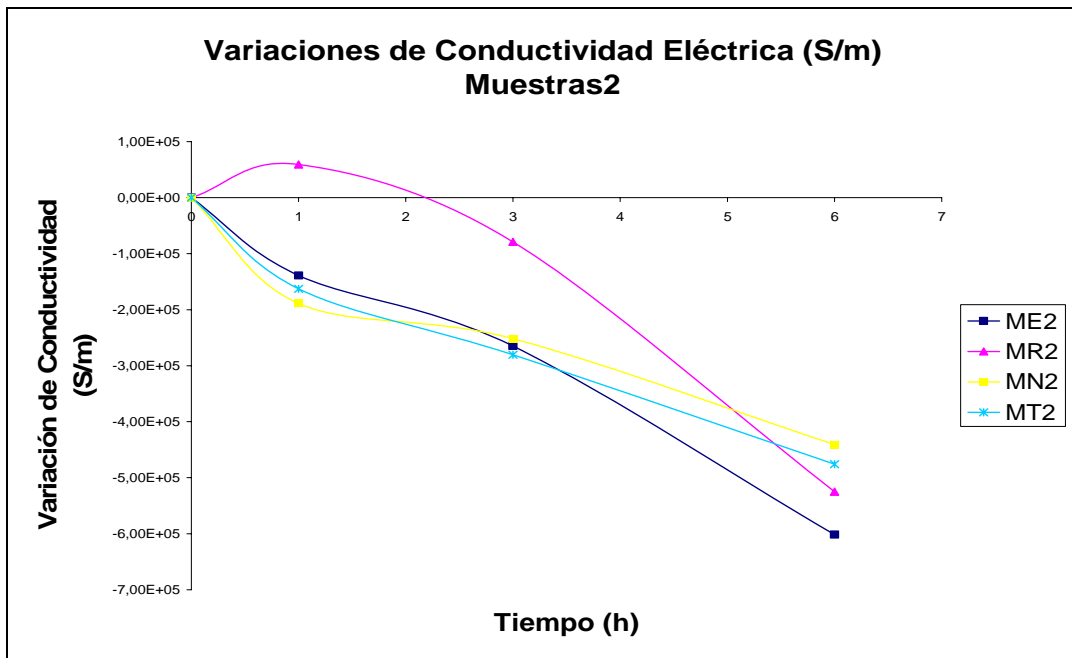


Fig. 48. Variación de conductividad en función del tiempo de carga por el método de las Cuatro Puntas. Muestras 1.

