

Caracterización de discontinuidades reales en un tubo de acero inoxidable AISI 304L utilizando Corrientes inducidas, Radiografía Industrial y Análisis Metalográfico.

Alba Obrutsky, César Acosta, José Scopelliti, Jorge Méndez, Pablo Penas
Asistencia Tecnológica en Ensayos No Destructivos (INEND) Unidad de Actividad
Ensayos No Destructivos y Estructurales (ENDE) - Centro Atómico Constituyentes -
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)
Av. Gral. Paz y Av. de los Constituyentes - (1650) Pcia. de Buenos Aires - Argentina
email: obrutsky@cnea.gov.ar

Resumen

Este trabajo está orientado a la caracterización de discontinuidades encontradas durante una inspección en servicio por Corrientes Inducidas (CI) en tubos rectos con costura de acero inoxidable AISI 304L, del condensador de vapor de una central termoeléctrica.

Este tipo de componente generalmente presenta distintos tipos de defectos en las paredes internas o externas de los tubos debido, al proceso de fabricación o a su degradación en servicio por problemas de corrosión, erosión “pitting”, “fretting”, fatiga, etc.

En el análisis de señales por CI realizada durante la inspección se observaron indicaciones que presentaban una importante disminución del espesor de pared, donde el análisis de fase determinó la presencia de defectología externa.

Se decidió la extracción de un tubo que presentaba varias indicaciones, para su caracterización y verificación dimensional utilizando otros métodos de ensayo.

Mediante examen visual se verificó que el tubo no presentaba discontinuidades externas, sólo se observaron algunas manchas de óxido coincidentes con la soldadura y la zona adyacente a la misma.

En la reinspección por CI, del tubo extraído se verificó la ubicación de las señales a lo largo de todo el tubo. Mediante el ensayo de Radiografía Industrial (RI), con Rayos X, se determinó la presencia de las discontinuidades halladas por CI, y su evaluación proporcionó información del tipo, forma y ubicación dentro del tramo en estudio. Posteriormente los datos fueron utilizados para la ejecución de los análisis metalográficos que determinaron su caracterización.

Finalmente, el objetivo principal de este trabajo es aportar experiencia para el análisis de datos de CI y caracterizar el tipo de discontinuidades que pueden encontrarse en determinados materiales y procesos de fabricación asociados, en tubos de intercambiadores de calor.

1 Introducción

Este tipo de componentes generalmente presenta distintas indicaciones de defectos en las paredes internas o externas de los tubos debido, al proceso de fabricación o a su degradación en servicio por problemas de corrosión, erosión, “pitting”, “fretting”, fatiga, etc.

Este trabajo está orientado a la caracterización de un tipo de indicación encontrada durante una inspección en servicio por CI en tubos rectos con costura de acero inoxidable AISI 304L. La finalidad es aportar experiencia al analista de CI en la evaluación de señales de este tipo de indicaciones.

Para el estudio de estos defectos se decidió la extracción de un tubo que presentaba defectología de interés. Para la caracterización de los defectos se utilizaron los métodos de ensayo no destructivos, CI y RI con rayos X que fue aplicado en laboratorio.

Para identificar los defectos encontrados mediante las técnicas de ensayos no destructivos se realizó la inspección visual en la superficie exterior y luego se procedió a cortarlo en media caña para observar la superficie interna y así establecer que tipo de defectos internos se estaban generando. Para tener una visión más amplia de los mismos se tomaron macrofotografías mediante una lupa estereoscópica e imágenes tridimensionales con el microscopio electrónico de barrido (SEM)

2 Desarrollo

Los requerimientos de Inspección programada en los tubos de Condensadores de Vapor y los problemas que comenzaron a manifestarse durante su operación en servicio, una central termoeléctrica decidió realizar la inspección por CI del componente.

En una primera intervención se realizó la inspección de una cantidad de tubos equivalente a un muestreo de aproximadamente un 2% del total. En el análisis de datos se informaron señales que se comportaban como indicaciones de defectos de baja amplitud pero cuya fase indicaba un alto porcentaje de disminución del espesor de pared.

Las indicaciones no se manifestaban como desgaste generalizado de la pared de los tubos sino como defectos puntuales tipo “pitting”.

