

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

Instituto de la Calidad Industrial

“INCALIN”

Control de calidad en chapas soldadas mediante el Ruido Magnético Barkhausen

Por Dra. Miriam Rocío Neyra Astudillo

Trabajo Final Integrador

Republica Argentina

2020

RESUMEN

El Ruido Magnético Barkhausen (RMB), es un método de ensayo no destructivo. El RMB, es muy sensible al cambio o la modificación de los materiales ferromagnéticos, su microestructura, impurezas y otros defectos. Si el material está magnetizado, estos defectos influirán en el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, también en la amplitud de las señales y en su distribución espacial y temporal. La tecnología de detección del RMB tiene una gran perspectiva de aplicación en la detección de las tensiones, corrosión, daños por fatiga, dureza y fragilización por irradiación, en los materiales ferromagnéticos. Sin embargo, debido a que el RMB es una técnica basada en un fenómeno magnetoeléctrico complejo, aún no está estandarizado a nivel nacional como internacional. No existen normas nacionales en nuestro país, ni en otros países (ASTM, DIN, etc.), ni normas internacionales (ISO, IEC). Existen diferentes procedimientos del RMB que han sido publicados en diversos artículos científicos. Para su validación estos artículos científicos han debido ser evaluados por pares. Es una técnica reconocida para la caracterización de materiales que se aplica industrialmente desde 1970.

Este trabajo tiene como objetivo: controlar la calidad del cordón de soldadura, detectando las distintas zonas del cordón de soldadura: “bien” y “mal” soldadas que pueden producirse durante el proceso de fabricación, evaluándolas con la técnica de RMB. Para la realización de los ensayos se tomarán en cuenta los siguientes pasos: se calibra el sistema de medición y luego se realiza un estudio de repetitividad y reproducibilidad en las mediciones, para comprobar la validez del sistema. De esta manera se corrobora que los datos recogidos dependen únicamente de la muestra estudiada, sin influencias de ruidos o condiciones externas. Posteriormente se realizará un análisis estadístico de las señales de RMB para poder distinguir cada una de las zonas de la soldadura.

En este trabajo se utiliza el RMB para monitorear uniones soldadas a tope por chisporroteo eléctrico en dos chapas de aceros al C, provistas por el Instituto Argentino de Siderurgia (IAS). Las mediciones se realizarán en dos probetas, identificadas como Chapa 1 y Chapa 2. Se medirá el RMB sobre la superficie del cordón de soldadura, en dos Laboratorios diferentes y con equipos diferentes: en el Grupo Ondas elásticas de la CNEA y en el Laboratorio del departamento de eléctrica de la UTN Regional Delta. Se pretende estudiar la viabilidad de la técnica de RMB para poder distinguir las distintas zonas del cordón de soldadura.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 SOLDADURA	4
1.3 CONTROL DE CALIDAD EN LA SOLDADURA.....	10
1.4 ENSAYO NO DESTRUCTIVO (END)	13
1.4.1 CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE END	14
1.5 EMISIÓN ACÚSTICA.....	19
1.5.1 LA NORMALIZACIÓN DE LA EMISIÓN ACÚSTICA.....	23
1.6 RUIDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN	25
1.6.1 LA NORMALIZACIÓN DEL RUIDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN	29
1.7 OBJETIVO.....	31
2. DESCRIPCION DEL LABORATORIO	32
2.1 ORGANIGRAMA DEL GRUPO DE ONDAS ELÁSTICAS	32
2.2 INSTALACIONES	33
2.3 EQUIPAMIENTO	33
2.4 TRAZABILIDAD METROLOGICA	33
2.5 VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS	33
2.6 MUESTREO.....	34
2.7 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.....	34
2.8 INFORMES TÉCNICOS	34
3. CONTROL DE CALIDAD EN CHAPAS SOLDADAS MEDIANTE EL RUIDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN	35
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL.....	35
3.2 ESTUDIO METALOGRAFICO.....	33
3.3 MEDICIÓN DEL RMB.....	41
3.3.1 Primeros ensayos	42
3.3.2 Segundos ensayos.....	
¡Error! Marcador no definido.	
4. RESULTADO Y DISCUSIÓN.....	44
4.1 PRIMEROS ENSAYOS.....	44
4.2 SEGUNDOS ENSAYOS	46
5. CONCLUSIONES	48
6. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	49
7. TRABAJOS FUTUROS.....	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En toda Industria donde se construyen estructuras metálicas, es de uso frecuente la aplicación de diversas técnicas de soldadura, las que constituyen procesos en los cuales los parámetros que se deben controlar para asegurar la calidad no se pueden inspeccionar fácilmente y como consecuencia de ello, los errores incorporados durante la fabricación, en general, se ponen de manifiesto durante la utilización de dicha estructura.

En el mundo de hoy existe un énfasis creciente focalizado en la necesidad de la calidad, ya que el concepto de calidad desde el punto de vista industrial ha evolucionado a lo largo de la historia hasta alcanzar en la actualidad una notable importancia y grado de desarrollo. En muchas ocasiones se habla de buena o mala calidad de un producto. Si bien existen muchas definiciones, se puede decir que la Calidad *“es la propiedad que poseen los productos, servicios y procesos para satisfacer plenamente a todos aquellos involucrados en su realización y usufructo”*. Para lograr este objetivo en relación a la aplicación de soldadura en trabajos de producción, podemos pensar en sistemas que nos asistan en la gestión, utilizando diferentes conceptos orientados a lograr calidad a través de una planificación de todos los aspectos que involucran el desarrollo de un prefabricado soldado. Los códigos, especificaciones y procedimientos de soldadura son recomendados para su aplicación en la industrias metalmeccánicas afines con la tecnología de soldadura dado que garantizan confiabilidad y aseguramiento en un producto terminado con óptima calidad debido a sus exigencias tecnológicas y son la documentación básica que rige y guía la práctica de soldadura aplicables para: i) fabricar productos soldados que cumplan con la calidad y seguridad del trabajador requerida, ii) suministrar una real y razonable protección a la vida, la propiedad y el medio ambiente.

En el Departamento Proyecto Centro Internacional para el Estudio de la Tierra, ICES, Grupo de Ondas Elásticas de la CAC, se trabaja con las técnicas de Ensayo No Destructivo (END): Emisión Acústica (EA) y Ruido Magnético Barkhausen (RMB). Este Grupo se dedica a la Investigación para caracterización de materiales con las técnicas de END ya mencionadas. En este Grupo para la aplicación de la técnica de EA se trabaja bajo las normas IRAM.

En el año 2000, se inicia la actividad de la Comisión de Emisión Acústica de IRAM, cuyas normas desarrolladas adquirieron un rápido reconocimiento. Desde sus inicios de la Comisión de Emisión Acústica del IRAM, el Grupo de Ondas Elásticas en un miembro activo,

participando en la Comisión de Emisión Acústica. Esta Comisión funciona en forma autónoma y continua, reuniendo en promedio 5 personas en cada convocatoria mensual entre: fabricantes de equipos de EA; empresas petroquímicas que usan la EA; investigadores; autoridades gubernamentales y empresas que realizan servicios de EA.

1.2 Soldadura

La soldadura es un proceso en el cual se genera una unión entre metales a través de la fusión producida por la aplicación de energía térmica (calor). Esta unión puede realizarse con o sin el aporte de un material nuevo (otro metal). Durante el proceso, se suministra calor hasta que el propio metal de las piezas o hasta que el material de aporte se funde y así una las dos superficies a través de la fusión. El metal de aporte “moja” a los metales que va a unir, generando así una óptima adherencia. Este proceso produce efectos en el material que resultan determinantes a la hora de trabajar con él, donde tanto el material de aporte como el método de soldado pueden afectar las propiedades intrínsecas de la pieza. Cabe destacar que este es un proceso que se utiliza casi en el 100% de las veces al trabajar con aceros. A continuación, se detallan distintos tipos de procesos de soldado y también los efectos que pueden generar en la pieza soldada. Los métodos de soldadura se pueden clasificar en dos grandes grupos [Loayza Pérez J.,2006]:

Soldadura heterogénea: Es una soldadura blanda o fuerte, que se efectúa tanto en materiales de distinta naturaleza, con aporte de metal o no, como en metales iguales, pero con un metal de aporte distinto.

Soldadura homogénea: Ocurre cuando los materiales que se unen y el metal de aporte, si es que se utiliza, poseen las mismas características y son de la misma naturaleza. Si no hay metal de aporte, estas soldaduras se suelen denominar autógenas, donde se unen cuerpos de igual naturaleza. Dentro de estos dos métodos de soldadura se enumeran distintas formas de emplearlos:

- a) **Soldadura blanda:** Es una soldadura de tipo heterogénea que se realiza a temperaturas por debajo de los 400 °C. El metal de aporte más utilizado es la aleación de estaño (Sn) y plomo (Pb), que se funden aproximadamente a los 230 °C. Se suele utilizar en la electrónica para soldar componentes en placas de circuitos impresos, en soldaduras de Pb que se utilizan en fontanería para unir tuberías o tapar grietas existentes en ellas, en soldadura de cables eléctricos y en soldaduras de chapas de hojalata, entre otros usos.

- b) **Soldadura fuerte:** Se le llama fuerte, dura o amarilla, es similar a la blanda, con la diferencia de que se alcanzan temperaturas de hasta 800 °C. Se utilizan distintos metales de aporte como aleaciones de plata (Ag), de Sn, de cobre (Cu) y de zinc (Zn). Un soplete de gas aporta el calor necesario para la unión y se suele realizar la soldadura a tope, aunque también se suelda a veces a solape y en ángulo. Se utiliza cuando se requieren uniones con alta resistencia para poder resistir esfuerzos elevados o temperaturas excesivas. Una soldadura fuerte suele ser más resistente que el mismo metal que lo une.
- c) **Soldadura por presión:** Puede realizarse en frío o en caliente y consiste en poner en contacto las superficies a unir y ejercer una determinada presión sobre ella hasta que se produzca la fusión. Se puede soldar también mediante el calor que genera la fricción entre las dos piezas.
- d) **Soldadura Oxiacetilénica o soldadura por gas:** Proceso en el cual se emplea gas para generar la energía necesaria para fundir el material de aporte. Los combustibles que más se utilizan para este método son acetileno y el hidrógeno (H) que, cuando se combinan con el oxígeno (O) como comburente, generan las soldaduras oxiacetilénica y oxhídrica.
- e) **Soldadura por arco eléctrico:** Es una soldadura eléctrica que actualmente se utiliza mucho en numerosas industrias ya que es un proceso de bajo costo, fácil y rápido de utilizar, y aplicable a la mayoría de los metales. En este caso, el procedimiento consiste en generar calor a través de un arco eléctrico y con ello poder provocar la fusión de los bordes de los metales. Por medio del calor se fusionan los metales y el material de aporte, y al enfriarse, se produce como resultado una pieza resistente y homogénea. Existe también soldadura por arco sumergido y también soldadura por arco en atmósfera inerte.
- f) **Soldadura por aluminotérmica o con termita:** Es aquella que utiliza como fuente de calor para fundir los bordes de las piezas a unir y el metal de aporte, al hierro líquido y sobrecalentado que se obtiene de la reacción química que se produce entre el óxido de hierro y el aluminio de la cual se obtiene la alúmina (óxido de aluminio).
- g) **Soldadura por resistencia eléctrica:** Es un método que se basa en el efecto Joule, en donde se calienta el material a fundir por medio de una corriente eléctrica que circula a través de la unión de las piezas. Este método se puede realizar por puntos, por costura o a tope. Como en la unión de los metales la resistencia es mayor que en el resto de los cuerpos, se genera un aumento de temperatura en

la junta, generando una energía que se aprovecha para luego agregar un poco de presión. Cabe destacar que no es posible utilizar este tipo de soldadura en Sn, en Zn ni en Pb.

- h) **Soldadura por energía radiante:** Es un método poco utilizado donde se aporta energía radiante de manera específica y con un enfoque puntual en la zona de junta. Se reduce al mínimo la zona afectada por la unión, sin producir deformaciones apreciables. Es una soldadura producida por un haz de electrones y ha tomado forma de manera industrial utilizándose en proceso de acabado. Se basa en aprovechar la energía cinética de un haz de electrones para bombardear a la pieza en la zona que se desea fundir y se realiza en una cámara de vacío a partir de un cañón de electrones [Mikell P. Groover, 2010].

1.2.1 Defectos típicos en uniones soldadas

Los metales base y las juntas soldadas generalmente presentan imperfecciones que pueden representar un riesgo para la integridad y de la seguridad del equipo o estructura y varían en su naturaleza, tamaño, frecuencia, localización y distribución. Cada norma establece los criterios de aceptación para las diferentes imperfecciones que pueden presentarse en las uniones soldadas, a estas imperfecciones se les llama discontinuidades. Una forma simple de clasificar las discontinuidades y defectos en soldadura es en superficiales e internas.

1.2.1.1 Discontinuidades Superficiales

- a) **Exceso de penetración:** se producen por efecto de un movimiento que causa la penetración del electrodo dentro de los biseles, los cuales son distribuidos en esas áreas. Este exceso de penetración produce una chorreadura interna de material como se muestra en la Figura 1.6, la que puede retener escoria en su interior.



Figura 1.6. Exceso de penetración en la soldadura

- b) **Concavidad externa o falta de relleno:** es una soldadura que tiene una disminución de refuerzo externo, por poco depósito de material de aporte en el cordón, como se muestra en la Figura 1.7.



Figura 1.7. Concavidad externa o falta de relleno en la soldadura

- c) **Concavidad interna:** es el insuficiente refuerzo interno de la soldadura en su cordón de primera pasada, el cual al enfriarse disminuye su espesor pasando a ser menor que el del material base. En la Figura 1.8 se puede observar concavidad interna en la soldadura.



Figura 1.8. Concavidad interna en la soldadura

- d) **Salpicaduras:** son imperfecciones consistentes en esferas de metal fundido depositadas aleatoriamente sobre el cordón y su vecindad. Pueden ser provocadas por humedad en el revestimiento del electrodo. Generalmente no tienen importancia respecto a la calidad de la soldadura. En la Figura 1.9 se observar las salpicaduras en la soldadura.

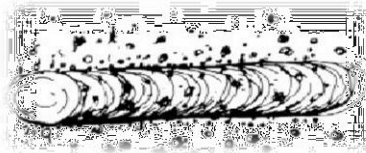


Figura 1.9. Salpicadura en la junta soldada.

- e) **Falta de continuidad del cordón:** Se origina al interrumpir el cordón de soldadura y no empalmar bien la reanudación del trabajo. Su severidad es muy variable ya que, en los casos más severos pueden considerarse auténticas faltas de fusión transversales, en tanto que, en otras ocasiones, son simples surcos normales al eje del cordón. En la Figura 1.10 observar un esquema la falta de continuidad del cordón en la soldadura.



Figura 1.10. Falta de continuidad en el cordón de soldadura.

1.2.1.2 Discontinuidades internas

- a) **Falta de penetración:** En las uniones en U ó en V la raíz se encuentra en la cara posterior. A menudo la raíz de la soldadura no quedará adecuadamente rellena con el metal, dejando un espacio vacío que aparecerá radiográficamente como una línea oscura firmemente marcada, continua o intermitente en el cordón de la primera pasada. Esta penetración incompleta puede ser debida a una separación muy pequeña de la raíz, o un electrodo demasiado grueso, a una corriente insuficiente, a la excesiva velocidad de pasada, fusión incorrecta en la ranura, etc. Este tipo de discontinuidad es rechazada de acuerdo a los criterios de la norma de referencia y requerirá la eliminación del cordón de soldadura anterior y repetición del proceso. En la Figura 1.11 se puede observar la falta de penetraciones más comunes que se presentan en la soldadura.