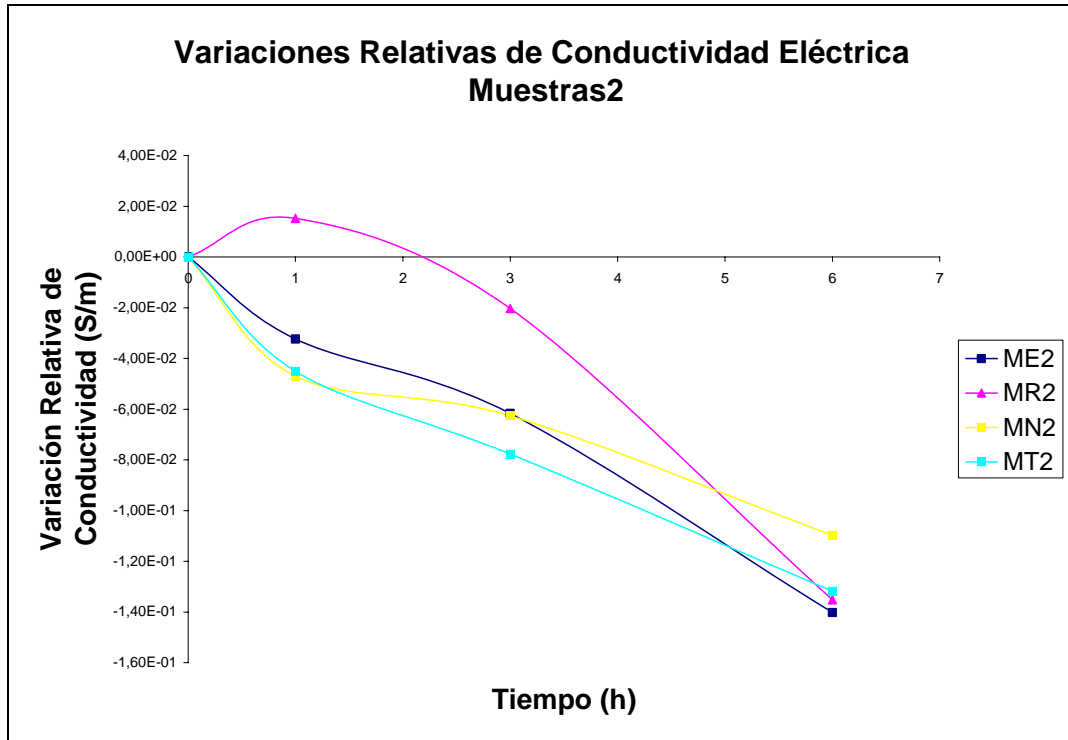


Fig. 49. Variación Relativa de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.

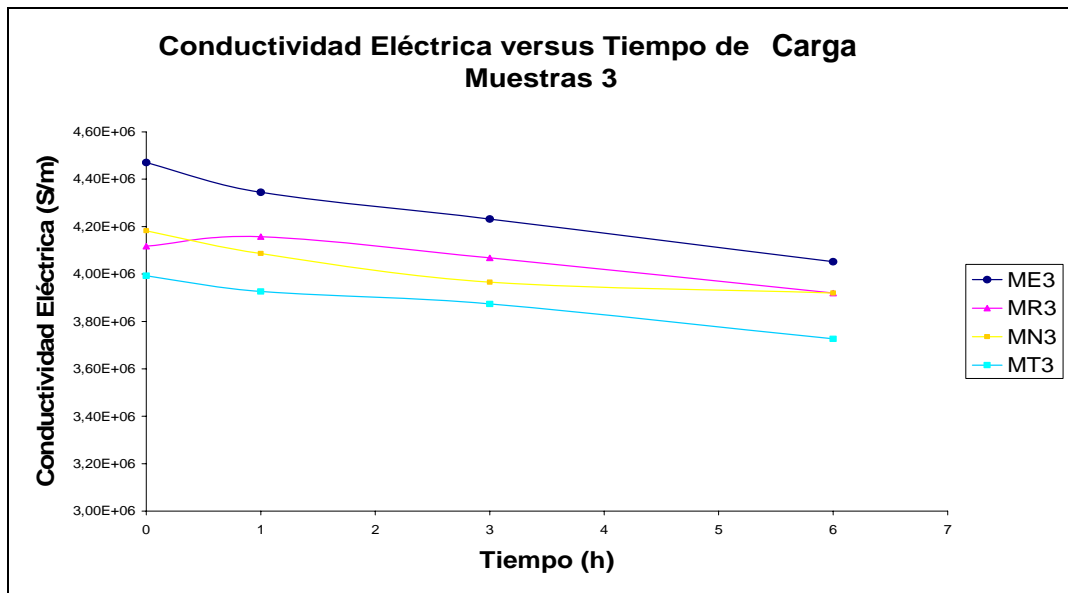


Fig. 50. Conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.