El análisis de fase de las señales llevó a clasificar a las indicaciones como defectología externa en tanto su comportamiento no era estrictamente similar al comportamiento de las señales de los defectos externos del patrón de calibración. La diferencia notable fue la poca variación del ángulo de la pendiente de las señales reales, en las distintas frecuencias.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en la primera inspección se realizó una segunda revisión de los mismos tubos para verificar el grado de avance de la degradación.

A partir de esta última inspección se confirmó que el avance de la defectología era significativo en cantidad de indicaciones registradas, mientras que la fase de las señales seguía sin variación.

Planteado así el problema se solicitó la extracción de un tubo para poder realizar la caracterización de la defectología y de esta manera estudiar la forma y ubicación de los defectos y aportar esta experiencia al análisis de señales con similar comportamiento.

2.1 Experiencias Realizadas

Características de la muestra en estudio, parámetros y procedimientos de ensayo.

2.1.1 Características de la muestra

El tubo extraído fue fraccionado en diez tramos para proceder a su estudio. Los tramos fueron identificados del 1 al 10 indicando el inicio y final de los mismos siguiendo el sentido del flujo de agua del componente en operación.

El tramo 1 corresponde a la zona de tubo comprendida entre la Placa Tubo Entrada de agua (PTE) y la Placa Soporte 15 (P15), mientras que el tramo 10 es la zona de tubo entre la Placa Soporte 1 (P1) y la Placa Tubo Salida de Agua (PTSA)

Se decidió realizar los estudios sobre el tramo 10 ya que fue el que presentó mayor cantidad y variedad de indicaciones durante la inspección. En la Tabla 1 se presentan las características principales del tubo ensayado y en la Tabla 2 se muestran datos relacionados con el condensador de vapor.

Tabla 1. Datos del tubo

Material	AISI 304 L
Diámetro Externo	25,4mm
Espesor de pared nominal	0,72 mm
Longitud	14000 mm
Configuración	rectos con costura

Tabla2. Datos del condensador de vapor

Configuración	Dos cuerpos de doble circulación
Condensado (primario – lado exterior de los tubos)	Agua tratada
Enfriador (secundario – lado interior de los tubos)	Agua de río
Cantidad de Placas Tubo (PTS – PTE)	2
Cantidad de placas soporte	15

2.1.2 Ensayo por CI

Para realizar el ensayo fue utilizado un equipo de CI Multifrecuencia TEDDY8B y se emplearon sondas del tipo circunferencial diferencial interna (Figura1)

Como patrón de calibración se utilizó un tubo de similares características a los tubos instalados en el condensador. En la Tabla 3 se detallan las características de defectos artificiales del patrón de calibración utilizado:

Tabla 3. Defectos de patrón de calibración

Cant.	Descripción	Dimensiones	% de disminución del espesor
1	ranura interna	Circunf. concéntrica	30
4	agujeros pasantes a 90°	Ø 0,65mm	100
1	agujero pasante	Ø1,25mm	100
1	agujeros de fondo plano	Ø2,5mm	88
1	agujeros de fondo plano	Ø3mm	64
1	agujeros de fondo plano	Ø3,5mm	47
4	agujeros de fondo plano	Ø4,5mm	17
1	ranura externa	Circunf. concéntrica	21

Las frecuencias utilizadas para el ensayo fueron: 100, 200, 400 y 600 KHz. El ensayo fue realizado empleando las cuatro frecuencias de ensayo multiplexadas en modo diferencial. Fue adoptada la frecuencia de 600 KHz. como frecuencia de trabajo. De acuerdo al procedimiento de calibración utilizado se ajustó la falla del 100% de disminución del espesor de pared (agujero pasante) a 40° de fase para todas las frecuencias y se asignó una amplitud de 10V pico a pico al canal de 600kHz. La amplitud en los demás canales mantiene relación con el canal de 600kHz. Para caracterizar los defectos con CI se eligió el tramo de tubo conveniente para comenzar el estudio en aquel que presentaba la mayor concentración de indicaciones y aquellas señales que manifiestan comportamiento como el anteriormente descrito.