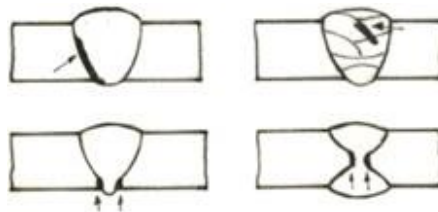


Figura 1.11. Falta de penetración en la soldadura.

- b) **Fisuras longitudinales:** Pueden producirse en el centro del cordón (generalmente por movimientos durante o posteriores a la soldadura) o en la interface del material base con el de aporte (por causa de un enfriamiento brusco o falta de un correcto precalentamiento en grandes espesores), como se muestra en la Figura 1.12.

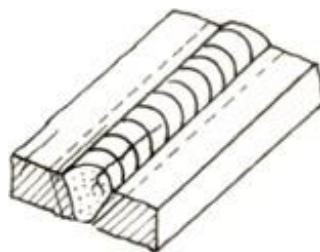


Figura 1.12. Fisura longitudinal en el cordón de soldadura.

- c) **Fisuras transversales:** Producidas generalmente en aceros duros, por combinación de elementos que al enfriarse a la temperatura normal producen

la fisura que puede o no prolongarse al metal base, como se muestra en la Figura 1.13

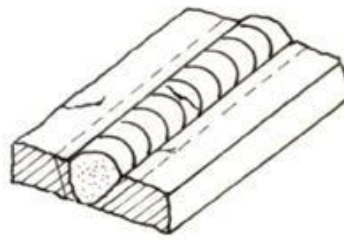


Figura 1.13. Fisuras transversales en el cordón de soldadura.

- d) **Incrustaciones de escoria:** Están conformadas por material producidos por la escoria que se genera de la soldadura por falta de limpieza, el cual se queda atrapado entre el material base y el material de aporte. En la Figura 1.14 se puede observar un esquema de incrustaciones de escoria en la soldadura [Mikell P. Groover, 2010].

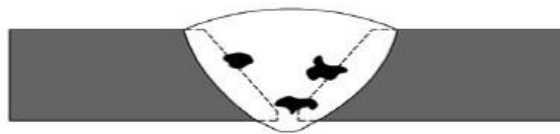


Figura 1.14. Incrustaciones de escoria.

1.3 Control de calidad en la soldadura

Las imperfecciones pueden generarse en las distintas fases de la fabricación soldada, desde el diseño o la elección de los materiales, hasta el momento en que se produce el enfriamiento de la junta, una vez soldada.

En una época se aplicaba sólo el control del resultado final, utilizándose como filtro los productos de salida, el análisis de los motivos de rechazo pone en evidencia que muchos de los defectos se podrían haber evitado con un control de fases intermedias en la fabricación.

La calidad es la consecuencia del proceso aplicado y que las cosas salen bien, si se hace bien, por lo que se amplió el control al proceso, incluyendo en éste el diseño y considerando más importantes las acciones preventivas.

Es importante señalar que la importancia de una imperfección no siempre es proporcional a su tamaño. Así, pequeñas grietas con una orientación peligrosa, pueden ser mucho más graves que otras imperfecciones más espectaculares. Imperfecciones que pueden

ser admisibles en algunas aplicaciones, resultarían totalmente inadmisibles en otras. Por ejemplo, lo que se considera defecto grave en un componente para una central nuclear, puede ser perfectamente tolerable y no considerado como defecto en otras aplicaciones.

El hecho de que la soldadura sea un medio de unión con unas características tecnológicas especiales, generalmente no bien conocidas por el proyectista e incluso el constructor, ha dado lugar a que un porcentaje importante de fallos en servicio y, entre ellos, los más espectaculares y peligrosos se hallan producido en las uniones soldadas.

Por ello vamos a tratar especialmente las medidas de control que existen para garantizar la obtención de una adecuada unión soldada.

Antes de la operación de soldeo:

- Soldabilidad de los materiales de base: la elección de materiales de base sin tener en cuenta su soldabilidad puede ser la causa de muchas dificultades a la hora de soldar.
- Control del diseño de las uniones.
- Estado de suministro de materiales base y de aporte: comprobar que los materiales recibidos cumplen con las exigencias de calidad y que los metales de aporte son los adecuados y están en buenas condiciones.

Procedimiento de soldeo previsto:

- El proceso de soldeo y las condiciones de realización deben definirse previamente de acuerdo con el trabajo a realizar.
- Preparación de bordes: la falta de limpieza y otras deficiencias en la preparación pueden dificultar la unión y ser la causa de muchas imperfecciones. Este es uno de los puntos en los que se puede observar más fácilmente el efecto de la acción preventiva del control de calidad.
- Montaje y punteado: posicionamiento, separaciones, etc.
- Aptitud de los soldadores que van a intervenir.

Durante la propia operación:

- Identificación el soldador: comprobar que los soldadores que intervienen están capacitados para el trabajo a realizar.

- Naturaleza y estado de los metales de aporte: ver si se utilizan los previstos y si están en las condiciones adecuadas. Un electrodo húmedo puede ser la causa de porosidades y grietas.
- Precalentamientos y temperatura entre pasadas.
- Proceso y parámetro que se están aplicando: la modificación de los parámetros previstos o la utilización de una técnica operatoria inadecuada pueden ser la causa de numerosas imperfecciones.
- Cordón e penetración: suele ser el más crítico, tanto por las dificultades de realización como por su tamaño en relación con las piezas. En muchos casos, para facilitar la reparación, se realiza un control del mismo antes de proseguir la soldadura.
- Resultados intermedios y operaciones de saneado y limpieza.

Finalizada la operación de soldeo:

- Vigilar las condiciones de enfriamiento: si procede, algunos tipos de fisuras pueden producirse en los momentos finales del enfriamiento. Cuando se suelden materiales en los que se tema este fenómeno es importante controlar las condiciones de enfriamiento. Normalmente deben evitarse los enfriamientos bruscos.
- Resultados finales: ver si las posibles imperfecciones se ajustan a las exigencias de la obra.
- Tratamiento post soldeo: cuando son aplicables. Aunque no es el caso más frecuente, en algunas fabricaciones soldados es necesario aplicar un tratamiento técnico posterior al soldeo. Es importante controlar que se realiza en las condiciones de calentamiento y enfriamiento previstas.
- Aspecto: además de su importancia desde el punto de vista estético, la limpieza y el acabado de la soldadura puede influir sobre la vida de la estructura soldada. Algunos problemas en la protección y pintura con la consiguiente pérdida de resistencia a corrosión pueden tener su origen en proyecciones no eliminadas.
- Deformaciones: son inevitables en cualquier proceso de soldeo, esto no quiere decir que no puedan controlarse y mantenerse dentro de unos límites razonables. Una deformación excesiva puede constituir un defecto motivo de rechazo.

Después de finalizada la soldadura y en función de la responsabilidad de la unión y de los requisitos, puede ser necesario realizar una o varias inspecciones y ensayos para comprobar si cumple la calidad requerida.

1.4 Ensayo No Destructivo (END)

Los ensayos no Destructivos (END) son métodos de inspección que se utilizan para verificar la sanidad interna y externa de piezas, elementos y materiales, sin deteriorarlos, ni alterar o afectar en forma permanente sus propiedades físicas, químicas y mecánicas se utilizan para encontrar discontinuidades que se formen durante el servicio, lo cual permite reemplazar la parte dañada y prevenir un desastre, los END pueden ser agrupados en función del campo de aplicación o medio de prueba utilizada de la siguiente manera.

a) Técnicas de inspección superficial

Mediante las siguientes técnicas se puede determinar la sanidad superficial de los materiales.

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas
- Electromagnetismo

b) Técnicas de inspección volumétrica

Permiten conocer la integridad de un material en su espesor y detectar discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza.

- Ultrasonido industrial
- Radiografía industrial
- Termografía infra-roja
- Emisión acústica
- Radiografía por neutrones

c) Técnicas de inspección de la integridad ó hermeticidad

Se comprueba la capacidad de un componente o de un recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica,

sin que existan pérdidas apreciables de presión o de volumen en un período previamente establecido.

- Pruebas por cambio de presión
 - Hidrostática
 - Neumática
 - Pruebas por pérdida de fluido
 - Cámara de burbujas
 - Detector de halógenos
 - Espectrómetro de masas
 - Detector de helio

1.4.1 Control de calidad mediante END

Debido a la exigencia de la normativa para el control de calidad en soldadura, se estudiarán solo tres tipos de ensayos no destructivos que puedan evaluar la calidad de la soldadura de elementos estructurales de acero, tales END son Inspección Visual, Ultrasonidos Industrial, Líquidos penetrantes [Stefanita, C. G., 2008, Saa Daniel, 2020].

1.4.1.1 Inspeccion visual

La inspección visual fue el primer método no destructivo empleado por el hombre. Actualmente la inspección visual es el más importante procedimiento de prueba para la detección y evaluación de defectos, que utilizan los sentidos humanos apoyados únicamente con algún dispositivo que magnifique la capacidad sensorial del inspector. El proceso de inspección puede constituirse por acciones, como observar, escuchar, sentir, oler, agitar o revolver. La inspección visual consiste en revisar la calidad de las superficies, durante y después del proceso de fabricación de las piezas, detectando discontinuidades en uniones como soldadura, sellados, etc. Para este ensayo, se utiliza instrumentos sencillos como galgas de medición, iluminación artificial, flexómetro, lentes de aumento, boroscopios industriales como se muestra en la Figura 1.15



Figura 1.15. Inspección visual en la soldadura.

1.4.1.1.1 Ventajas y limitaciones del método de Inspeccion visual

Las ventajas y limitaciones de la inspección visual son expresadas a continuación en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Ventajas y limitaciones del método de VT.

Ventajas	Limitaciones
- Método de bajo costo - Aplicable en todo proceso productivo - Se realiza en forma rápida y sencilla - La geometría de piezas no representa ningún problema	- Solamente se pueden inspeccionar discontinuidades superficiales. Hay que considerar las limitaciones de la visión humana. - Se requiere una fuente efectiva de iluminación. - Es necesario el acceso a la superficie a inspeccionar. - Se requiere de personal capacitado y experimentado para realizar el proceso de inspección.

1.4.1.2 Inspeccion por Tintas Penetrantes

La inspección por Tintas Penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados, el método se basa en los principios básicos de la acción capilar, y la capacidad de humectación de un líquido de baja viscosidad, propiedades que permiten que éste penetre por hendiduras o grietas imperceptibles a la vista para resaltarlas y evidenciarlas.

En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta. En la Tabla 1.2 se clasifican los métodos de inspección por tintas penetrantes según la norma ASTM E- 165, indicando sus características.

Tabla 1.2. Clasificación del método de inspección por Tintas Penetrantes.

Tipo	Técnica	Pigmento	Caracterización
A	1	Fluorescente	Lavables con agua
	2		Post emulsificables
	3		Removibles con solvente
B	1	Coloreado	Lavables con agua
	2		Post emulsificables
	3		Removibles con solvente

1.4.1.2.1 Ventajas y limitaciones del método Inspección por Tintas Penetrantes

Las ventajas y limitaciones del método de inspección por la inspección por PT son presentadas a continuación en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Ventajas y limitaciones del método de inspección por tintas penetrantes

Ventajas	Limitaciones
- Sensibilidad alta a discontinuidades abiertas en la superficie, y materiales metálicos y no metálicos. - Aplicable a cualquier tipo de geometría. - Ensayo de fácil aplicación. - No requiere de equipos complejos para su ejecución.	- Solo son aplicables a discontinuidades superficiales y materiales no porosos. - Es difícil remover de roscas, ranuras y agujeros no visibles. - Se requiere que los inspectores posean una amplia experiencia y habilidad. - Se requiere una correcta combinación del revelador y penetrante, para resultados eficientes.

1.4.1.3 Inspeccion por ultrasonido industrial

El ultrasonido son vibraciones mecánicas que se transmiten en el material por medio de ondas de la misma naturaleza que el sonido, pero con frecuencias mayores a 20,000 ciclos/segundo. (Hertz), es decir fuera del rango audible del oído humano. El principio físico en el que se basa este método de inspección es la transmisión a velocidades constantes de señales de ultrasonido a través del material y la captación del eco producido cuando existe un cambio en el material, es decir un cambio en la impedancia acústica (resistencia que oponen los materiales al paso de una onda acústica). El ensayo consiste en detectar defectos internos basándose en la reflexión de las ondas ultrasónicas al atravesar medios de diferente densidad en la Figura 1.16 se muestra un esquema del ensayo por ultrasonido reflejando una discontinuidad.

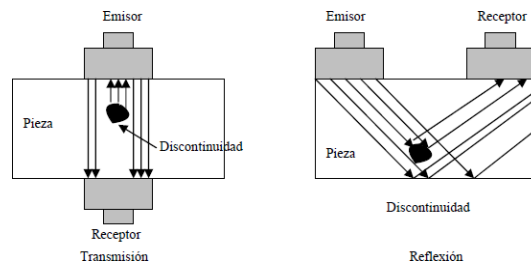


Figura 1.16. Principio de detección de discontinuidades mediante Ultrasonido Industrial.

Las ondas ultrasónicas generadas se propagan a través del material hasta que se encuentran con alguna interface, como una discontinuidad o algún otro material, y es cuando se produce una reflexión de la onda, la cual es amplificada e interpretada en el equipo de medición utilizado. En la Figura 1.17 se muestra un esquema de ondas ultrasónica sin defecto y con defecto.

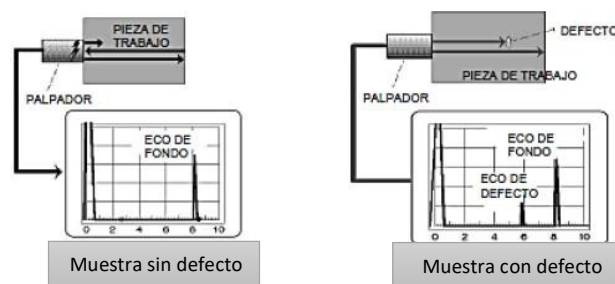


Figura 1.17. Representación de discontinuidades - pulso eco.

Con el método de ultrasonido podemos realizar control de calidad materiales estructurales y este control puede ser de tres tipos:

- Detección de discontinuidades (Defectología)
- Determinación de propiedades (caracterización)
- Medida de espesores (metrología)

Un operador de ultrasonido para ser competente en cuanto a su desempeño, deberá tener; a más de experiencia, conocimiento de las propiedades de los materiales y la incidencia que los defectos tienen sobre estas propiedades como procesos de fabricación, con un historial de la vida de la pieza como por ejemplo a que tipos de esfuerzos ha estado sometida, si ha sufrido algún tratamiento térmico, etc. Éstas determinan la capacidad de un sistema para detectar distintos tipos y tamaños de discontinuidades.

1.4.1.3.1 Ventajas y limitaciones del método de Inspeccion por ultrasonido industrial

Las ventajas y limitaciones del método de inspección por UT son expresadas a continuación en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Ventajas y limitaciones del método de inspección por ultra sonido industrial.