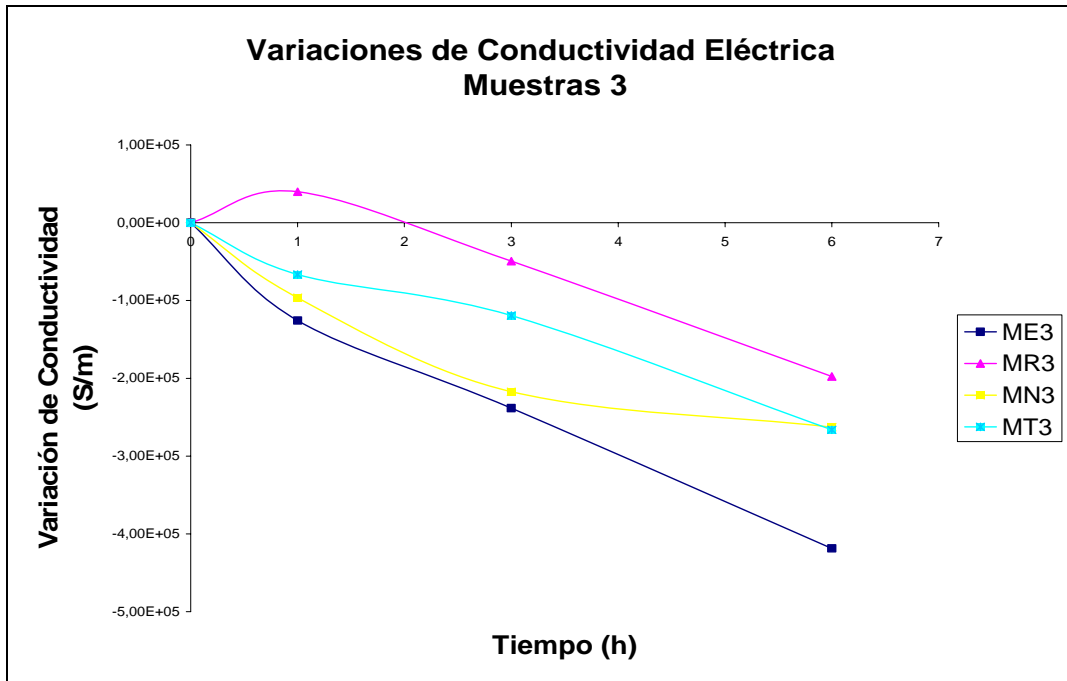


Fig. 51. Variación de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.

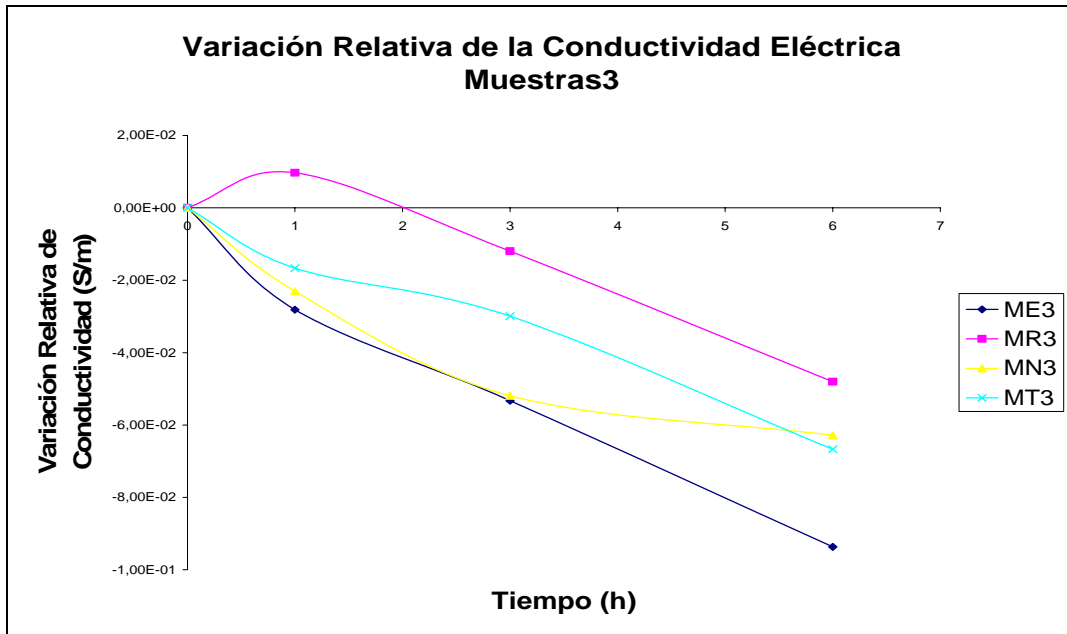


Fig. 52. Variación Relativa de conductividad en función del tiempo de carga por el método de Cuatro Puntas. Muestras 3.