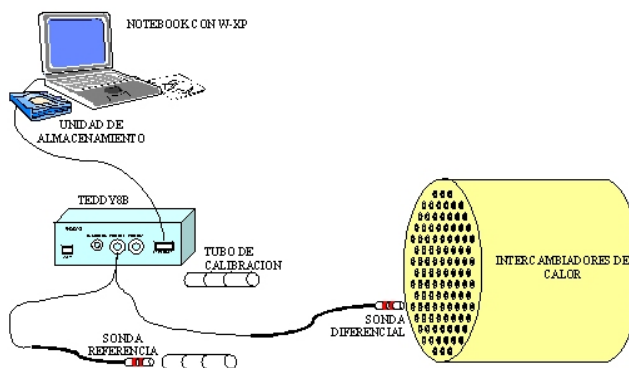


Figura 1. Sistema de adquisición de datos para tubos no ferromagnéticos

2.1.3 Radiografía (Rayos X)

Para la realización del ensayo radiográfico se trabajó con un equipo Phillips de 160KVC de potencial constante y película Structurix D4 (Clase 1 ASTM) sin pantallas. Para el control de la calidad de Imagen se utilizó un indicador de calidad de imagen del tipo de hilos según Norma ASTM-E-747 SET 1A ubicado del lado fuente. Los cálculos de exposición fueron realizados para una Densidad radiográfica igual a 2 y se utilizó la técnica de Doble pared-doble imagen superpuesta según los requerimientos del Código ASME V Art. 2, teniendo la precaución de posicionar siempre el cordón de soldadura en contacto con la película. Los parámetros de ensayo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del ensayo radiográfico

Distancia foco – film	70cm
Potencial	60kV
Corriente	5mA
Tiempo de exposición	4minutos

El examen radiográfico permitió determinar la ubicación, forma y tipo de defecto en el material.

2.1.4 Inspección Visual

Previo a la Inspección Visual, se lavaron con agua y cepillo plástico la superficie interna y externa de los tramos para quitar manchas y depósitos de barro, propios de la operación normal de estos tubos.

La inspección visual de los tramos se realizó teniendo como datos la ubicación de los

defectos por medio de los ensayos anteriores.

Cuando se estableció la disposición de los defectos se procedió a cortar transversalmente el tramo en estudio en trozos pequeños (de 25 a 30cm), y estos a su vez en forma longitudinal para la observación de la superficie interna.

Acorde a los resultados de los ensayos se decidió realizar macrofotografías y registros tridimensionales con microscopía electrónica de barrido SEM.

2.2 Resultados Obtenidos

2.2.1 Señales de CI

Señal del agujero pasante del patrón ajustado a 40° en todos los canales. (Figura 2)

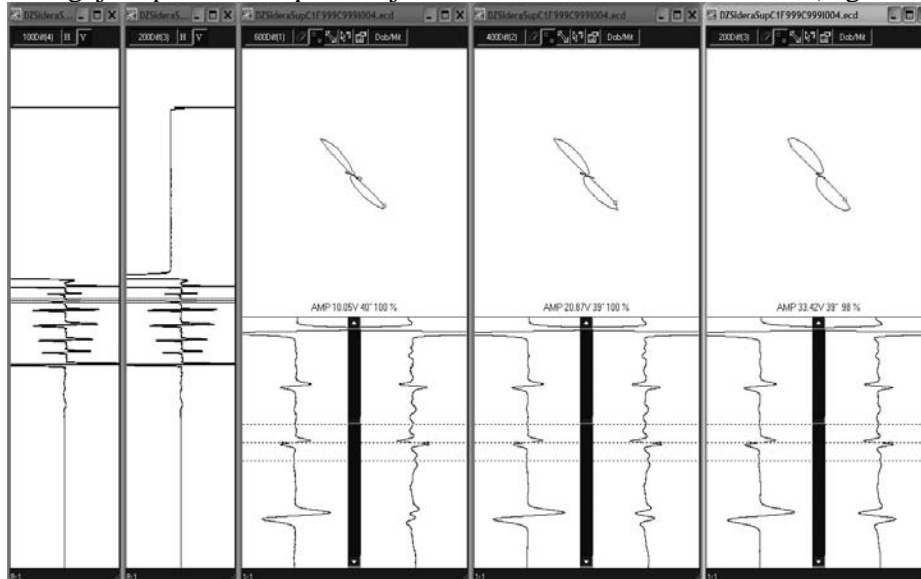


Figura 2. Señal del patrón de calibración, en particular del defecto del 100%.