Ventajas	Limitaciones
- Detecta discontinuidades superficiales, sub-superficiales e internas. - Alta sensibilidad, permitiendo la detección de fallas extremadamente pequeñas. - Portabilidad y operación sin riesgos. - La operación es electrónica, lo que proporciona indicación casi instantánea de las fallas.	- La operación manual requiere la atención cuidadosa de técnicos experimentados. - Acopladores se requieren usualmente para proporcionar la transferencia de la energía de onda ultrasónica entre los transductores y las partes que se inspeccionan. - Las partes pequeñas o delgadas son de complicada inspección. - Se necesitan estándares de referencia física, tanto para el equipo para calibrar el equipo como para definir las fallas.

1.5 Emisión Acústica

La Emisión Acústica (EA) es un proceso dinámico de generación y propagación de ondas elásticas en sólidos, dentro del rango de frecuencias ultrasónicas (20 kHz- 1 MHz). Las ondas son originadas por una rápida liberación de energía en zonas localizadas del sólido, involucrando un movimiento colectivo de átomos. Los mecanismos que producen la EA tienden a minimizar la energía del sistema luego de haberse producido algún desbalance. Es necesario que exista alguna perturbación que active las fuentes internas del material, la EA es un fenómeno dinámico. Por este motivo se diferencia a la EA de otras técnicas en donde se introducen externamente las ondas elásticas. Una vez liberada la energía elástica, la onda generada se propaga de acuerdo con la geometría, las condiciones de contorno y las características físicas del material [Saa Daniel, 2020].

La EA puede generarse en principio por cualquier mecanismo que convierte alguna forma de energía en energía elástica que se propagara por un medio. La energía involucrada en las fuentes de las ondas puede ser: mecánica, electromagnética, química, térmica, etc.

En los metales, se pueden citar entre los mecanismos de ondas elásticas a aquellos procesos que involucran a la degradación de los mismos, tales como: la deformación plástica o el movimiento en forma de avalanchas de dislocaciones, el crecimiento de fisuras, deslizamiento de borde de grano, fractura y separación de inclusiones, corrosión bajo tensión, rotura de recubrimientos e inicio y propagación de fisuras. Otros mecanismos posibles, menos estudiados hasta el presente, son las transformaciones de fases sólidas, los procesos de solidificación o licuefacción y el movimiento de los dominios magnéticos.

La técnica de EA se basa en la detección de las ondas elásticas producidas por la aparición o crecimiento de un defecto en un material, y su conversión en señales eléctricas. Esta conversión se produce por medio de un transductor (sensor) que habitualmente está constituido por un cristal piezoeléctrico. Los sensores son colocados sobre la superficie de la estructura, interponiendo un acoplante (grasa, vaselina, etc.), que mejora la impedancia acústica entre ambos. La salida de cada sensor piezoeléctrico es amplificada por un preamplificador de bajo ruido, y luego filtrada para mejorar la relación señal-ruido. En la Figura 1.18 se muestra un esquema general de todo el sistema de EA. La EA presenta frente a otras técnicas, la ventaja que la información sobre la existencia de un posible defecto se recoge en tiempo real.

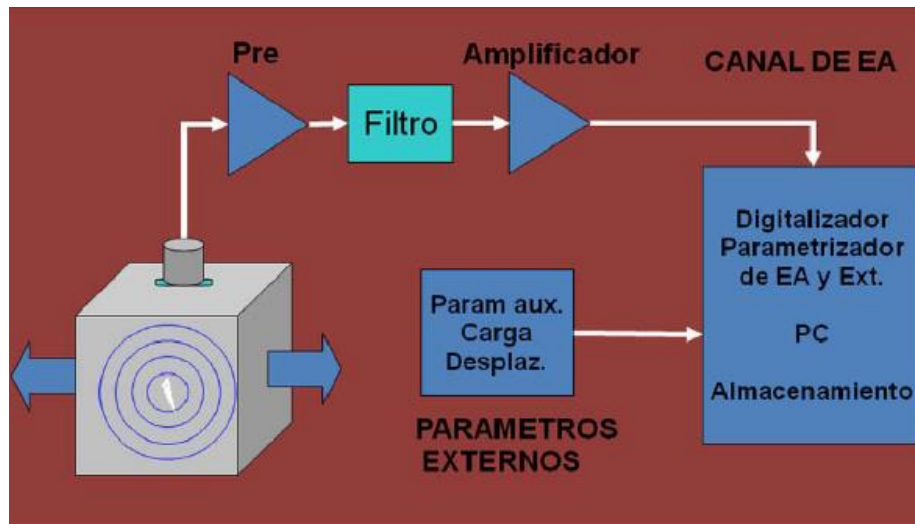


Figura1.18. Sistema de medición de emisión acústica [Gómez M. P., 2011].

Los transductores más usados en la EA, son los piezoeléctricos ya que son los que ofrecen mayor sensibilidad y a su vez mucha robustez que permite su utilización en aplicaciones industriales. Los piezoeléctricos de cerámica más comunes en los sensores de EA están hechos de pequeños cristales de titanatos y zirconatos (Ti y Zr). Estos se pueden dividir en resonantes y sensores de banda ancha.

- Los sensores resonantes presentan una curva de sensibilidad, con una o más frecuencias preferenciales, donde la sensibilidad aumenta, se las denomina frecuencias de resonancia del sensor. Estas frecuencias de oscilación del cristal están marcadas por las propiedades y características del elemento piezoeléctrico principalmente por su forma y tamaño.
- Los sensores de banda ancha tienen una respuesta en frecuencia, suave y plana en un rango determinado. Algunos cubren una banda plana muy ancha y otros una banda más reducida. A diferencia de los sensores resonantes, tienen alta fidelidad, es decir, reproducen muy bien el movimiento de la onda original, aunque a costa de una menor sensibilidad. Son usados sobre todo en investigación, en aplicaciones donde se requiere un adecuado análisis en frecuencia de las señales de EA registradas, proporcionando una mayor información sobre las fuentes de EA, gracias al análisis modal, a la determinación de bandas de emisión predominantes, o a la facilidad para discriminar el ruido.

Durante un ensayo de EA, se pueden general dos tipos de señales: transitorias de tipo “burst” o explosión y de tipo continuo. Las primeras tienen un comienzo y un final, y por lo tanto una duración definida, dependiente de la fuente y del medio. Las otras durarán

mientras el proceso que las genere esté activo, y en general estarán constituidas por un número muy grande de señales transitorias, en las que no se pueden identificar un comienzo y un final. En los procesos que generan la EA pueden superponerse ambos tipos de señales. El tipo de señal dependerá del tipo de fuente emisora. [Gómez M. P. 2011]. En la Figura 1.19, se muestra los tipos de señales a) tipo explosión “burst”, b) tipo continúa.

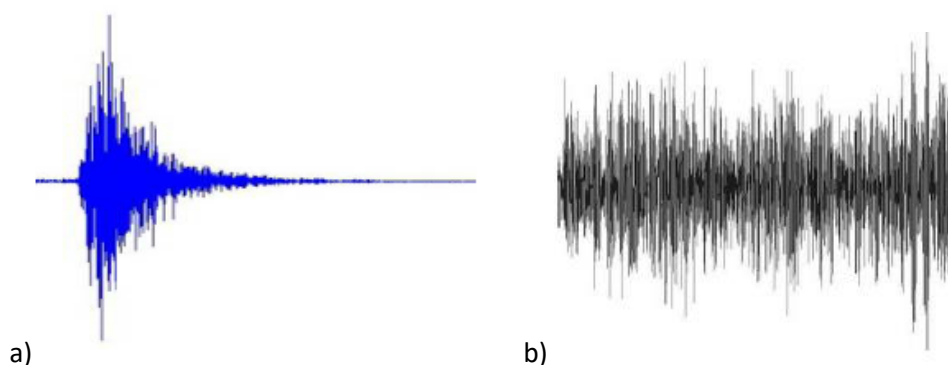


Figura 1.19. Señales de EA. a. Tipo explosión (“burst”). b. Tipo continúa [Gómez M. P., 2015].

En muchos casos no es necesario estudiar las señales de EA en su versión completa, y solo basta con parametrizarlas, perdiendo información, pero ganando tiempo de procesamiento de los datos. Los parámetros característicos de la EA están típicamente definidos para señales tipo explosión y algunos pueden extenderse a las señales continuas, los más comunes de ellos se indican a continuación [Gómez M. P. 2011]:

Umbral de detección: es el nivel de tensión que debe sobrepasarse para que una señal de EA sea detectada y procesada.

Tiempo de ocurrencia (“hit time”): también llamado “tiempo de llegada” o de “ocurrencia” o de “arribo” de la señal, es el tiempo en el cual se considera que comienza el hit. Esto ocurre cuando la señal supera el umbral, por lo cual dependerá de este valor.

Amplitud máxima o “amplitud”: es el valor máximo de la amplitud de la señal de EA. Este valor está relacionado con la magnitud de la fuente y las propiedades del material. Es independiente del umbral.

Duración: es el tiempo transcurrido desde que la señal cruza por primera vez el umbral hasta que lo hace por última vez. Depende de la magnitud de la fuente, del tipo y forma del espécimen, de las características del sensor utilizado y del valor del umbral. También depende de la reverberancia del material.

Tiempo de subida (“rise time”): es el tiempo desde que la señal cruza el umbral hasta que alcanza su amplitud máxima. Está condicionado por la dispersión de la onda en su viaje entre la fuente y el sensor. Depende del umbral. Da una idea del tiempo de actividad de la fuente. Puede ser útil para filtrar el ruido y tiene estrecha relación con el período de actividad de la fuente.

Número de Cuentas (“ring down counting”): es la cantidad de veces que la señal cruza el umbral. Depende del umbral y está relacionado con la amplitud.

Energía MARSE: Es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada (“**M**easured **A**rea under **R**ectified **S**ignal **E**nvelope”). Esta parametrización no depende del umbral pero sí de la amplitud y de la duración de la señal.

En la Figura 1.20 se muestran los parámetros que caracterizan a un evento de EA tipo explosión.

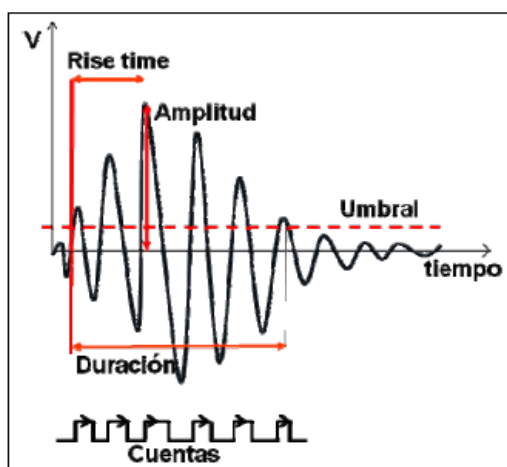


Figura 1.20. Parámetros que caracterizan a un evento de EA tipo explosión [Gómez M. P. 2011].

La EA tiene diversas aplicaciones en una amplia variedad de campos, tanto en investigación como en ámbitos civiles e industriales.

En el campo de la investigación, se ha aplicado para ensayos y caracterización de diversos materiales: metales, compuestos avanzados, plásticos, madera, hormigón, material biológico, etc. En la Argentina inclusive, se han publicado algunas Tesis de Doctorado empleando la EA para el estudio de materiales y/o procesos (López Pumarega, M. I., 1999; Mieza, I. J., 2008; Gómez, M. P. 2011; Filipussi, D. 2012)

A nivel industrial, los principales usos de la EA se centran en el control de equipos a presión, tuberías, válvulas y tanques de almacenamiento, así como estructuras aeronáuticas y civiles (aviones, helicópteros, puentes, etc.). Se aplica principalmente en las industrias químicas, petroquímica, aeronáutica, alimenticia, cerámica y de construcción [Neyra A. Miriam, 2018].

1.5.1 La Normalización de la Emisión Acústica

Desde hace más de 30 años, en la Argentina existen varias empresas, subsidiarias de otras extranjeras y también algunas nacionales, que realizan ensayos de EA en el ámbito industrial e inclusive algunas que diseñan y fabrican equipos especiales.

A medida que avanzaban el uso y las aplicaciones de la EA en Argentina y con el fin de obtener un nivel de ordenamiento tecnológico mínimo, fue necesario poder crear disposiciones, protocolos o documentos específicos. Así surgió la necesidad de comenzar a trabajar en la “Normalización” de las actividades de EA.

La actividad de “Normalización” es llevada a cabo, en cada país, por un Organismo de Normalización: entidad reconocida a escala nacional, regional o internacional. Cada nación del mundo tiene su propio Organismo Nacional de Normalización. En Argentina es el Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM. Este Instituto lleva adelante las actividades de Normalización desde el año 1935, y fue reconocido en 1994 por el Poder Ejecutivo Nacional, como el Organismo de Normalización de la República Argentina. Es un ente privado, no estatal, en el que participan representantes de consumo, producción, usuarios, gobierno, comunidad científico-técnica, fabricantes de productos, etc. Desarrolla, estudia y publica Normas argentinas en todos los campos de actividad. Se debe destacar que el IRAM fue el primer Organismo de Normalización creado en América Latina, llevando elaboradas más de 13000 Normas aplicables en muy diversos ámbitos.

En Argentina, debido a los altos estándares de calidad y seguridad que se deben aplicar en la industria nuclear, a iniciativas de la CNEA, en 1969 se creó en el IRAM el Subcomité de Ensayos No Destructivos, con competencia específica en todas las áreas de este tipo de ensayos. Recién en junio de 2000, también a pedido de la CNEA, se creó en el IRAM la Comisión de EA. Esta Comisión funciona desde entonces en forma autónoma y continua, reuniendo en promedio 5 personas en cada convocatoria mensual.

En la década de los 90, debido a la creciente regionalización latinoamericana, se creó la Asociación MERCOSUR de Normalización (AMN). Es el único organismo responsable por la

gestión de normalización voluntaria en el ámbito del MERCOSUR. En junio de 2004, a propuesta de la Comisión de EA del IRAM, junto con su equivalente de Brasil (Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT), se creó en ese ámbito el Comité Sectorial MERCOSUR 24 (CSM 24) con competencia específica en el tema de los END, estableciéndose también el Subcomité de Emisión Acústica. En la actualidad existen más de 12 Normas de EA publicadas en el IRAM y/o en el MERCOSUR (Catálogo de Normas IRAM y Asociación Mercosur de Normalización).

A nivel internacional también las actividades en la creación y adopción de Normas de EA, ha ido progresando rápidamente. En la “International Organization for Standardization ISO”, existía el “Technical Committee TC135” para todos los END, pero en el año 2007 el CSM 24, propuso la creación de un grupo específico para el estudio de la EA, el “Sub Committee SC9”. Su Secretaría en la actualidad pasó de Brasil a China. En este Subcomité participan activamente 14 países y otros 5 más son “Observadores”. A su vez, cada Subcomité crea Grupos de Trabajo (“Working Groups, WG”) para tratar temas específicos, convocando a reconocidos especialistas internacionales. En esos Grupos de Trabajo, participan por Argentina, varios reconocidos especialistas de CNEA.

Gran parte de la actividad de personas en el área de los END está reglamentada a escala nacional e internacional, a través de las Normas específicas para cada Método de END, y en la Norma de Calificación y Certificación de Personal, que se dedica a la aplicación de los END en la industria. Es ésta la Norma NM-ISO 9712 para la Calificación y Certificación de Personal de END. Allí están comprendidas todas las actividades industriales de EA, con los requisitos, competencias y obligaciones para los Operadores e Inspectores de EA, en sus tres posibilidades: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3.

