

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
APLICADOS A UNIONES SOLDADAS POR EL PROCESO GMAW EN LÍNEA
DE CHASISES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

GILBERTO FUENTES VALDÉS

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA. ENERO 28 DEL 2011

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
APLICADOS A UNIONES SOLDADAS POR EL PROCESO GMAW EN LÍNEA
DE CHASISES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

GILBERTO FUENTES VALDÉS

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA. ENERO 28 DEL 2011

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS A UNIONES SOLDADAS POR EL PROCESO GMAW EN LÍNEA DE CHASISES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ”**, realizada por el alumno **GILBERTO FUENTES VALDES**, con número de matrícula **09ES-093** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

MC. Víctor Hugo López Cortez

Tutor Académico

Ing. Juan Francisco López Hernández

Tutor de Planta

Ing. Fernando Macías López

Asesor

Vo. Bo.

M.C Claudia A. González Rodríguez

Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **GILBERTO FUENTES VALDES**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS A UNIONES SOLDADAS POR EL PROCESO GMAW EN LÍNEA DE CHASISES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 28 días de Enero del 2011

Dr. Fidel Zapata Gómez

Presidente

**Dr. Felipe Arturo Reyes
Valdés**

Secretario

MC. Víctor Hugo López Cortez

Vocal

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su constante apoyo incondicional.

A mi hermano Eduardo y mí cuñada Liliana por su apoyo y comprensión durante mi formación profesional.

A mi novia Nadia por su apoyo a lo largo de mi formación como especialista.

A COMIMSA Y CONACYT por aportar sus recursos para mi formación.

Al M.C. Víctor Hugo López por sus apoyo para la elaboración de esta monografía.

ÍNDICE GENERAL

Síntesis.....	1
Capítulo 1 Introducción	
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivo general.....	3
1.2.1 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Planteamiento del problema.....	5
1.5 Aportación tecnológica.....	6
1.6 Alcance.....	7
Capítulo 2 Estado del arte	
2.1 Requerimientos para los componentes soldados por soldadura de arco en la industria automotriz.....	8
2.1.1 Requerimientos de calidad para inspección de soldadura.....	8
2.2 Evaluación no destructiva.....	12
2.2.1 Selección de métodos no destructivos.....	13
2.2.1.1 Detección y evaluación de fallas.....	14
2.2.1.2 Fallas volumétricas y planeares.....	15
2.2.1.3 Localización, forma y tamaño de fallas.....	16
2.2.1.4 Características para la selección de un método de inspección	18
2.2.2 Introducción a los métodos de evaluación no destructiva.....	21
2.2.2.1 Inspección visual.....	22
2.2.2.2 Líquidos penetrantes.....	23
2.2.2.3 Partículas magnéticas.....	24

2.2.2.4 Ultrasonido.....	25
2.2.2.5 Radiografía.....	28
2.2.2.6 Corrientes de Eddy.....	29
2.2.3 Métodos no destructivos utilizados en la industria automotriz.....	30
2.3 Ensayos no destructivos no convencionales.....	38
2.3.1 Inspección ultrasónica de soldaduras.....	38
2.3.1.1 Inspección de soldaduras con ondas guiadas.....	40
2.3.1.2 Inspección EMAT para soldaduras usando ondas guiadas...	41
2.3.1.3 Inspección de soldaduras de filete con EMAT.....	42
2.3.2 Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica de arreglo de fases.....	46
2.3.2.1 Tecnología arreglo de fases (phased array).....	46
2.3.2.2 Inspección de soldaduras mediante arreglo de fases.....	49
2.3.2.3 Evaluación de defectos de soldaduras a tope.....	50
2.3.2.4 Evaluación de defectos de soldaduras en t y en equina.....	51
2.3.3 Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica de pulso-eco	52
2.4 Inspección de soldadura mediante técnicas radiográficas.....	55
2.4.1 Inspección radiográfica en tiempo real.....	55
2.5 Técnicas avanzadas.....	57
2.5.1 Visualización ultrasónica laser.....	58
2.5.2 Tomografía computarizada industrial.....	63

Capítulo 3 Análisis y discusión bibliográfica

3.1 Ensayos no destructivos convencionales.....	70
3.2 Ensayos no destructivos no convencionales.....	70
3.2.1 Ensayos no destructivos ultrasónicos.....	70
3.2.2 Ensayos no destructivos tomográficos.....	71

Capítulo 4

Conclusiones.....	72
Referencias bibliográficas.....	73
Listado de tablas.....	75
Listado de figuras.....	76
Résumé autobiográfico	79

SÍNTESIS

Dentro de la industria automotriz existen normativas que requieren el aseguramiento de calidad de las juntas soldadas, las técnicas de ensayos no destructivos ofrecen una nueva alternativa para la inspección en este tipo de industria, las técnicas como ultrasonido o tomografía computarizada; mediante sus adelantos tecnológicos ofrecen una alternativa para la inspección y de esta forma evitar desperdicios de material e incertidumbre en los lotes de materiales representados por la inspección.