El sistema de evaluación de señales de CI requiere de la construcción de una curva sobre la cual se puede establecer el porcentaje de disminución del espesor de pared a partir del ángulo de la pendiente de las señales analizadas. Esta curva se conoce como curva de calibración ángulo – profundidad porcentual. Esta se traza a partir de los defectos del 100%, 65% y del 20% y los ángulos de las pendientes de las señales debidas a estos defectos. La Figura 3 muestra la curva trazada para el canal de 600kHz.

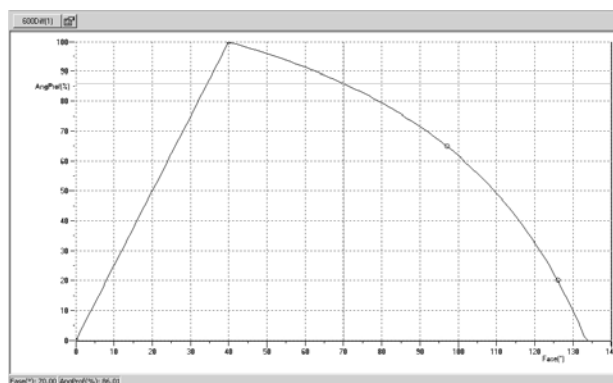


Figura 3 Curva de calibración para 600 KHz.

En el ensayo por CI del tubo extraído, se analizaron señales que indicaban la presencia de defecto y cuyo comportamiento no era como las correspondientes al tubo patrón. La variación de la fase de la señal del defecto del 80% de disminución del espesor de pared del tubo patrón en las distintas frecuencias entre 200 y 600kHz muestran una diferencia de fase de 29° (Figura 4)

En el tramo de tubo ensayado se puede ver gran concentración de defectos y se muestra un defecto que en el canal de lectura presenta una disminución del espesor similar a la del defecto patrón del 80%. Sin embargo, la diferencia de fase entre los canales de 200 y 600kHz no supera los 13° (Figura 5).

Este hecho se manifestó en la generalidad de las indicaciones halladas lo que permite determinar que este tipo de defectos no resulta ser un defecto externo clásico sino que la defectología se ve afectada por otra componente que requería análisis adicionales.

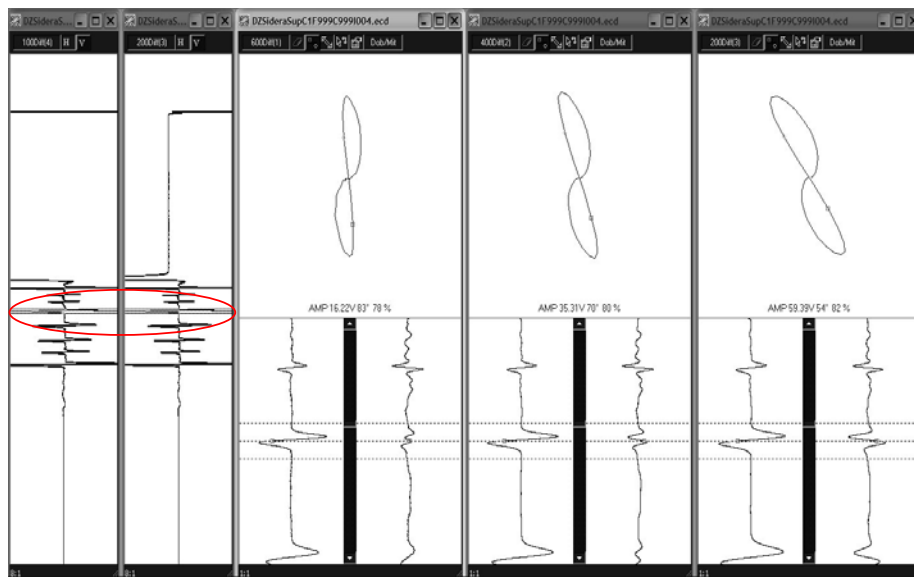


Figura 4. Señal de defecto del patrón del 80%.