Este análisis demuestra que tanto el método de cuatro puntas como el método de corrientes inducidas son métodos adecuados para determinar que está ocurriendo el fenómeno de ampollamiento en muestras sometidas a diversos tratamientos térmicos y a diferentes tiempos de exposición en un medio hidrogenado. Sin embargo, el método de corrientes inducidas es un método de más fácil aplicación y podría dar una rápida información si está ocurriendo el fenómeno de daño por hidrógeno sin tener que recurrir a técnicas destructivas.

El método de las cuatro puntas es un método que como se pudo observar, de igual manera da información de que está ocurriendo el fenómeno de ampollamiento, sin embargo, este método es menos versátil y produce una mayor dispersión en los resultados de los ensayos. Por otro lado, este método está normalizado y su aplicación a tamaños diferentes a los estipulados en la norma requieren la aprobación de las partes que exigen los ensayos. Además, se necesita la preparación de un sistema adecuado para realizar la medición según la pieza a ensayar, tal como en el caso del presente trabajo, donde se requirió la preparación de un sistema que se adecuara al tamaño de las muestras que se querían inspeccionar (microsondas).

Los resultados demuestran que la conductividad eléctrica es susceptible a la formación de ampollas, generadas por la exposición de las muestras a un medio hidrogenado, y que mediante estos métodos no destructivos de medición de conductividad se podría verificar que está ocurriendo el fenómeno de daño por hidrógeno en el material.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- La conductividad eléctrica es un indicador a microescala de los cambios que ocurren en las características de las aleaciones debido a los tratamientos o fenómenos a los que son sometidos, en consecuencia, es una propiedad esencial del material.
- Por medio del presente estudio se comprobó que se pueden medir los cambios de conductividad eléctrica asociado a los diferentes grados de presencia de ampollas en la aleación de acero API 5L X52 expuesta a diferentes tiempos de carga, por medio de la aplicación de ensayos no destructivos, tales como el método de las corrientes inducidas y el método de las cuatro puntas (microsondas) específicamente.
- Los métodos de corrientes inducidas y de cuatro puntas son adecuados para determinar los cambios de conductividad eléctrica que evidencian que esta ocurriendo el fenómeno de daño por hidrógeno, manifestado por la presencia de ampollas y grietas, en muestras sometidas a diversos tratamientos térmicos y a diferentes tiempos de carga.
- Se demostró que las técnicas empleadas en el trabajo presentan una buena sensibilidad a la presencia de ampollamiento por hidrogeno.
- La disminución de la conductividad eléctrica es más severa en el material que ha sido sometido a un tratamiento térmico de temple y varia de manera similar para los tratamientos térmicos de recocido y normalizado.
- El método de corrientes inducidas es un método de fácil aplicación y podría dar una información rápida de que esta ocurriendo el fenómeno de daño por hidrógeno sin tener que recurrir a técnicas destructivas.

- El método de cuatro puntas a pesar de que es sensible a las variaciones de conductividad eléctrica que se producen debido a que está ocurriendo el fenómeno de daño por hidrógeno, es menos versátil y produce una mayor dispersión en los resultados de los ensayos.