El análisis del estado del arte de estas técnicas durante el desarrollo de la presente indica tendencias en la industria hacia las técnicas no destructivas y se encontraron avances en las técnicas ultrasónicas y de radiografía que podrían dar solución a la inspección de las juntas soldadas y asegurar los requerimientos del cliente.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La industria automotriz actualmente se encuentra en un mercado que va creciendo en cuestión de marcas y calidad de los productos, las empresas que no llevan el ritmo en avance tecnológico y calidad, así como en eficientar sus procesos tienden a desaparecer paulatinamente. La introducción de ensayos no destructivos para la detección de fallas actualmente se encuentra limitada a discontinuidades superficiales abiertas a la superficie las cuales no dan una perspectiva correcta de las fallas que se encuentran internamente como lo puede ser la falta de penetración y fusión, que al ser el chasis un elemento mecánico que se encuentra sometido a esfuerzos cíclicos de fatiga puede llegar a fallar en ese punto primordial que son las soldaduras; las cuales son el método de unión más utilizado para la construcción del chasis, y arriesgar vidas y por consiguiente el prestigio de la línea.

Aplicando métodos no destructivos en line se podría agilizar el proceso y aumentar así la eficiencia y productividad de la empresa.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Estudio del estado del arte de los ensayos no destructivos que pueden ser utilizados para la inspección de soldaduras mediante métodos convencionales y no convencionales independientemente de las geometrías en soldaduras por GMAW aplicadas en líneas de chasis en la industria automotriz.

1.2.1 Objetivos específicos

- Determinar que son las técnicas de ensayos no destructivos y sus características
- Comparar los principios de las técnicas y las necesidades del proceso
- Hacer una búsqueda bibliográfica de las técnicas no convencionales de inspección
- Investigar el estado actual de los ensayos no destructivos convencionales en la industria automotriz
- Investigar el estado actual de los ensayos no destructivos no convencionales en la industria automotriz
- Recomendar alguna técnica de inspección no destructiva capaz de cumplir con los estándares establecidos por el cliente.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente el mercado de la industria automotriz cuenta con una gran cantidad de vehículos con chasis, principalmente en vehículos de carga, el mercado haciendo a aproximadamente 6,000,000 de vehículos anuales producidos por los cinco fabricantes principales de la región NAFTA: Chrysler, Nissan, Ford, GM y Toyota.

La participación de algunas empresas mexicanas es de 12%, lo que representa poco más de 720,000 unidades, la frecuencia de las pruebas destructivas que requiere el cliente fuera de línea es de un chasis por turno por línea de ensamble y por modelo de producto para asegurar la calidad de las uniones soldadas, lo que representa 600 estructuras destruidas para inspección por línea de ensamble y por modelo de producto, tomando el 2% de 720000 chasises, esto representa 14400 unidades que no salen al mercado, lo cual se traduce en millones de dólares en pérdidas por lo tanto es necesaria la implementación de una técnica no destructiva capaz de proporcionar los datos necesarios acerca de la calidad de la soldadura, que pueda ser aplicable en línea para evitar la destrucción de chasises funcionales y que proporcione la información necesaria acerca de la soldadura para el aseguramiento de la calidad requerida por el cliente.^[27]

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la industria automotriz está sujeta a una gran cantidad de normativas y sistemas de calidad para garantizar completa satisfacción al cliente con respecto a la calidad y seguridad del vehículo que se adquiere, una de estas es asegurar al cliente la integridad estructural de los vehículos por tal razón las armadoras exigen a sus proveedores garantizar las normativas que rigen dicha actividad, una de ellas es asegurar la penetración de la soldadura entre las partes soldadas.