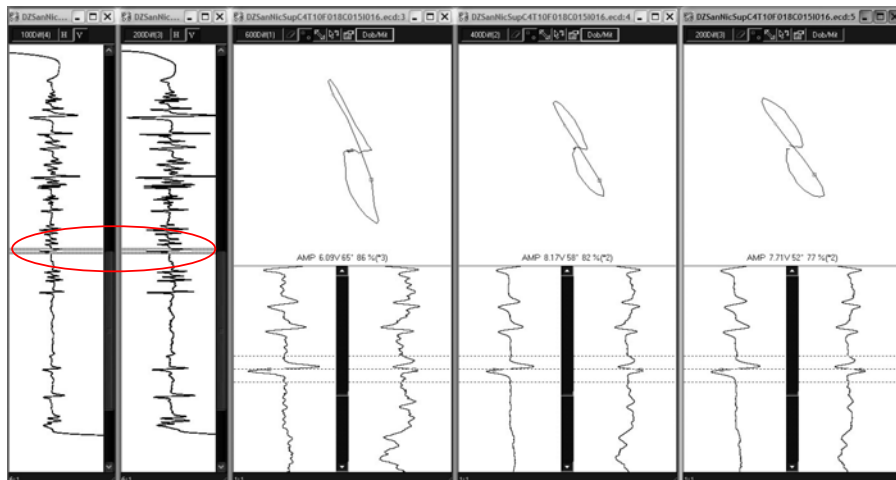


Figura 5. Señal de CI del tramo estudiado.

2.2.2 Radiografía

En el examen radiográfico se verificó la presencia de indicaciones que confirman lo registrado por CI. Debido a que el ensayo de CI con bobina interna integra la información de toda la circunferencia del tubo no se podía definir la ubicación de los defectos en la circunferencia. La radiografía obtenida del trozo identificado como 10A permitió definir que la defectología se situaba preferentemente sobre el cordón de soldadura y sobre la zona afectada térmicamente ZAT (Figura 6), también se registraron algunos defectos adyacentes al cordón.

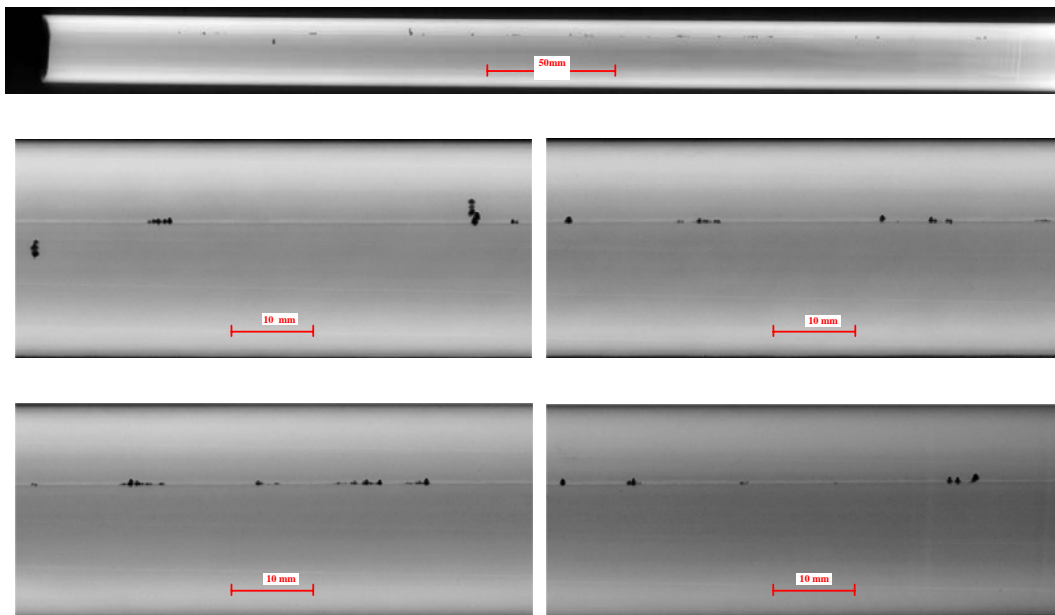


Figura 6. Radiografía del trozo de tubo identificado como 10A y detalles ampliados