El IRAM está acreditado por el Organismo Argentino de Acreditación (OAA) para la Certificación de Personas y éste a su vez, delega la facultad de la Calificación de Personas en los Organismos de Calificación Acreditados (OCA), certificando sus acciones. En la Argentina existen pocos OCAs, entre ellos se pueden citar: la CNEA, la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Delta y la UTN Facultad Regional Mendoza. Todos ellos están habilitados para la Calificación de Personas en los métodos de END en los que cada uno es competente, desempeñándose conforme a las indicaciones de la NM-ISO 9712 [Veca et al., 2019].

1.6 Ruido Magnético Barkhausen

El Efecto Barkhausen (EB) fue descubierto por el físico alemán Heinrich Barkhausen en 1919. El descubrimiento se produjo a través de un experimento que medía las variaciones en la magnetización en una bobina, conforme variaba discretamente el campo magnético. El científico finlandés Dr. Seppo Titto comenzó a usar este método en aplicaciones industriales (1970). Hoy en día, es una técnica no destructiva ampliamente reconocida para la caracterización de materiales ferromagnéticos.

El EB es el resultado del movimiento de las PDs magnéticos de un material ferromagnético, como consecuencia de la aplicación de un campo magnético variable. La mecánica de cómo estas paredes se forman y cómo se ajustan, se basa en el hecho de que todas tienden a su estado de mínima energía. Un campo magnético aplicado alterará el equilibrio de mínima energía produciendo el EB durante el proceso de restauración al equilibrio.

Durante el proceso de magnetización, las PDs magnéticos son forzadas a moverse bajo la influencia del campo magnético. Para que las paredes se puedan mover deben superar la resistencia producida por los puntos de anclaje, tales como: borde de grano, dislocaciones, inclusiones, etc. Así se ocasionan saltos discretos en la curva de magnetización. La sumatoria de todos los saltos, que ocurre durante la magnetización, da origen al EB, cuyos pulsos de tensión son detectados por una bobina sensora colocada en la superficie del material [Cullity B. D., 1972].

El EB establece que el ciclo de histéresis de un material ferromagnético no es una curva suave, existen discontinuidades, o saltos, que se producen a lo largo de su trayectoria en un nivel microscópico (ver Figura 1.2.1). La histéresis se debe a que los límites de los dominios, no se mueven totalmente de nuevo a sus posiciones iniciales cuando se retira el campo externo.

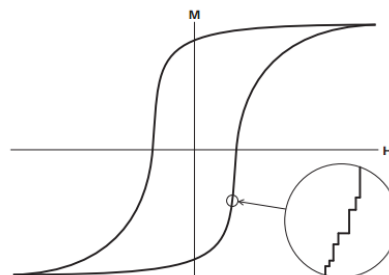


Figura 1.21. Saltos discretos en el lazo de histéresis, curva B-H de histéresis.

En la literatura, este método se conoce con diferentes nombres y abreviaturas, como Efecto Barkhausen (EB), Ruido Barkhausen (RB), Ruido Magnético Barkhausen (RMB) y los saltos de Barkhausen (SB). Dentro de este texto, se utilizará como Ruido Magnético Barkhausen (RMB).

En materiales policristalinos, cada punto de anclaje tiene un corto radio de acción, sus efectos sobre la restricción de las PDs están muy localizado. Una vez que las paredes se han separado del punto de anclaje, se someterán a un movimiento rápido e irreversible, que produce una discontinuidad en la velocidad de cambio de la magnetización [Jiles D. C., 2000]. Por lo tanto, el RMB depende de la interacción de las PDs con los puntos de anclaje, y ésta es la base de su aplicación a los ensayos no destructivos en materiales ferromagnéticos. El RMB es muy sensible a la densidad y al tipo de puntos de anclaje, por lo tanto, a la estructura y a las tensiones en el material. También es causado por la nucleación de los dominios que se produce en los puntos de anclaje, ya que su presencia reduce la energía de las paredes del dominio inicial.

Para determinar el RMB, se miden los pulsos de tensión que surgen en una bobina colocada sobre la superficie del material. Cada pulso de tensión representa un cambio paso a paso en la magnetización (ΔM) y la altura del pulso S depende de la naturaleza del cambio:

$$S \propto \frac{|\Delta M|}{t} \quad (3.1)$$

donde t es la duración de cada paso. Con respecto al movimiento de la PD, este tamaño del pulso se puede escribir como:

$$S \propto |\Delta M| |v_{PD}| A \quad (3.2)$$

donde A es el área de la PD y v_{PD} la velocidad de la PD. La distancia recorrida por este movimiento de la PD determina la longitud del pulso.

Los principales procesos que se producen debido a la actividad del RMB son:

- Movimiento discontinuo irreversible de la PD.
- Rotación discontinua de los momentos magnéticos dentro del dominio.
- Aparición y desaparición de las PDs (Bloch o Neel).
- La inversión de la magnetización de los átomos en un solo dominio.

- Desplazamiento de las líneas de Bloch o Neel en 180° con dos paredes de magnetización en direcciones opuestas.

De acuerdo con Jiles D. C. (2000), la actividad de RMB tienen lugar principalmente en la zona del punto coercitivo (H_c) de la curva de histéresis y es repetible en promedio a cada lado (ver Figura 3.2). La frecuencia de la actividad del EB es mucho más alta ($\sim \text{kHz}$) respecto a las componentes de frecuencia del ciclo de histéresis ($\sim \text{Hz}$). La pendiente de la histéresis, determina la intensidad y la forma de las señales de de Barkhausen (“bursts”). La forma y amplitud del RMB depende de la microestructura, esto lo hace un método importante para investigar propiedades tales como tamaño de grano, tratamiento térmico, deformación y propiedades mecánicas tales como dureza de los materiales, tensiones residuales [Da Silva Junior et al. 2005, Siwik D., 2011]. En la Figura 1.22 a) se observa un perfil típico de la señal de RMB que se adquiere como una señal de tensión, su valor máximo se produce en la región de H_c , punto de mayor pendiente en la curva de histéresis En la Figura 1.22 b) se observa cómo las ondas electromagnéticas se mueven hacia afuera del material y son recogidas como una fuerza electromotriz inducida (fem) en la bobina sensora colocada sobre su superficie.

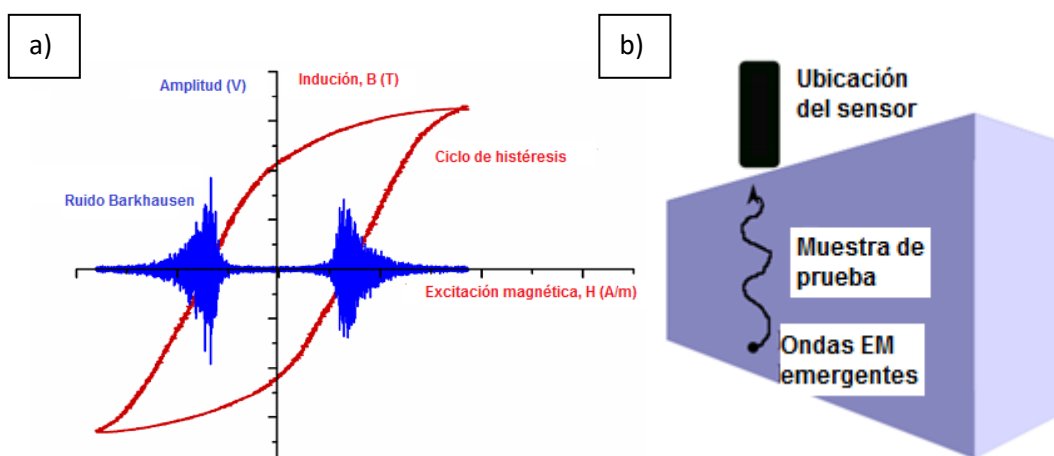


Figura 1.22 a) Perfil típico del RMB; b) ondas electromagnéticas recogidas como una fem inducida en la bobina.

Matemáticamente, este voltaje inducido puede ser descrito por la ley de inducción de Faraday, que establece que el cambio en el flujo magnético corresponde al cambio de la fem inducida. El espectro de potencia de las señales del RMB puede extenderse hasta de 2 MHz y su amplitud puede decaer exponencialmente como función de la profundidad de penetración debajo de la superficie. Esta disminución se puede atribuir al denominado “efecto de piel” o pelicular, debido a la oposición de las corrientes de Foucault. Como ya se dijo anteriormente, a mayor frecuencia de excitación magnética se produce una menor profundidad de

penetración del campo en el material. Por lo tanto, en general no se prefiere un aumento en la frecuencia de magnetización.

Desde su descubrimiento, el RMB ha sido ampliamente utilizado como una herramienta importante para caracterizar los materiales magnéticos blandos, el proceso complejo de la magnetización y, en particular, para investigar la dinámica de las PDs. El principal obstáculo a este logro es la inherente complejidad del fenómeno del RMB y el carácter intrínsecamente estocástico de las señales. Un punto crucial es que el RMB como función de la Magnetización (M) a lo largo de cada semi-lazo de histéresis, es altamente no estacionario, por el hecho de que varios procesos bastante diferentes tienen lugar a diferentes niveles de magnetización: movimiento de las PDs, cuando M es baja; creación y aniquilación de dominios magnéticos cerca de la saturación magnética. Cualquier resultado obtenido de promediar las propiedades del RMB sobre el lazo de histéresis, mezcla en forma intrincada todos estos procesos y no se logrará una interpretación física clara [Alessandro B. et al., 1988]. Las principales razones de las diferencias entre los resultados experimentales y teóricos pueden ser citadas por el carácter fenomenológico de los modelos, la falta de normas para los sistemas experimentales y para la adquisición de series temporales de RMB. En este sentido, en particular, Bertotti G. et al. (1981) observaron que las propiedades estadísticas del RMB varían típicamente a lo largo de la curva de magnetización. Sólo teniendo en cuenta el movimiento de las PDs es dominante el proceso de magnetización, como alrededor del campo coercitivo, se puede obtener una señal estable y correctamente al realizar el análisis estadístico del ruido. Esta observación dio lugar a una nueva serie de experimentos detallados, que fueron bien descritos por un nuevo modelo, conocido como ABBM [Alessandro B. et al., 1990]. A pesar de que el modelo sigue siendo fenomenológico, tuvo el mérito de describir las propiedades estadísticas del RMB, basándose en sólo pocas consideraciones verificadas experimentalmente, y es manejable analíticamente.

Se cree que el RMB es principalmente debido al movimiento de las PDs de 180° . Las paredes de 90° tienen campos de tensiones asociados ya que sus magnetizaciones están a ángulos rectos a cada lado de la pared, causando espaciamientos de la red ligeramente mayores en la dirección de magnetización. La deformación resultante dificulta el movimiento de las paredes de 90° , haciéndolas menos competitivas que las paredes de 180° que tiene mayores velocidades.

Debido a que el RMB depende de tantas variables, es forzoso todavía recurrir a estudios comparativos y tener en cuenta que sus resultados no son absolutos, siendo por lo tanto necesario emplear una probeta “testigo” (no deformada o de caracterización

microestructural conocida), que actúe como “patrón” para cada tipo de aleación. Para minimizar los errores en las mediciones se debe tener en cuenta los factores que afectan la calidad del método, como por ejemplo: el operador que está fuertemente influenciado, el tamaño de la bobina sensora, la rugosidad de la pieza, la orientación de los granos con el campo magnético aplicado, entre otros.

Hay muchas investigaciones sobre los cambios de la señal de RMB bajo diversas condiciones, como fatiga [Titto 2007, de los Reyes-Rodríguez F. et al., 2013], irradiación [Fan M. L. et al. (2014), Kikuchi H. et al. (2012)], tensiones residuales [Augustyniak B. et al. (2012), Schajer G. S., Buttle D. J, (2013)], condiciones de fluencia [Sablík M. J et al. (2004)], etc. Se ha demostrado que también es sensible al tamaño de grano [Ishihara M. (1991), Torres Pupo C. y Perez Benitez J. A., 2009, Jan Bydžovský J., (2013)], dureza [Franco F. (2013), Zerovnik P. et al. (2010)], [Neyra A. Miriam, 2018].

1.6.1 La Normalización del Ruido Magnético Barkhausen

Las pruebas de aptitud se llevan a cabo como una actividad esencial de los laboratorios de pruebas y se ha convertido en un requisito obligatorio para la acreditación de laboratorios. Las pruebas aseguran que los métodos estadísticos que se adoptan son adecuados para los fines previstos. En general, el esquema de prueba de aptitud se describe al principio de acuerdo con el objetivo y el propósito del estudio. Luego, se realiza el plan de prueba estadística con métodos. La última fase es evaluar los resultados de los laboratorios de prueba individuales (evaluación del desempeño).

El RMB se ve afectado por muchos factores: el equipo, el diseño del sensor, el participante, la forma en que se realiza la medición y el software utilizado. En general, las pruebas de calibre, repetibilidad y reproducibilidad, se utilizan al estudiar las variaciones de medición y sus causas, que incluyen los efectos de un participante, los efectos del equipo y la forma en que se realizan las mediciones. Además, entre otras cosas, el uso de diferentes herramientas de cálculo estadístico para probar el rendimiento del equipo RMB (repetibilidad y reproducibilidad) en un control de calidad antes de enviar el equipo RMB a los clientes.

Se han hecho pocos estudios interlaboratorio para la acreditación de la técnica de RMB, participando en el año 2009, el Grupo de Ondas Elásticas (GOE) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), en el “Second Round Robin Test” organizado por la “Universal Network for Magnetic Non Destructive Evaluation”, UNMNDE (<http://www.ndsrc.eng.iwate-u.ac.jp/UniversalNetwork/>). El GOE recibió 12 muestras de Fe – 1% en peso de Cu hechas en Japón, con el propósito de simular posibles procesos que cambian la microestructura de los

recipientes a presión de los reactores nucleares en servicio. El Round Robin Test nos ayudó a conocer varios problemas para la estandarización de las END magnéticos. Los resultados del efecto de RMB mostraron un gran desacuerdo entre cada grupo. El desacuerdo es un resultado inesperado, ya que estas propiedades magnéticas son causadas por la interacción entre las paredes del dominio magnético y los defectos de la red, como las dislocaciones. Todas las propiedades deberían cambiar consistentemente con defectos en la red. Pero nuestros datos no necesariamente concuerdan necesariamente entre sí. Es difícil decir qué resultados son correctos o incorrectos para la estandarización de la técnica magnética [S. Takahashi, 2009].

Robert Tomkowski et al., estudiaron y analizaron muestras molidas de manera diferente fue el objetivo de esta prueba interlaboratorio que involucró a investigadores de tres laboratorios diferentes en Suecia y Finlandia. La primera parte del experimento fue preparar dos lotes de muestras de tierra en diferentes instalaciones con parámetros de molienda similares. La segunda parte del experimento consistió en una comparación entre laboratorios de ida y vuelta realizada con el método de RMB. Las tareas principales fueron (1) comparación entre laboratorios y (2) evaluación del efecto de la molienda en las características de RMB. La primera parte del experimento consistió en moler muestras en diferentes instalaciones (Suecia y Finlandia) con parámetros de molienda similares, diferentes ruedas de molienda y diferentes valores de dureza. La segunda parte fue evaluar los parámetros RMB medidos para determinar los factores significativos que afectan el valor de la señal. Los datos de medición de las muestras se dividieron en dos lotes diferentes según el lugar donde se fabricaron. Ambos lotes de molienda contenían datos de medición de tres participantes diferentes. El análisis mostró que los valores de medición absolutos no eran reproducibles, especialmente si se aplicaba un sensor diferente. Aún así, los resultados fueron reproducibles y comparables. La única excepción se observó para un conjunto de datos, donde los valores RMS capturados por un participante mostraron un comportamiento no lineal con respecto a los demás. La razón de esto no se identificó, pero requiere un análisis más detallado [Robert Tomkowski, 2019].