- Los resultados obtenidos mediante los ensayos no destructivos coinciden con los provenientes de la caracterización microestructural mediante microscopía óptica, en muestras metalográficas expuestas a diferentes tiempos, a un medio hidrogenado.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios de conductividad eléctrica en muestras de acero API 5L - X52 sometidas a daño por hidrógeno y diferentes tratamientos térmicos, antes de someterse a ensayos de tracción de manera que se disponga de mayor área para realizar la evaluación.
2. Realizar estudios de conductividad eléctrica en otros aceros susceptibles a daño por hidrógeno, con la finalidad de validar la técnica para evaluar este fenómeno.
3. Evaluar muestras tratadas térmicamente y con más tiempo de exposición a un medio hidrogenado, con el objeto de verificar el comportamiento mediante mediciones de conductividad eléctrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) N. Eliaz, D. Eliezer, D. L. Olson. "Hydrogen-assisted processing of materials". *Materials Science and Engineering A289* (2000) 41-53. Referida por 3.
- (2) B. Craig, Metallurgical Consultants, Inc.. Environmentally induced cracking. *ASM Handbook, Formerly ninth edition, Metals Handbook. Volumen 13, Corrosión* (1997)146-189. Referida por 3.
- (3) S. Camero. "Estudio de la relación entre la microestructura y daños por hidrógeno en un acero API 5L X52 utilizado en la Industria Petrolera". Tesis de Doctorado en Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. 2005.
- (4) J. P. Hirth, H. H. Johnson. Hydrogen problems in energy related Gtechnology. *Corrosion, Vol 32, (1976), 3-26*. Referida por 3.
- (5) S. X. Xie, J. P. Hirth. Permeation of hydrogen, trapping, and damage in spheroidized AISI 1090 steel. *Corrosion –NACE, Vol. 38, No. 9, September* (1982)486-493. Referida por 3.
- (6) L. Coudreuse, J. Charles. The used of permeation technique to predict critical concentration of H₂ for cracking. *Corrosion Science, Vol. 27, No. 10/11, (1987) 1169-1181*.
- (7) J. Charles, L. Coudreuse, R. B. Blondeau, L. Cadiou. Clean steel to resist hydrogen embrittlement. *Corrosion, paper No. 202(1990)1-19*.
- (8) Y. Yoshino. Metallurgical influences on the hydrogen uptake by steel in H₂S environment. *Corrosion –NACE, Vol. 39, No. 11, November* (1983)435-443. Referida por 3.

- (9) W. C. Luu, J. K. Wu. The influence of microstructure on hydrogen transport in carbon steels. *Corrosion Science*, Vol. 38, No. 2, (1996) 239-245. Referida por 3.
- (10) M. Watkins, R. Ayer. Microstructure – the critical variable controlling the SSC resistance of low – alloy steels. *Corrosion*, paper No. 50. Referida por 3.
- (11) C. Turn, JR., B. E. Wilde, C. A. Troianos. On the sulfide stress cracking of line pipe steels. *Corrosion* Vol. 30, No.9, September (1983)384-370.
- (12) National Association of Corrosion Engineers Standard MR-01-75. 1978 Revision. Referida por 11.
- (13) G. A. N. Amarnath, T. K. G. Namboodhiri. Effect of heat treatments on the hydrogen embrittlement susceptibility of API X-65 grade line – pipe steel. *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 26, No. 4, June (2003)435-439. Indian Academy of Science.
- (14) Z. Szllarska-Smialowska, Z. Xia. Hydrogen trapping by cold-worked X-52 steel. *Corrosion Science*, Vol. 39, No. 12, (1997)2171-2180.
- (15) Amarnath, T. K. G. Namboodhiri. Effect of cold rolling on the hydrogen induced delayed failure of API X-52 line-pipe steel. *Transactions Indian Institute Metallurgical*. Vol. 55, No. 1-2, February-April (2002)25-30.
- (16) G. P. Echaniz, T. E. Pérez, C. Pampillo, R. C. Newman, R. P. M. Procter, G. W. Lorimer. The effect of microstructure on SSC resistance of low alloy carbon steels. *Corrosion*, No. 50, (1997),1-19. Referida por 3.
- (17) V. Schwinn, A. Streisselberg, J. Bauer. Variuos approaches to different demands of low alloy steels with specified HIC resistance. *Corrosion*, paper No. 66(1995)1-16. Referida por 3.