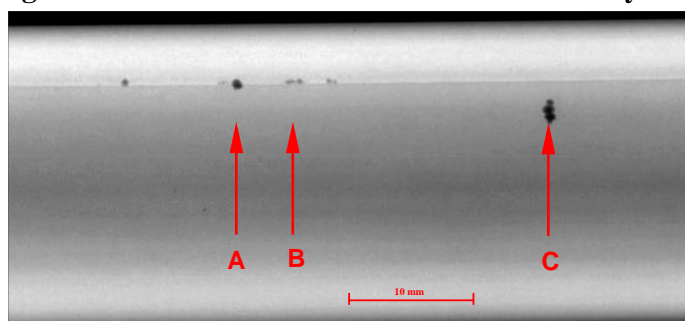


Figura 7. Detalle ampliado de los defectos A, B y C vistos con la radiografía.

Se puede ver la forma redondeada de la defectología y la disposición de la mayoría de las indicaciones alineadas con el cordón de soldadura y en la ZAT. Se observan algunas indicaciones que no cumplen con la ubicación anteriormente mencionada. (Figura 7).

2.2.3 Inspección visual

Los resultados del ensayo visual mostraron algunas conclusiones como las que se enuncian a continuación:

La superficie externa no presentó signos de defectología, sin embargo, en las zonas donde se ubicaban los defectos se pudieron observar manchas de óxido de hierro.

En la superficie interna del tubo se manifestó la presencia de defectos con forma preferentemente circular y de área reducida y otros a lo largo del cordón de soldadura

Se cortaron tres trozos del tramo 10 A y se identificaron los defectos encontrados como A, B y C para individualizarlos y fotografiarlos con una cámara digital (Figura 8) con lupa de bajo aumento (Figura 9) y con fotografías tridimensionales tomadas con el microscopio electrónico de barrido SEM (Figura 10)



Figura 8. Tramos iniciales del tubo defectos identificados como A, B y C

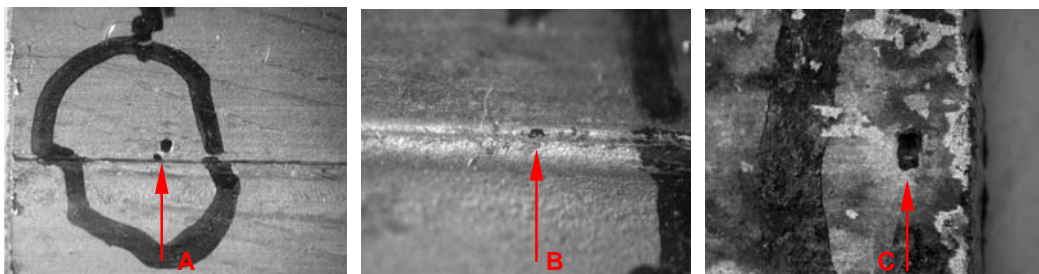
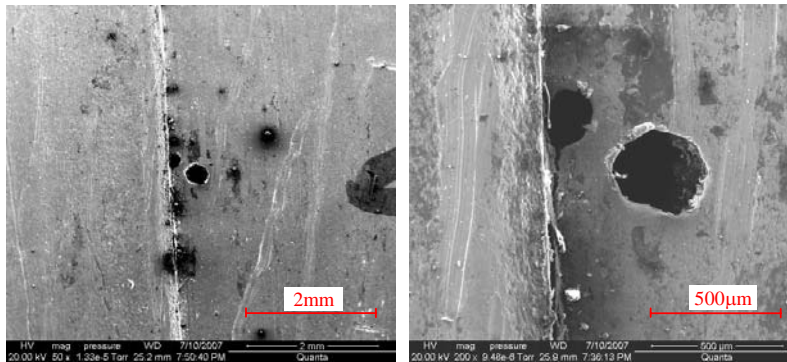
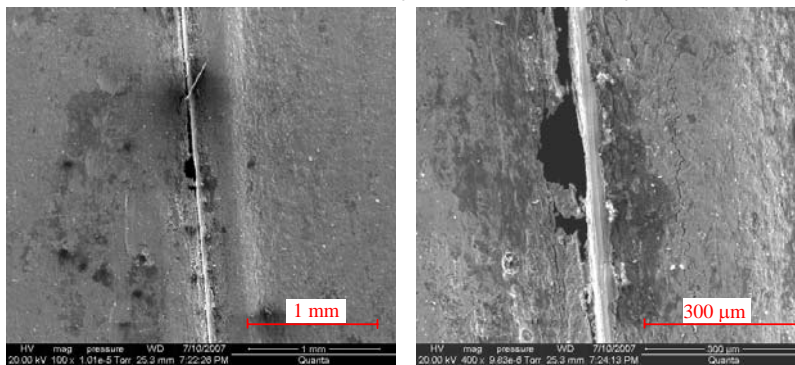