1.7 Objetivo

- Estudiar la viabilidad de la técnica de RMB para caracterizar cordones de soldadura.

2. DESCRIPCION DEL LABORATORIO

El Laboratorio de Ondas Elásticas de Departamento del Proyecto ICES está ubicado en la localidad de San Martín, Buenos Aires, presta servicio para Investigación y Trabajos a terceros, está constituido por becarios, personal técnico y profesional, cuenta con equipos e instalaciones adecuadas para el desarrollo de las tareas que realiza. Este Laboratorio se dedica a la investigación en la caracterización de materiales con las siguientes técnicas de ensayos no destructivos: Ultrasonido, Emisión Acústica y Ruido Magnético Barkhausen. En este Grupo para la aplicación de la técnica de EA se trabaja bajo las normas IRAM. No tenemos incluida en nuestro sistema de trabajo los requisitos que indica la Norma ISO 17025, pero si tenemos incluido algunos de ellos como, por ejemplo: imparcialidad y confidencialidad, la estructura de la organización, personal, condiciones ambientales, muestreo, registros técnicos, informes de los resultados de los ensayos. Esto se detalla en este Capítulo.

2.1 Organigrama del Grupo de Ondas Elásticas

El Laboratorio está integrado por 11 personas activas, las cuáles cuentan con las competencias y habilidades para desarrollar las actividades que el Laboratorio demanda. El Laboratorio Ondas Elásticas depende del Departamento Coordinación Proyecto Centro Internacional para el Estudio de la Tierra, ICES, el cual está compuesto por personal competente para realizar las tareas administrativas. En la Figura 2.1 se muestra el organigrama del Grupo.

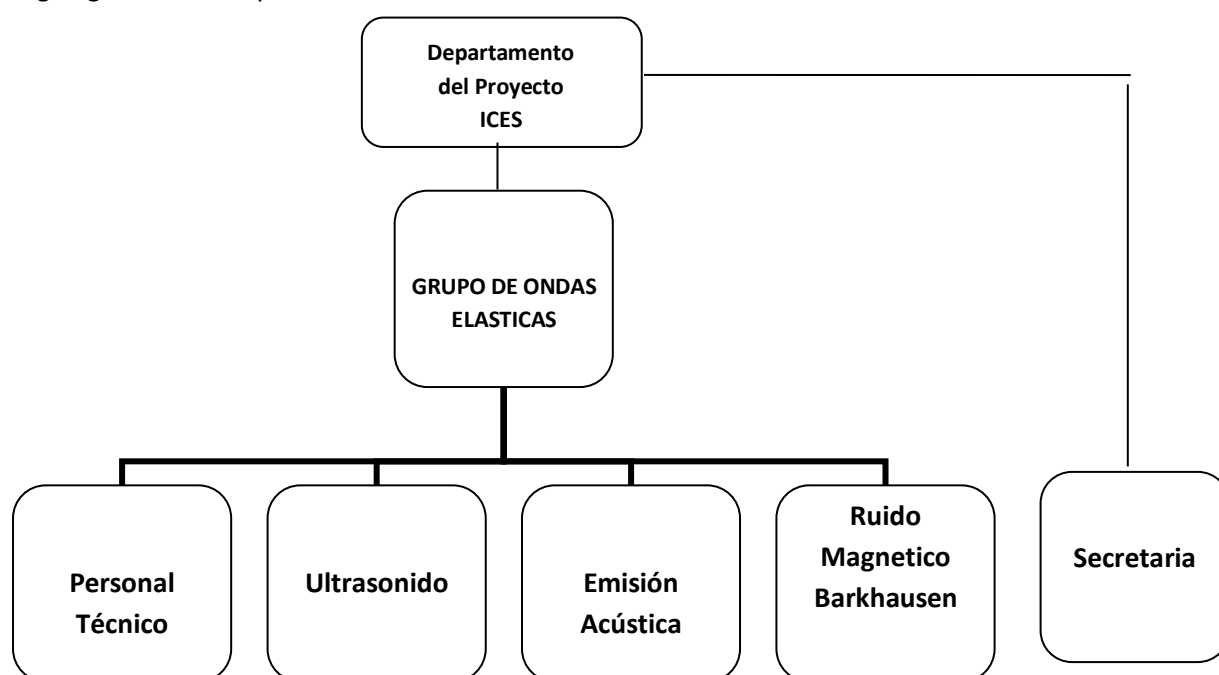


Figura 2.1 se muestra el organigrama del Grupo de Ondas Elásticas

2.2 Instalaciones

El Departamento ICES cuenta con dos Laboratorios y 4 oficinas, el primero es donde se realizan ensayos de ultrasonido y Ruido Magnético Barkhausen, el segundo se realizan ensayos de Emisión Acústica. Las instalaciones son capaces de facilitar la correcta realización de las actividades de Laboratorio. La iluminación, ventilación, y la disposición de los equipos son las adecuadas para que las actividades se desarrollen correctamente, como así también que el funcionamiento del equipamiento sea el adecuado y considerando siempre la seguridad del personal. Como las instalaciones del Laboratorio tienen un uso común para todo personal autorizado, los cuáles realizan tareas de investigación y desarrollo de otras áreas para terceros. El Laboratorio permanece en condiciones adecuadas de orden y de limpieza. La limpieza está a cargo de personal especialmente designado para dichas tareas. Los sectores que integran el laboratorio poseen instalaciones de energía eléctrica, de gas natural, de gases específicos, de agua potable, y servicios de comunicación (teléfono e internet). Las condiciones ambientales para llevar a cabo los ensayos son a temperatura ambiente y presión atmosférica normal.

2.3 Equipamiento

El Laboratorio cuenta con equipos que son específicos para las actividades que desarrolla, y también con instrumental de uso común a otras áreas lo tanto se encuentran ubicados en diferentes sectores.

2.4 Trazabilidad metrologica

Con el fin de asegurar y validar los resultados en el Laboratorio del Grupo de Ondas Elásticas en las diferentes mediciones de los ensayos realizados, se utilizan normas o métodos específicos y la participación en interlaboratorios, por ejemplo, para la técnica de EA se utilizan las normas IRAM. Cabe destacar que los participantes del Grupo son miembros activos del IRAM.

2.5 Validación de los métodos utilizados en los ensayos realizados

Para el ensayo de Ruido Magnético Barkhausen utilizado en la caracterización de materiales, existen diferentes procedimientos que han sido publicados en diversos artículos científicos. Para su publicación estos artículos científicos han debido ser evaluados por pares. La revisión por pares es un método complejo y riguroso de gran importancia que se ha usado para validar trabajos científicos escritos por un grupo de expertos.

En el caso de que alguna de las técnicas sea modificada, se registrada en el informe del ensayo. Antes de comenzar cada ensayo, se verifica el correcto funcionamiento del equipo. Siempre que sea posible se determinará la Incertidumbre de la medición, con el objetivo de determinar los límites dentro de los cuáles se espera encontrar el valor verdadero de la medición, el valor del calculo se detallará en el informe.

2.6 Muestreo

Para la identificación de las muestras, estas son rotuladas con las etiquetas preparadas donde se identifica fecha y hora de muestreo.

2.7 Aseguramiento de la calidad

Para asegurar la calidad de los resultados controlamos el buen funcionamiento de los equipos y participación en ensayos intralaboratorio e interlaboratorios. Estos ensayos son planificados y programados periódicamente.

2.8 Informes técnicos

Una vez concluidos los ensayos que se realizan en el Laboratorio, los resultados de ensayos son revisados por el Jefe de Grupo, quien verifica que no haya anomalías. Cada informe de ensayo consta de los siguientes datos:

- Gerencia de Área:
- Gerencia:
- Grupo:
- Departamento:
- Grupo: Ondas Elásticas
- Informe Técnico N°:
- N° Páginas:
- Autores:
- Revisó:
- Aprobó:
- Fecha:
- Motivo:
- Título del Ensayo:
- Materiales y Equipos Utilizados:
- Metodología de ensayo:
- Resultados:
- Conclusiones:

3. CONTROL DE CALIDAD EN CHAPAS SOLDADAS MEDIANTE EL RUIDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN

El espectro del RMB generado en materiales ferromagnéticos durante el proceso de magnetización, presenta una fuerte dependencia de la microestructura de estos materiales, siendo fuertemente afectado por su composición química, procesamiento mecánico, presencia de impurezas y defectos en la red cristalina, orientación cristalina y presencia de tensiones.

En este trabajo se presentan los primeros estudios de 3 probetas con defectos de soldadura en un cordón con zonas “bien” y “mal” soldadas, definidas, así por el operador durante el proceso de soldadura. Para lograr las zonas mal soldadas se afectó parte de la línea de contacto entre las chapas. Se ensayaron las probetas en diferentes laboratorios y con equipos diferentes, pero con la misma frecuencia de excitación (10 Hz). En el Grupo de Ondas Elásticas, se está estudiando la posibilidad de utilizar la técnica de Ruido Magnético Barkhausen (RMB) en uniones soldadas, se han hecho ensayos en chapas provistas por el Instituto Argentino de Siderurgia (IAS).

3.1 Descripción del material

Para la realización de este estudio se estudiaron 3 Chapas provistas por el IAS. Las Chapas estudiadas son de acero de bajo C, y fueron proporcionadas por el Instituto Argentino de Siderurgia (IAS). Su composición química, en % en peso, se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química Acero de bajo C (%P)

	C	Mn	Si	P	S	Nb	Ti	V	Cr	Ni	Cu
Min	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Max	0,07	0,35	0,03	0,025	0,020	0,005	0,009	0,005	0,080	0,050	0,080

Las chapas fueron fabricadas para uso final como hojalata. Proviene de un planchón de colada continua, pasando posteriormente por una serie de laminados en caliente, finalmente después de la última reducción, pasa a una mesa de enfriamiento controlado y luego se forman los rollos. El final de una bobina y el comienzo de la otra, se suelda a tope por “chisporroteo”, sin aporte de otro material. Mediante el pasaje de una corriente eléctrica empleando un electrodo, se funden las zonas a soldar, formándose entre ambas chapas una pileta líquida.

El proceso de soldadura se controla con la velocidad de movimiento del electrodo, la energía eléctrica y el recalque (fuerza con la que se empujan las dos chapas entre sí). La soldadura luego es cepillada en forma mecánica, eliminando lo que se expulsó durante el proceso de soldadura. Estas bobinas, pasan posteriormente por un proceso de decapado con ácido clorhídrico, para posteriormente ser laminadas en frío y recocidas y según sea el caso, continuar con el proceso posterior de estañado, pre pintado, etc.

Chapa 1

En la Figura 2.1 se muestra una fotografía completa de la probeta (Chapa 1), con las indicaciones de las zonas “mal” (NO OK) y “bien” (OK) soldadas. Sus dimensiones son: 1226 mm x 540 mm x 2.4 mm. El cordón de la soldadura corresponde a la franja de color más claro que se puede ver en la zona central de la imagen. Se definió un sistema de coordenadas, con el eje Y sobre el cordón de soldadura, marcando posiciones cada 2 cm (ver las líneas azules en la Figura 2) y el eje X, paralelo al extremo izquierdo de la probeta.

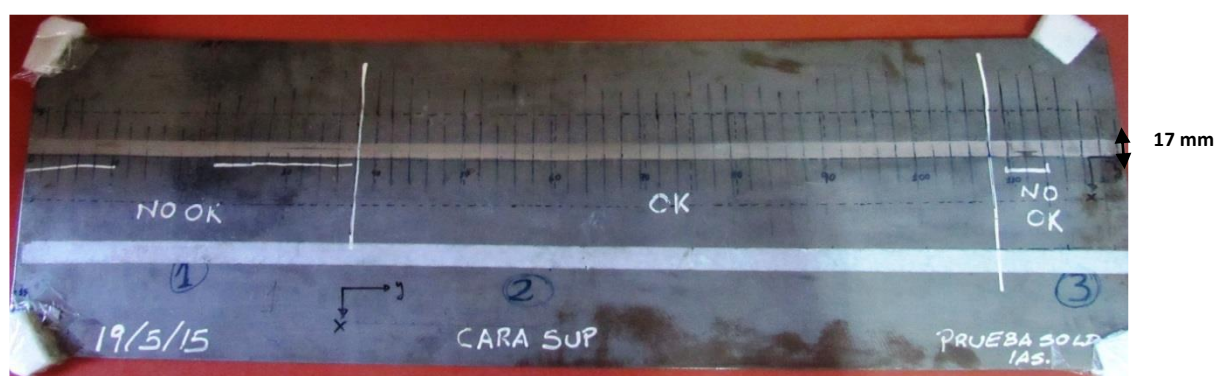


Figura 2.1. Chapa 1, zonas “mal” (NO OK) y “bien” soldadas (OK).

En la Figura 2.2 se muestran imágenes, con mayor ampliación, de dos zonas de la probeta: a) “mal” soldada y b) “bien” soldada.

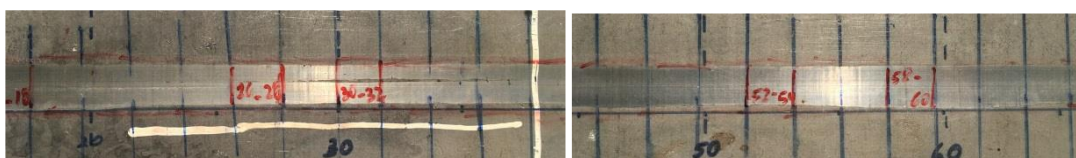


Figura 2.2. Chapa 1 a) “mal” soldada y b) “bien” soldada.

En la Figura 2.2 a) se observa la falta de fusión en una pequeña zona del cordón de soldadura (posición 28 cm a 34 cm), las demás irregularidades no son observables a simple vista. La

extensión de la soldadura en cada región, es un factor que afecta la cantidad de mediciones confiables de RMB que pueden ser realizadas en cada zona. En los datos de RMB también influyen los efectos de borde en los extremos de la chapa y las indefiniciones en la transición entre las distintas regiones de la soldadura. Por estas razones para este estudio, sólo se consideraron las mediciones realizadas en zonas que tuvieran comparativamente mayor extensión. Así se estudiaron, cada 2 cm, las señales de RMB obtenidas en las siguientes porciones del cordón de soldadura:

- zona “mal” soldada: desde $y_1 = 8$ cm, hasta la posición $y_2 = 34$ cm
- zona “bien” soldada: desde la posición $y_1 = 42$ cm hasta la posición $y_2 = 106$ cm.

Chapa 2

La Chapa 2 fue ensayada en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN). En la Figura 2.3, se muestra una fotografía de la Chapa 2 completa, con las diferentes zonas de soldadura: “bien” (OK) y “mal” (NO OK). Sus dimensiones son: 1228 mm x 540 mm x 2.4 mm. En la Figura 2.4 se muestra una ampliación de cada una de las zonas.



Figura 2.3. Chapa 2 con las diferentes zonas “bien” soldada (OK) en el lado izquierdo y “mal” soldada (NO OK) en el resto.