- (18) M. Kowaka. Metal corrosion damage and protection technology, Allertob press, Inc., USA(1990)230-235. Referida por 3.
- (19) Ikeda, Y. Morita, F. Terasaki, M. Takeyama. On the hydrogen induced cracking of line pipe steel Ander wet hydrogen sílfide environment. Second. Intern. Congr. Hydrogen in Metals, Paris, June, 6-11(1977), Paper 4A7. Referida por 3.
- (20) M. Iino. The extension of hydrogen blister-crack-array in linepipe steels. Metallurg. Trans. Vol. 9A (1978)1581-90. Referida por 3.
- (21) Herbsleb, R. Pöpperling, W. Schwenk. Occurrence and prevention of hydrogen-induced stepwise cracking and stress corrosion cracking of low-alloy pipeline steels. Corrosion, No. 9, (1980)1-16. Referida por 3.
- (22) J. O'M Bockris, A. Reddy. Modern Electrochemistry, Plenum Press, New Cork, Vol. 2 (1973)1231. Referida por 3.
- (23) M. Kowaka, F. Terasaki, S. Nagata, A. Ikeda. The test method of hidrogen induced cracking of rolled steels under wet hydrogen sulfide envirenment. The Sumitomo Search, No. 11(1975),36-50. Referida por 3.
- (24) American Petroleum Institute. API Specification for high test line pipe. API Spec. 5LX, 13 th Edition, Dallas, USA, March (2002).
- (25) Tubos de acero para la industria petrolera. Editado por C. A. CONDUVEN. Venezuela (1995)1-22.
- (26) E. W. Lee, T. Oppenheim, K. Robinson. "The Effect of Termal Exposure on the Electrical Conductivity and Static Mechanical Behavior of Several Age Hardnable Aluminum Alloys". Engineering Failure Analisys 14 (2007) 1538-1549.

- (27) A. Gallipoli. "Cambios de Resistividad en la Aleación Comercial de Aluminio 3003H14 Durante la Recristalización". Tesis de Maestría en Física de los END. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. 2004.
- (28) ASTM B 193-02. "Standart Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials". Annual Book of ASTM Standard.
- (29) INTA. "Introducción a los métodos de Ensayos no Destructivos de Control de Calidad de los Materiales". Segunda Edición. Madrid. 1979.
- (30) ASTM E 1004-02. "Estándar Practice for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method". Annual Bokk of ASTM Standard.
- (31) A. Gallipoli, F. Fraudita, C. González. "Conductividad AC en Aleaciones Metálicas no Magnéticas". Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. JIFI 2004.
- (32) J. Shakelford. "Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros". Prentice Hall. Cuarta Edición. Inc. 1998.
- (33) M. P. Marder. "Condensed Matter Physics". Jhow Wiley & Sons, Inc. New York. 2000.
- (34) R. M. Gazoni, C. Zotelo. "Determinación de Coeficiente de Resistividad en Diversas Muestras". <<http://fisicarecreativa.com>>. [Septiembre: 2009, Hora: 8:00 am].
- (35) F. Carrión, M. Lomeli, J. Quintana, M. Martínez. "La Evaluación no Destructiva de Materiales Estructurales y Puentes". Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica N° 231. 2003.

- (36) X. Ma, A. J. Peyton, Y. Y. Zhao. "Measurement of Electrical Conductivity of Open-Celled Aluminium Foam Using Non-Contact Eddy Current Techniques". NDT & E Internacional 38 (2005) 359-367.
- (37) Alba Obrutsky, César Acosta, José Scopelliti, Jorge Méndez, Pablo Penas Asistencia Tecnológica en Ensayos No Destructivos (INEND) Unidad de Actividad Ensayos No Destructivos y Estructurales (ENDE) - Centro Atómico Constituyentes - Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) Av. Gral. Paz y Av. de los Constituyentes - (1650) Pcia. de Buenos Aires - Argentina
- (38) C. González. Curso de Corrientes Inducidas. Universidad Central de Venezuela. (2005)
- (39) S. H. Khan, Farhad Alí, M. A. Iqbal, A. Nusair Khan " Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reductions.
- (40) Zhou Deqiang, Zhang Binqiang, Tian Guiyun, Wang Haitao, Wang Ping, Liang Hua. "Research on Surface Defect Detection Using Pulsed Eddy Current Testing". 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai China(2008).
- (41) International Atomic Energy Agency. "Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures". Training Course Series 17. Vienna, 2002.