Figura 9 Macrografías tomadas con lupa de 4 a 20 aumentos

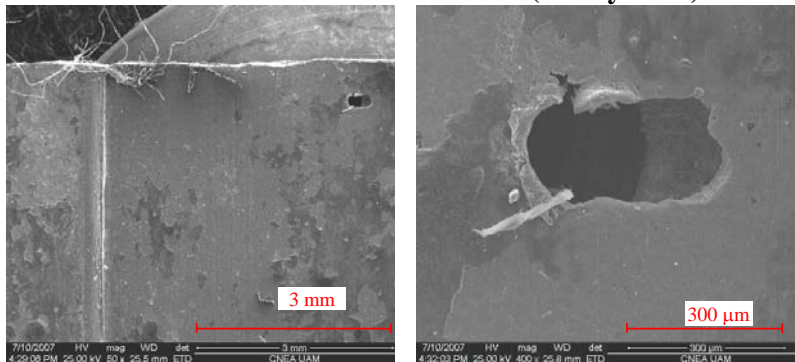
MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO SEM



Defecto A, en el cordón y en la ZAT (50x y 200x)



Defecto B. Defectos en el cordón (100x y 400x)

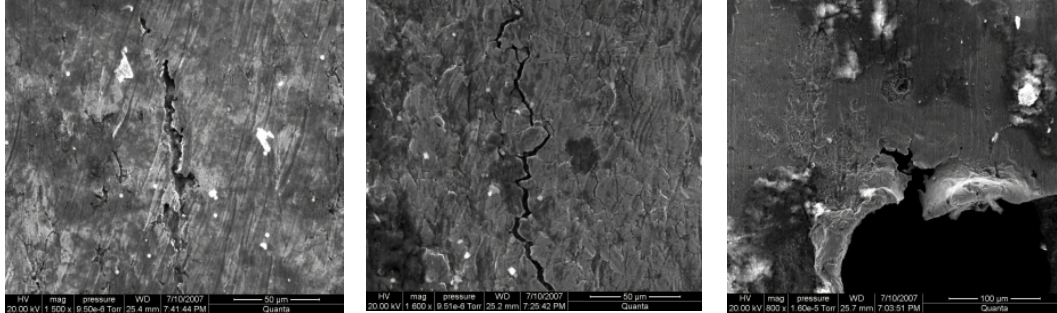


Defecto C. Defectos alejados del cordón (100x y 400x)

Figura 10. Detalles y ubicación de los defectos A, B y C tomados con el SEM

En la imagen del Defecto “A” se observa la presencia de dos defectos ubicados sobre el cordón de soldadura y sobre la ZAT. En la fotografía con 200x se visualiza la presencia de una fisura que continua en el cordón de soldadura. En el defecto “B” se puede observar que los defectos se encuentran sobre el cordón de soldadura pero con 400x podemos decir que además hay una fisura en la ZAT. El agujero “C” se encuentra alejado de la zona de influencia de la soldadura (cordón y ZAT) sin embargo aparece en la imagen con altos aumentos la evidencia que se trata de un defecto profundo y en el cual se inicia una fisura.