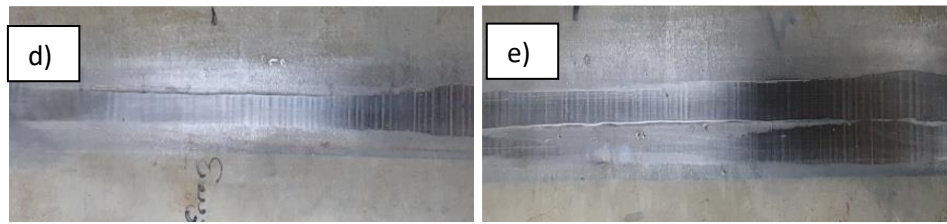


Figura 2.4. Diferentes zonas a) “bien” (OK); b), c), d) y e) “mal” (NO OK), Chapa 2

Se puede apreciar diferentes defectos: desnivel en la unión de las chapas, falta de fusión y otras irregularidades en el cordón de soldadura. Las líneas paralelas, transversales al cordón de soldadura, son las marcas dejadas por el proceso de fresado, posterior. Las posiciones ensayadas en cada zona se detallan a continuación:

- a) “bien” soldada: desde $y_1 = 6$ cm hasta $y_2 = 32$ cm,
- b) “mal” soldada 1: desde $y_1 = 34$ cm hasta $y_2 = 44$ cm,
- c) “mal” soldada 2: posición $y_1 = 46$ cm hasta $y_2 = 84$ cm,
- d) “mal” soldada 3, desde la posición $y_1 = 86$ cm hasta $y_2 = 100$ cm,
- e) “mal” soldada 4: desde la posición $y_1 = 102$ cm hasta $y_2 = 120$ cm.

Chapa 3

En la Figura 2.5, se muestra una fotografía de la Chapa 3 completa, identificada por el operador como “mal” soldada (NO OK). Sus dimensiones son: 1228 mm x 489 mm x 2.4 mm. En la Figura 2.6 se muestra una ampliación de cada una de las zonas. Se midió cada 1 cm.

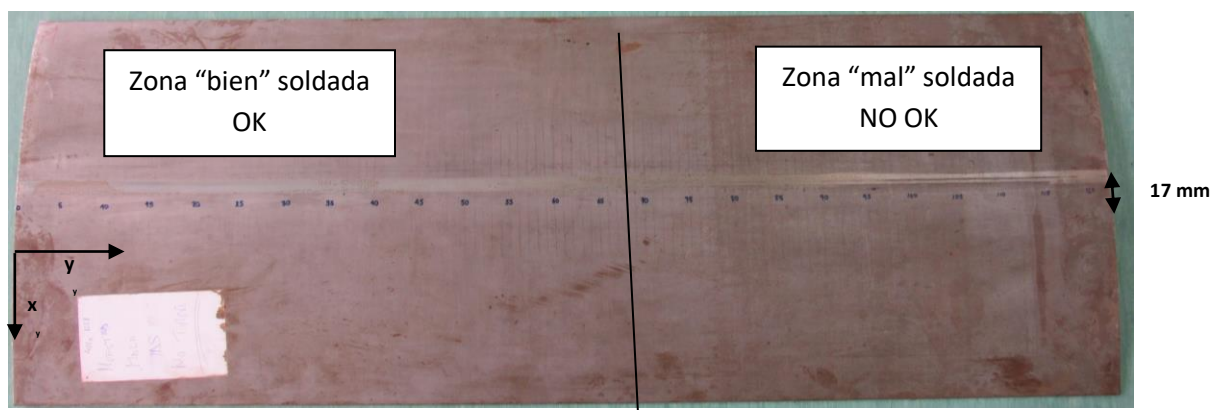


Figura 2.5. Fotografía de la Chapa 3, identificada por el operador, como “mal soldada” (NO OK) y “bien” (OK) soldada.

En la Figura 2.6 se muestran imágenes, con mayor ampliación, de toda la chapa. Las fotografías fueron tomadas cada 10 cm.

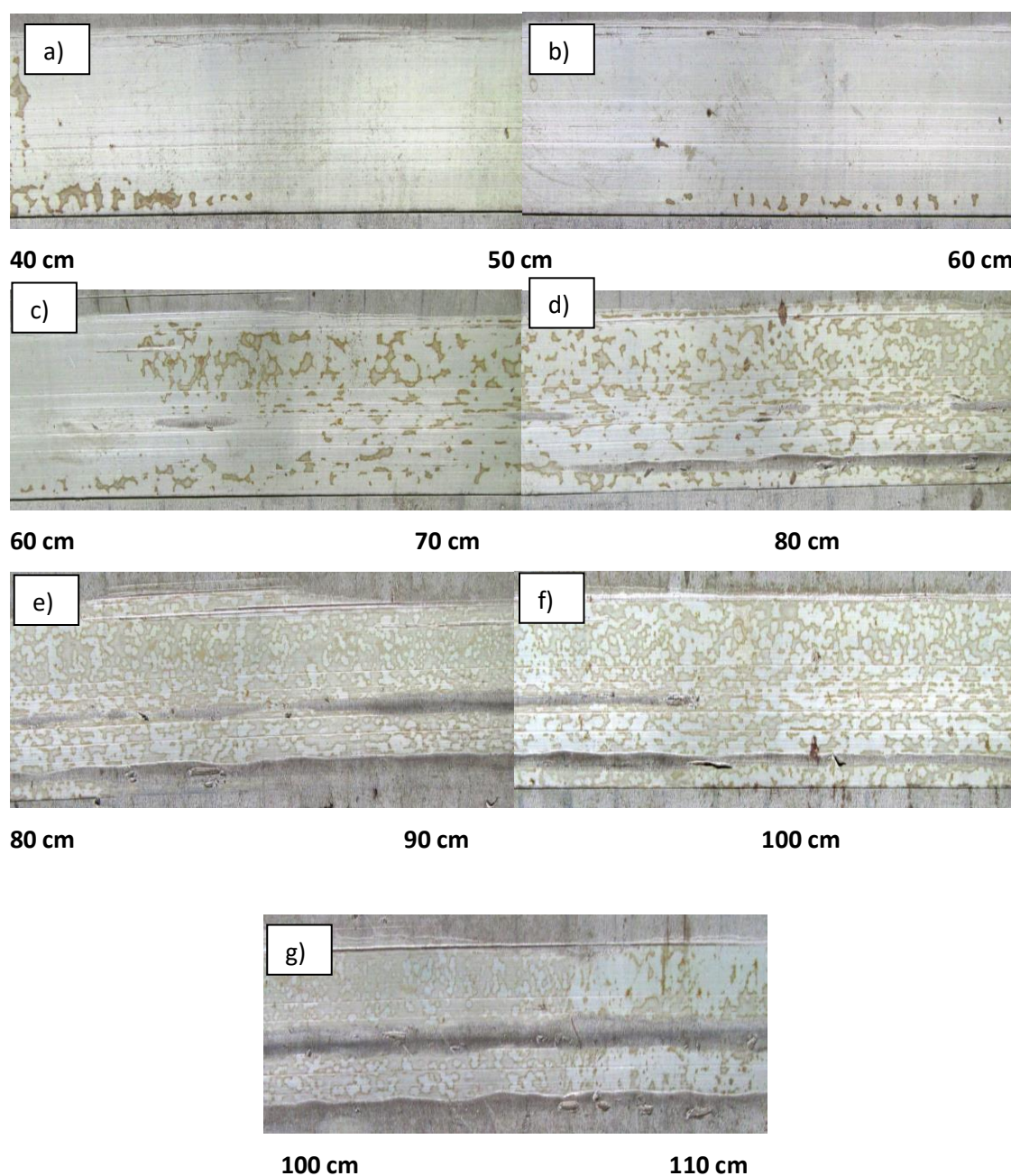


Figura 2.6. Ampliación de las diferentes zonas de la chapa 3 identificada por el operador, como “mal” soldada.

Se puede apreciar diferentes defectos: desnivel en la unión de las chapas, falta de fusión y otras irregularidades en el cordón de soldadura. Las posiciones ensayadas en cada zona se detallan a continuación:

a) “bien” soldada: desde $y_1 = 40$ cm hasta $y_2 = 63$ cm,

b) “mal” soldada 1: desde $y_1 = 64$ cm hasta $y_2 = 66$ cm,

c) “mal” soldada 2: posición $y_1 = 70$ cm hasta $y_2 = 100$ cm

3.2 Estudio metalográfico

Luego de haber estudiado la soldadura con el RMB en la chapa 1, se cortaron 3 pequeñas muestras para poder hacerles metalografías. En la Figura 2.7 se muestran las micrografías realizadas en cortes transversales de tres regiones diferentes: a) en el metal base, (b) y (c) en la zona afectada por el calor (HAZ) para la zona “bien” soldada y para zona “mal” soldada, respectivamente.

En el metal base se pueden apreciar granos pequeños, prácticamente equiaxiales y de tamaño homogéneo. En la micrografía b) se ve una gran cantidad de granos de mayor tamaño, de forma alargada y aparece la presencia de poros. En la micrografía c), se ve en la izquierda, la zona menos afectada por el calor y hacia a la derecha va aumentando la variación en la morfología de la microestructura, que se vuelve poligonal y también presenta granos más finos [Neyra A. et al., 2017].

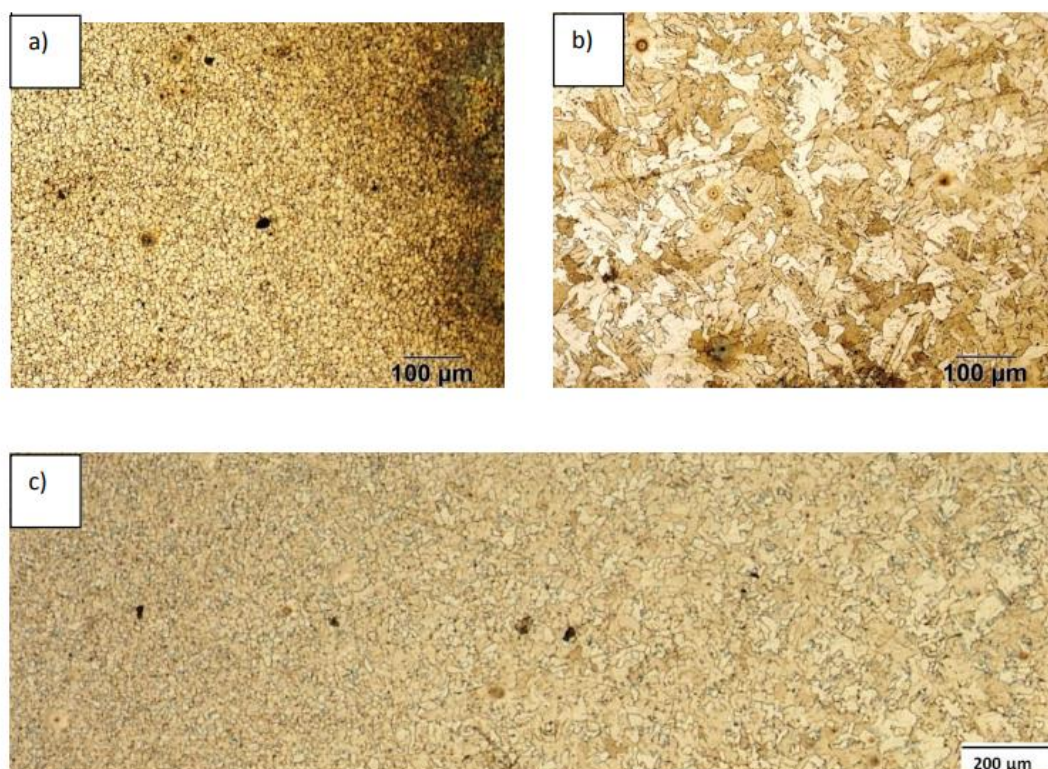


Figura 2.7. Metalografía de cortes transversales del material. a) Zona sin soldar, metal base; b) zona “mal” soldada (NO OK); c) zona “bien” soldada (OK)

3.3 Medición del RMB

La determinación del valor más apropiado del campo magnético de excitación se llevó a cabo de manera experimental, excitando el material con campos magnéticos de diferentes amplitudes, luego seleccionando el valor del campo magnético para el cual la tasa de variación del ruido magnético de Barkhausen con el campo aplicado tuvo el valor más alto.

Como anteriormente se mencionó se identificaron las probetas, como Chapa 1, Chapa 2 y Chapa 3, y se midió el RMB sobre la superficie del cordón de soldadura. Las mediciones fueron realizadas con tres yugos diferentes: en la CNEA con los identificados como Yugos 1 y 3, y en la UTN con el Yugo 2 y distintos sistemas de medición.

En la Figura 2.8 se muestra una foto del área superior de los tres yugos de excitación empleados en los ensayos realizados. Las bobinas sensoras de RMB están ubicadas en la parte inferior, entre la superficie de apoyo de cada yugo y en la Tabla 3.2 se muestra las características del diámetro de la bobina sensora de RMB y separación entre los extremos de cada yugo.

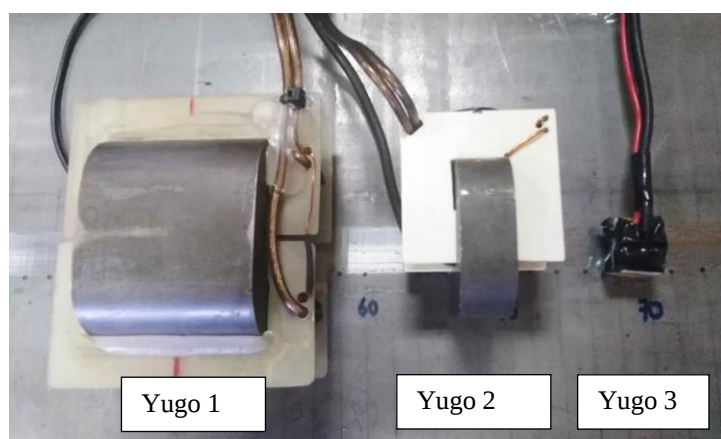


Figura 2.8. Fotografía comparativa de los tres yugos empleados.

Tabla 3.2. Características del diámetro de la bobina sensora de RMB y separación entre los extremos de cada yugo

	Diámetro de la bobina (mm)	Distancia patas de los yugos (mm)
Yugo 1	15	30
Yugo 2	16	16
Yugo 3	11	11

3.3.1 Primeros ensayos

Como ya se indicó, las mediciones de RMB se realizaron en dos Laboratorios distintos (CNEA y UTN), en dos Chapas diferentes y con diferente equipamiento, pero se respetaron las mismas condiciones para la realización de los ensayos. El diagrama de la Figura 2.9 muestra el esquema del sistema de medición empleado. El yugo magnético excitador se colocaba sobre la superficie del cordón de soldadura, manteniendo entre sus apoyos, la bobina sensora. El campo magnético de excitación se lograba con una corriente sinusoidal de 10 Hz producida por un generador de funciones LeCroy ARB Studio 1102 y un voltaje de 1 V, luego amplificada. Con esta señal se excitó la bobina del yugo que fue ubicado sobre el cordón de soldadura, desplazándolo cada 2 cm, adquiriendo así los datos generados por las zonas “bien” y “mal” soldada. En todos los casos se realizaron mediciones con el campo magnético de excitación paralelo al cordón de soldadura y luego transversal al mismo. Se trabajó con un osciloscopio digital de 4 canales Lecroy MSO 63XS-A en la CNEA y un PicoScope Serie 2000 de tres canales en la UTN, con una frecuencia de digitalización de 2,5 Ms/s. En el canal 1 se registró la tensión sobre el yugo, en el canal 2 la señal del RMB y en el canal 3 las señales de Emisión Magneto Acústica (EMA). Como ejemplo en la Figura 2.10 se muestra la fotografía del sistema de medición de la Chapa 1 (CNEA). Las señales de EMA no pudieron ser analizadas porque presentaban un nivel muy bajo que apenas sobresalía del ruido.