En los estudios realizados con el SEM se pudo visualizar tomando fotografías con aumentos del orden de los 1500x, la presencia de algunas fisuras que se originaron en el cordón de soldadura y otras tanto en borde de grano, intergranulares, como transgranulares. (Figura 11)



A: transgranular

B: intergranular

**C: Origen en el defecto
alejado del cordón de
soldadura**

Figura 11 Fisuras

3 Discusión y conclusiones

En el ensayo por CI se encontraron indicaciones que en la evaluación primaria fueron informadas como defectología externa. Luego, el análisis más minucioso de la fase de éstas señales mostró que su ángulo no seguía el comportamiento de las señales de patrón.

La discusión que surge es la siguiente: al realizar la evaluación debemos justificar lo informado, suponiendo que las indicaciones encontradas puedan haber sido producto de otras variables. La limitación de la técnica y la combinación de defectos que presentan indicaciones con esta particularidad puede analizarse como indicaciones con fase de defecto externo.

Todas las respuestas se han encontrado después de haber sometido los tubos a estudios que complementan lo informado por CI. En la radiografía se pudo observar que la mayoría de las indicaciones están alineadas en el cordón de soldadura y que tienen la morfología de poros. Con la inspección visual se pudo asegurar que los defectos tienen su origen desde la parte interior de los tubos y que no son pasantes.

Los defectos son producto de algún fenómeno que tiene su inicio desde la pared interna y continúa su desarrollo hacia la matriz del material, defecto subsuperficial, sin que atraviese totalmente el espesor.

Precisamente en este caso como el defecto se origina en la pared interna del tubo, y la cavidad subsuperficial es mucho mayor que la de la superficie interna, por lo tanto en la señal de CI, presenta preferencia en la señal resultante, afectando la fase y la amplitud, comportándose como defecto externo.

Esta circunstancia podría entenderse como una limitación de la técnica pero el conocimiento del problema permite encontrar las respuestas al analizar el comportamiento de la fase de las señales.

La realización de estos estudios complementarios resulta de interés, porque ha sido de gran utilidad para caracterizar ese tipo de defectos y contribuir, con este trabajo como referencia en futuras inspecciones.

Como conclusión se puede confirmar que los resultados que se han obtenido servirán para contribuir en el análisis de señales de CI y conocer el tipo de discontinuidades que pueden encontrarse en intercambiadores de calor con tubos de acero inoxidable AISI 304L.

Esta previsto continuar con el estudio metalúrgico del material, documentar la morfología del defecto subsuperficial y hacer un análisis de composición del material en el cordón de soldadura, en la zona afectada térmicamente y en el material base del tubo con el propósito de verificar si hay alguna relación en el comportamiento de fase de las señales de Corrientes Inducidas.

4 Referencias

Normas de calificación y Certificación de Operadores de END, IRAM-ISO 9712.

Metal Handbook .Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals Vol 3.

A. Obrutsky, J. Scopelliti, J. Méndez, C.Acosta. Análisis de señales de corrientes inducidas producidas por daños por corrosión en tubos de acero inoxidable AISI 304 de intercambiadores de refrigeración de motores diesel. CORENDE Mendoza (Octubre 1997)

C.Acosta A. Obrutsky, J. Scopelliti, J. Méndez, Instrucción de ensayo: Adquisición de datos con bobina interna en tubos no ferromagnéticos de intercambiadores utilizando el equipo de CI Multifrecuencia TEDDY8B. IT-13-E046IN/06 (ENDE 2006)

J. Méndez J. Scopelliti, C.Acosta, A. Obrutsky. Instrucción de ensayo: Evaluación de señales con bobina interna en tubos o ferromagnéticos de intercambiadores utilizando el equipo de CI Multifrecuencia TEDDY8B. IT-13-E047IN/06(ENDE 2006)

5 Agradecimientos

Al Laboratorio de Metalografía de la Unidad de Actividad Materiales del CAC. CNEA, por haber colaborado en la realización de este trabajo, brindando asesoramiento técnico, poniendo a disposición los laboratorios para el uso de los equipos e instalaciones para la toma de las fotografías con el SEM (Ramón Castillo Guerra y Ricardo Montero)

Al Grupo de Ingeniería e inspección de la planta termoeléctrica que colaboró con la extracción del tubo, del condensador de vapor, solicitado para la realización de los estudios no destructivos y destructivos.