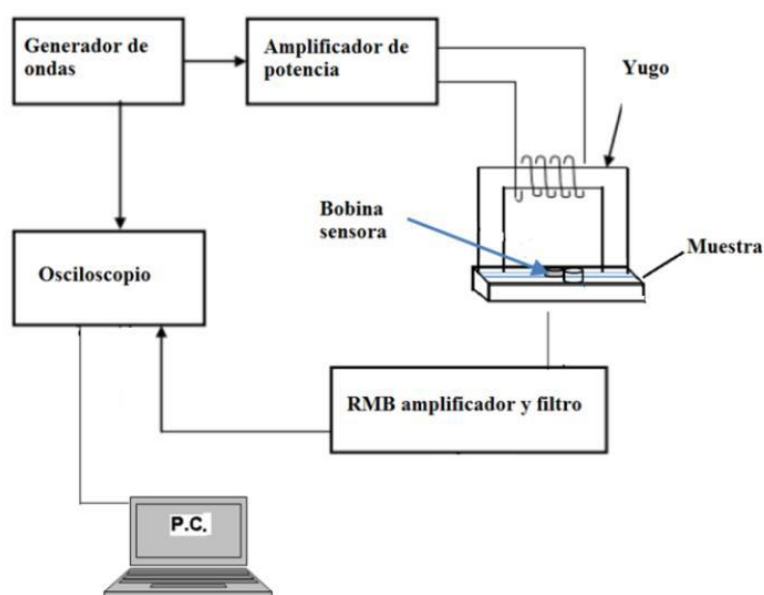


Figura 2.9. Fotografía del sistema de medición

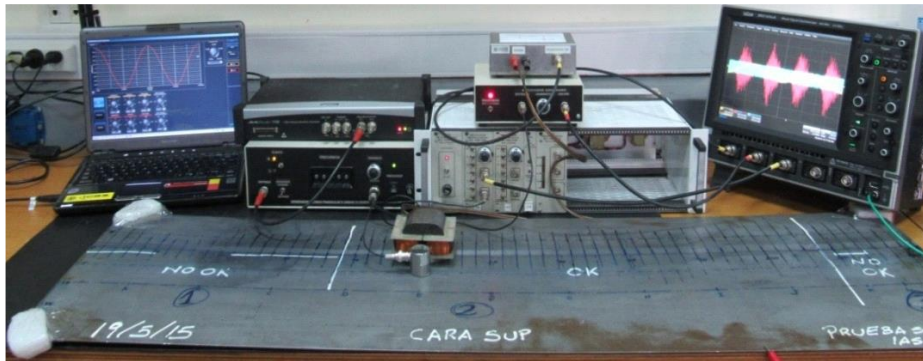


Figura 2.10. Fotografía del sistema de medición de la Chapa 1 (CNEA), Yugo 1.

3.3.2 Segundos ensayos

El campo magnético de excitación se lograba con una corriente sinusoidal de 10 Hz y una tensión de 2 V, producida por un generador de funciones LeCroy ARB Studio 1102, amplificada a través de un amplificador de potencia. La ganancia del amplificador de potencia es de 6. Esta corriente excitaba el yugo que se colocaba sobre la superficie del cordón de soldadura, con sus patas perpendiculares al cordón de soldadura. La pequeña bobina sensora, responsable de coleccionar la señal de RMB, se ubicaba en el medio del yugo, apoyada sobre el material. La señal de la bobina generadora del campo y la de la sensora, fueron registradas y grabadas simultáneamente en el osciloscopio, para su posterior elaboración. El yugo inductor y la bobina sensora fueron posicionados sobre el cordón de soldadura cada 1 cm, adquiriendo los datos generados por las zonas “bien” y “mal soldada”. En las Figuras 2.11 se muestra la fotografía del sistema de medición. En la Figura 2.12 se muestra un detalle al yugo con el sensor de RMB a) vista frontal y b) vista inferior. Las señales fueron digitalizadas a 2.5 MS/s. En el canal 1 del osciloscopio se midió la tensión aplicada en el yugo y en el canal 2 el RMB. Figura 2.13. Sensor del RMB (UTN) sobre el cordón de soldadura en la zona a) “bien” y b) “mal” soldada.



Figura 2.11. Fotografía del sistema de medición

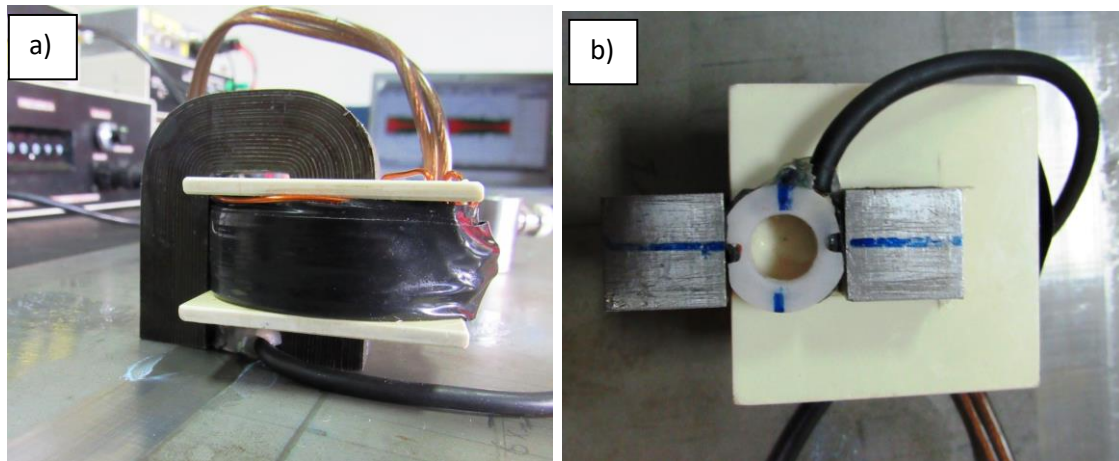


Figura 2.12. Fotografía de yugo con el sensor de RMB a) vista frontal y b) vista inferior

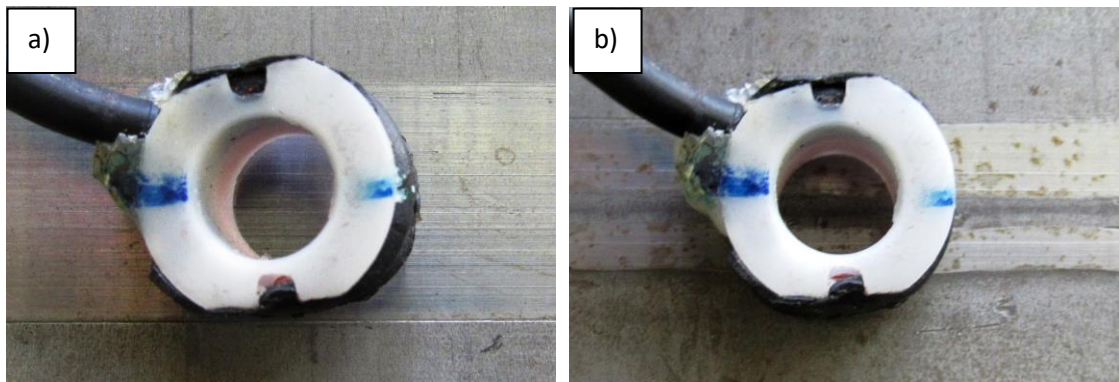


Figura 2.13. Sensor del RMB (UTN) sobre el cordón de soldadura en la zona a) “bien” y b) “mal” soldada

4. RESULTADO Y DISCUSIÓN

Se muestran los resultados de las mediciones de RMB del cordón de soldadura en 3 chapas. Se estudió la influencia de la dirección de aplicación del campo magnético de excitación, para ellos se midió el RMB en la dirección del campo de laminación y en la dirección perpendicular. Se encontraron mayor diferencia en la dirección perpendicular, por eso solo se muestran los resultados en ese sentido.

4.1 Primeros ensayos

Dado que las señales magnéticas fueron registradas teniendo en cuenta dos ciclos completos de excitación del campo magnético externo, se produjeron cuatro señales de RMB, dos durante el aumento del campo y dos durante su disminución. Además, se obtuvieron señales de RMB cuando el campo de excitación era paralelo al cordón de soldadura y cuando era transversal. Para estudiar las diferencias o similitudes entre las señales de RMB, se procedió a hacer un análisis estadístico después de disminuir la influencia del ruido. Para ellos se realizó un

filtrado mediante un filtro pasabanda (5 KHz a 200 KHz) de tipo Butterworth de 4 orden. En la Figura 3.1 se muestran a modo de ejemplo, las señales de RMB para una de la Chapa 1 (CNEA): a) antes de haber sido filtrada y b) después. A partir de las señales filtradas se calculó la envolvente de cada uno de los bucles (señal de RMB), cuando la tensión de excitación aumentaba y cuando disminuía. A partir de las envolventes se calcularon el Máximo y el valor RMS, para los dos casos de excitación, con el campo paralelo y transversal al cordón de soldadura.

En la Figura 3.1 se muestra la captura del osciloscopio en donde se muestran la tensión de excitación (color azul) y la respuesta en RMB (color rojo) en función del tiempo.

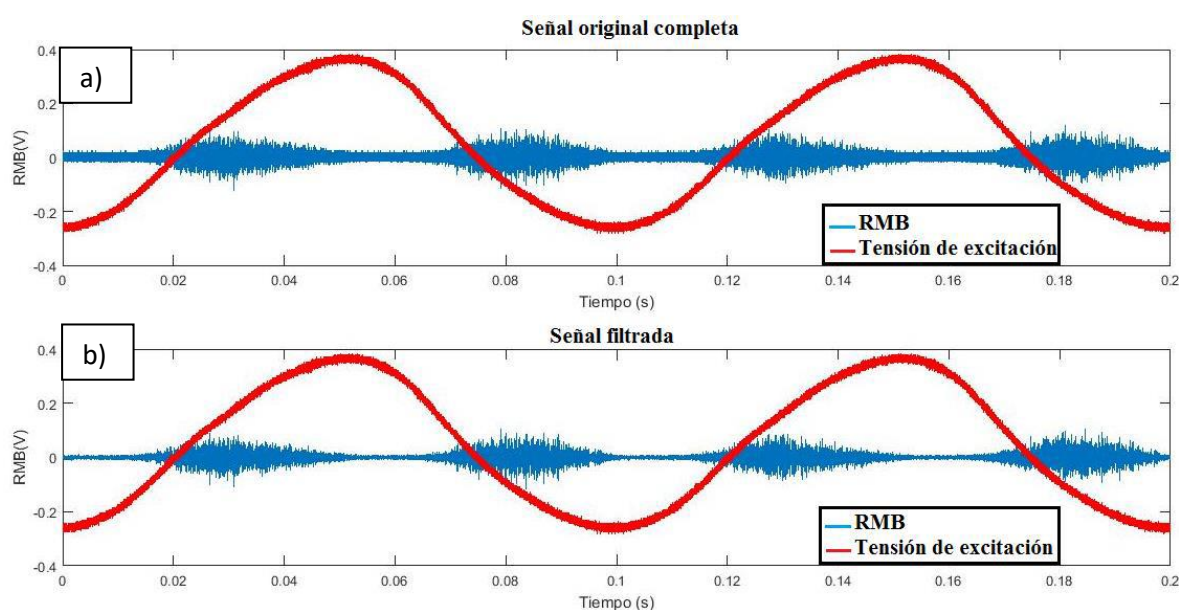


Figura 3.1. Gráficos de las señales: a) antes del filtrado y b) después.

En la Figura 3.2 se observan los valores obtenidos para el Máximo y sus valores medios (líneas horizontales) en cada zona, variando la posición del yugo cada 2 cm: a) Chapa 1, b) Chapa 2.

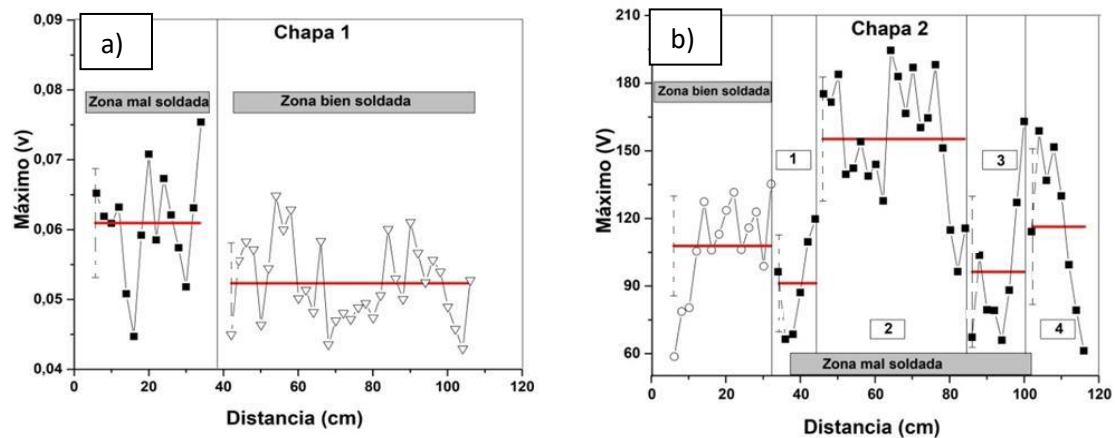


Figura 3.2. Gráfico de los valores del Máximo, campo magnético de excitación transversal al cordón de soldadura. a) Chapa 1 (Yugo 1), b) Chapa 2 (Yugo 2).

En la Figura 3.3 se observan los valores obtenidos para el valor RMS y sus valores medios (líneas horizontales) en cada zona, variando la posición del yugo cada 2 cm: a) Chapa 1, b) Chapa 2.

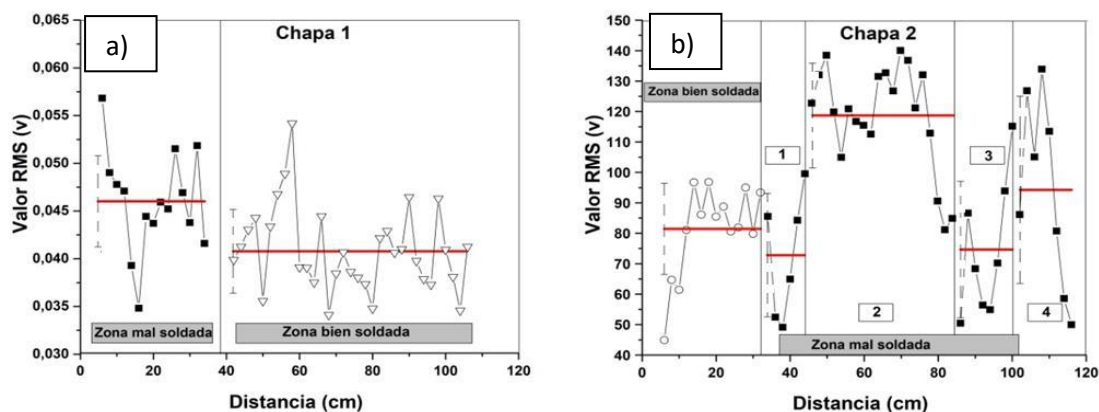


Figura 3.3. Gráfico de los valores del Máximo, campo magnético de excitación transversal al cordón de soldadura. a) Chapa 1 (Yugo 1), b) Chapa 2 (Yugo 2).

De las Figuras 3.1 a 3.2 se ve que en general, excepto en las estrechas zonas 1 y 3 de la Chapa 2, todos los parámetros dan valores más altos en las zonas “mal” soldadas. Debe tenerse en cuenta que en las zonas 1 y 3, su contribución al análisis estadístico es menor, ya que ambas aportan menor cantidad de datos, y además influyen allí los efectos de las indefiniciones en la transición entre las regiones.

4.2 Segundos ensayos

Se registraron las señales magnéticas con las mismas condiciones del ensayo anterior (dos ciclos completos de excitación del campo magnético externo). Las mediciones se realizaron cada 1 cm, (10 repeticiones por cada posición), con el campo magnético generado transversalmente al cordón soldadura. Con el yugo de la UTN (Yugo 2), se midió desde los 40 cm a 110 cm (zona donde

se observa mayor diferencia visualmente), debido a que los archivos eran muy pesados porque también se medía la Emisión Magneto Acústica (EMA). No se presentan los resultados de la EMA porque no se observó ninguna tendencia. La frecuencia de sampleo es de 2.5 MSamples/s.

En la misma chapa con un yugo de dimensiones menores que el anterior (Yugo 3) perteneciente al Proyecto ICES de la CNEA. Se hizo un barrido de todo el cordón de soldadura cada 1 cm, exceptuando los extremos de la chapa para evitar los efectos de borde. La frecuencia de sampleo es de 500 Hz/s, menor al ensayo anterior porque solo se midió el Ruido Magnético Barkhausen (RMB). Se realizó el mismo análisis de la muestra anterior. Se filtraron las señales con un filtro pasabanda de tipo Butterworth con una banda pasante de (5 a 200) kHz de tipo Butterworth de 4° orden. A partir de las señales filtradas se calculó el máximo de la señal y el valor RMS. En la Figura 3.4 se observan los valores obtenidos para el valor RMS y sus valores medios (líneas horizontales) en cada zona, variando la posición del yugo cada 1 cm: a) yugo UTN, b) yugo CNEA, chapa 2.

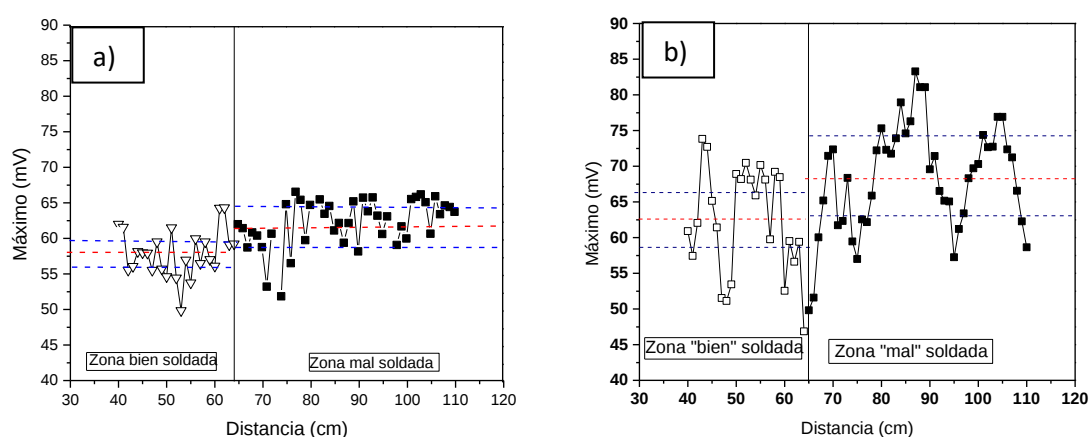


Figura 3.4. Chapa 2, valores Máximos de RMB, ampo magnético de excitación transversal al cordón de soldadura, a) Yugo 2 (UTN) y b) Yugo 3 (CNEA).

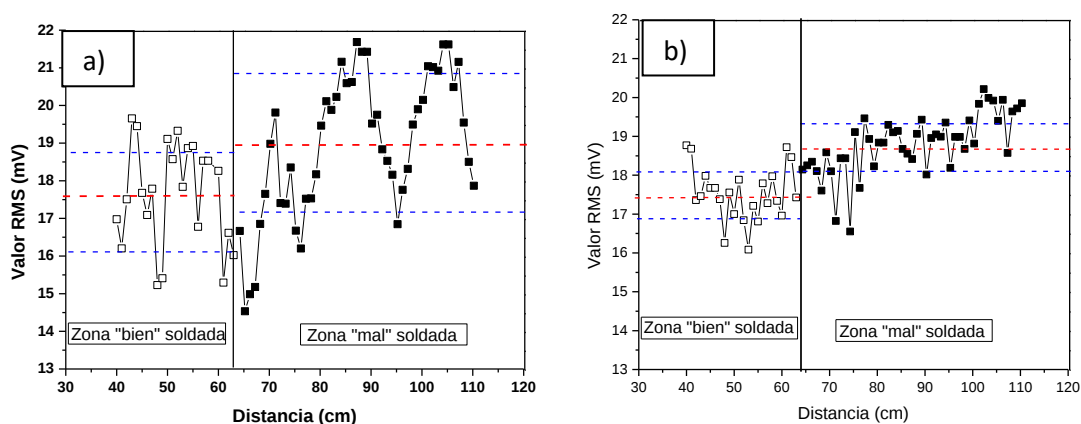


Figura 3.5. Chapa 2, valores RMS, ampo magnético de excitación transversal al cordón de soldadura, a) Yugo 2 (UTN) y b) Yugo 3 (CNEA).

Para las mediciones de RMB realizadas con el yugo colocado perpendicularmente al cordón de soldadura, se pueden observar en la parte a) de las Figuras 3.2 al 3.5, Se observaron valores medios de RMB mayores en la zona “mal” soldada, respecto a la zona “bien” soldada. Esto se podría deber a que en las zonas en donde el cordón era más angosto por falta de fusión (“mal” soldada), la bobina sensora del RMB tomaba simultáneamente información de la región soldada y del material original de la chapa. Probablemente esto contribuyó también a la dispersión de los valores RMS obtenidos durante las mediciones [Da Silva Jr. S. F., et al., 2014; Neyra Astudillo M. R. et. al, 2017, 2018; Saa Daniel, et al., 2017].

El RMB se produce por la interacción entre las paredes de dominio magnético, que se mueven durante el proceso de magnetización, y los defectos microestructurales que actúan como barreras al movimiento de las paredes de dominio. Por lo tanto, las señales de RMB son sensibles a los cambios microestructurales en la unión soldada [Jiles D., 1995, Lindgren M., et al., 2002].

En el análisis metalografico se observa una variación del grano desde la zona de fusión hasta la zona no afectada por el calor. En la zona de fusión se observa heterogeneidad de la microestructura junto a la línea de fusión, en la región de grano grueso con microestructura acicular. Mas alejado del centro del cordón, hay variación de la morfología de la microestructura, que se vuelve poligonal y también presenta grano mas fino. Al final de la ZAT, en el metal base, el grano es mas grueso (ver Figura 2.7).

En las muestras el defecto que se observa es la falta de fusión en esta zona el yugo del RMB en sus mediciones toma información de la zona soldada y de la zona no afectada probablemente esto se deba el aumento del RMB en la zona mal soldada. En esta zona hay una variación de del tamaño de grano con mayor cantidad de granos gruesos presentando una gran cantidad de paredes de los dominios. Además, presenta puntos de anclaje como poros y tensiones residuales (ver Figura 2.4) producidas por el maquinado posterior al proceso de soldadura [C. P. Serna Giraldo et al., 2007; Kaleli T. et al. 2016]

En la zona “bien” soldada el sensor RMB solo recoge información de la zona soldada. En esta zona bien soldada hay una disminución del RMB se podría también deber a que en esta zona hay una gran cantidad de granos finos presentando una gran cantidad de paredes de los dominios magnéticos, además de que hay menos puntos de anclaje que impidan su movimiento [C. P. Serna Giraldo et al., 2007; Kaleli T. et al. 2016].

5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este estudio es determinar si la técnica Ruido Magnético Barkhausen es un método mediante una Prueba No Destructiva para el control de calidad de la soldadura. El objetivo es recomendar esta técnica que se puede adoptar por la industria para identificar las zonas “mal” (OK) y “bien” (NO OK) soldada en un cordón de soldadura. El fenómeno Barkhausen puede dar información por la interacción entre las configuraciones de esfuerzos de las paredes de dominios magnéticos ó la composición microestructural. Se presentan los primeros estudios en tres chapas medidas con diferentes campos de excitación y en dos Laboratorios diferentes. En las tres chapas se observó mayor actividad de RMB en las zonas definidas por el operador como “mal” soldadas respecto de las “bien” soldadas. Esto demuestra la potencialidad de la aplicación de la técnica de RMB para el control de uniones soldadas y al mismo tiempo la versatilidad de los sistemas de medición empleados en los diferentes ensayos.

La orientación del campo de excitación influye en los resultados. Se midió el RMB con el campo de excitación en el sentido longitudinal y perpendicular al cordón de soldadura, se observó mejores resultados en el sentido perpendicular. Probablemente porque en las chapas estudiadas se ven líneas perpendiculares, paralelas entre sí y separadas por unos pocos mm. Fueron producidas por el maquinado posterior al proceso de soldadura y allí se incrementaron las tensiones residuales. Este efecto produjo un aumento en la respuesta del RMB para el caso de la excitación con el campo magnético perpendicular al cordón. Por esta razón, en este Trabajo sólo se analiza los ensayos bajo esta condición.

Las dimensiones del yugo magnético excitador no influyen en la tendencia de los resultados. Esto se observó en los resultados de las tres chapas medidas con diferentes yugos de diferentes tamaños.

Este estudio alienta a investigar con mayor profundidad esta técnica para la detección de cambios microestructurales que suceden en la soldadura, ya que este proceso puede presentar diferentes defectos en su microestructura, tales como: poros, tensiones residuales.

6. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

C. P. Serna Giraldo, L. Rodrigues Padovese, 'The magnetic Barkhausen noise: A NDT method for microstructural monitoring of welded join'. Scientia et Technica Año XIII, No 36, Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 525, 2007.

C. P. Serna-Giraldo, L. R. Padovese, "El ruido magnético de Barkhausen: un método de END para monitorear microestructuras en uniones soldadas", Scientia et Technica Año XIII, No 36, 525-530, 2007.

Cullity B. D., Introduction to Magnetic Materials, Universidad of Notre Dame, 1972.

Da Silva Jr. S. F., Da Silva R. F., M. C. Oliveira, 'Estudo da Distribuição de Tensões Residuais em uma Junta Soldada De Aço USI–SAC–350 Pela Análise do Ruído Magnético Barkhausen', 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, MT, Brasil, 2014.

Gómez M. P., Estudio de las Señales de Emision Acustica Generadas en el Corte de Metales. Aplicación a Procesos de Taladrado, Tesis de Doctorado, IT Sabato, UNSAM CNEA, 2011.

Gómez M. P., Fundamentos de la Emisión Acústica, 2015.

Jiles D., "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", Chapman and Hall, 1995.

Kaleli T., C. Hakan Gür, 'Non-Destructive Determination of Residual Stresses in the Spiral Submerged Arc Welded Steel Pipes', 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016.

Lindgren M., Lepsito T., 'Application of Barkhausen noise to biaxial residual stress measurements in welded steel tubes', Materials Science and Technology, Vol 18, 1369-1372, 2002.

Loayza Pérez J., Importancia y nuevos retos de la soldadura en aplicaciones industriales, ISSN 19006241, No 175, 2016.

Mikell P. Groover," Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems" ,4th edition, JOHN WILEY & SONS, INC.,2010.

Neyra Astudillo M. R., "Caracterización de Materiales con Técnicas de Ruido Magnético Barkhausen y Emisión Magneto Acústica", Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología, Mención Materiales, Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín-Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 2018.

Neyra Astudillo M. R., Burroni L., López Pumarega M. I., Caballero A., Ruzzante J. y Chiapparoli W., Gomez M., Caracterización no destructiva en uniones soldadas, Actas del 11avo Congreso Regional de Ensayos No Destructivos Estructurales, CORENDE, ISBN 978-987-23957-9-7, Neuquén, Argentina, 04 al 06 de octubre del 2017.

Neyra Astudillo M. R., Burroni L., López Pumarega M. I., Caballero A., Ruzzante J. y Chiapparoli W., "Análisis de Emisión Acústica en un Cordón de Soldadura", "Actas del 9° Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, E GLEA 9", ISSN: 978-987-1323-60-9, Misiones, Argentina, 29 al 31 de agosto de 2017.

Neyra Astudillo M. R., Burroni L., López Pumarega M. I., Gómez M., Ruzzante J. y Chiapparoli W., "Caracterización magnética de un cordón de soldadura", Actas de Resúmenes extendidos en el 18° Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAM - CONAMET 2018, San Carlos de Bariloche, Argentina, 01 al 05 de octubre del 2018.

Saa Daniel, Estudio de un Cordón de Soldadura Mediante Fuentes Simuladas de Emisión Acústica, Tesis de grado, Universidad Tres de Febrero, 2020.

Saa Daniel, Miriam R. Neyra Astudillo, María Isabel López Pumarega, Jose Ruzzante, Wadi Chiapparoli, "Estudio de un Cordón de Soldadura mediante Fuentes Simuladas de Emisión Acústica", a publicarse en "Actas del 9° "Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, E GLEA 9", Misiones, Argentina, 29 al 31 de agosto de 2017.

Stefanita, C. G., *From Bulk to Nano, the many sides of Magnetism*, Springer, ISBN 978-3-540-70547-5, 2008.

Takahashi S. Standardization of Magnetic NDE for Ferromagnetic Steels, Material Properties Measurement, JRC-NDE 2009; Proceedings of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components; Yokohama, Japan. 12–15 May 2009.

Tomkowski R. Sorsa A, Suvi Santa-aho, Per Lundin, and Minnamari Vippola, Statistical Evaluation of Barkhausen Noise Testing (BNT) for Ground Samples, doi: 10.3390/s19214716, Sensors (Basel), 19(21): 4716, 2019.

Vaidyanathan S. M. V., Jayakumar T. & Baldev Raj, 'Evaluation of post-weld heat treatment in 2.25Cr–1Mo steel tube to tube sheet welded joints using magnetic Barkhausen noise measurements', Materials Science and Technology, 1997.

Veca C. Angel, Ultrasonido y Emisión Acústica para estudiantes de ingeniería, ISBN: 978-987-86-3199-8, publicado por el Departamento de Electrónica y Automática, Facultad de Ingeniería, UNSJ, 2019.

7. TRABAJOS FUTUROS

Con respecto al análisis y estudio de los procesos de soldadura realizados en materiales de acero al C, se pueden realizar los siguientes trabajos futuros:

- Terminar de implementación de un Sistema de Gestión de Calidad en el Laboratorio y los requisitos que especifica la ISO 17025.
- Estudiar la microestructura de las chapas para poder caracterizarla y conocer sus propiedades.
- Analizar fallas en la soldadura en muestras en las que el tipo de defecto sea homogéneo para toda la zona y comparar los resultados del RMB de esta zona con una libre de defectos. A su vez, se puede realizar los ensayos con el mismo método empleado en este Trabajo y con otro para poder contrastar resultados.
- Analizar distintas fallas de soldaduras en chapas de acero al C y comparar resultados entre sí, con el fin de poder encontrar una correlación del RMB y el tipo de falla en la soldadura. Realizando también los ensayos con el mismo método empleado en este Trabajo y con otro para poder confrontar resultados.
- Posteriormente si la técnica de RMB puede diferenciar las zonas “bien” y “mal” soldada en un cordón de soldadura se podría validar el procedimiento de medición.