Los proveedores de chasis actualmente realizan el proceso de inspección visualmente, mas esto no asegura la penetración, por lo cual se les exige realizar pruebas destructivas para asegurar la penetración especificada, estas pruebas implican una gran inversión monetaria en infraestructura y tiempo, pues la prueba requiere el corte del chasis en muchas secciones pues la mayoría de las uniones son soldadas además de que se tiene cierta incertidumbre acerca de la calidad de los chasis hasta no tener el resultado de las pruebas instantáneamente.

1.5 APORTACIÓN TECNOLÓGICA

Mediante la elaboración de esta monografía se podría realizar un análisis para determinar la técnica más adecuada para la inspección no destructiva de las soldaduras aportando con esto una herramienta de gran utilidad para la industria automotriz que podría aportar lo siguiente.

- Reducción de scrap por inspección de calidad
- Aumento a la productividad por reducción de tiempos de inspección
- Mejora en la calidad
- Satisfacción del cliente

1.6 ALCANCE

Estudio del estado del arte de ensayos no destructivos para uniones soldadas de filete en componentes estructurales de chasises para camioneta y camión soldados por el proceso GMAW en la industria automotriz.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 REQUERIMIENTOS PARA LOS COMPONENTES SOLDADOS POR SOLDADURA DE ARCO EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Este estándar PS-9472 describe los requerimientos para la soldadura de arco para todos los componentes automotrices fabricados de hojas de metal recubiertas o no recubiertas y otros materiales aprobados como materiales de unión para chasis y tren de poder.^[1]

2.1.1 Requerimientos de calidad para inspección de soldadura

Macroataque (evaluación destructiva)

a) Fusión de pierna y garganta

Soldaduras de menos de 300mm (12") de longitud el mínimo de fusión de pierna no deberá ser menos de $.9t$ (donde "t" es el espesor del miembro mas delgado que se está soldando) mientras otra cosa no sea especificada por la ingeniería.

La dimensión de la garganta para soldaduras de filete, T, deberá de ser mínimo de $.6t$ mientras otra cosa no sea especificada por la ingeniería.

Soldaduras de más de 300 mm (12") de longitud, el mínimo de fusión de la pierna no debe de ser de menos de $.7t$ mientras otra cosa no sea especificada por la ingeniería.

La dimensión de la garganta para soldaduras de filete, T , deberá ser mínimo de $.6t$ mientras otra cosa no sea especificada por la ingeniería. Esas dimensiones deberán ser mantenidas para las longitudes requeridas.^[1]

Para uniones en soldadura de bisel en borde y soldadura de ranura de borde en V la mínima fusión de pierna y garganta es $0.9t$ y $0.6t$ respectivamente (donde “ t ” es el espesor del miembro más delgado que se está soldando) el método para medir esas dimensiones es mostrado en la las Figuras (1 y 2). Debe de ser notado que la dimensión T de la garganta es medido en la sección mas delgada a través de la sección.^[1]

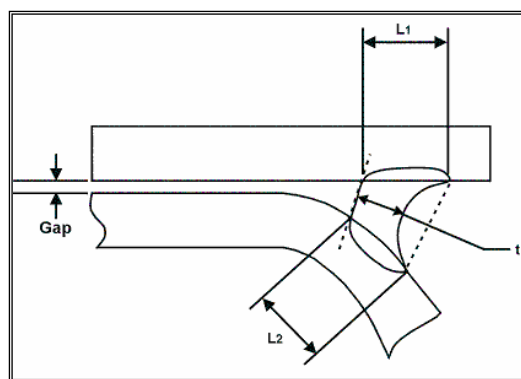


Fig. 1 Soldadura de ranura en chasis , ranura flare ^[1]

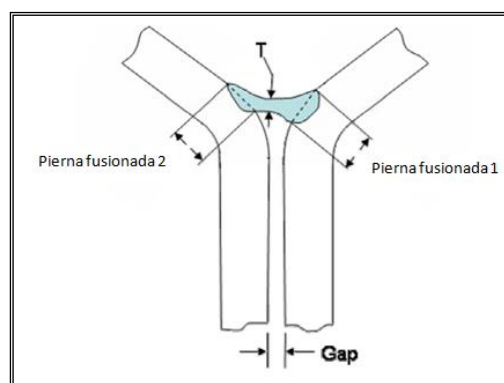


Fig. 2 Soldadura de ranura en chasis , ranura en V. ^[1]

b) Inspección de fusión de pierna y garganta

La inspección de la fusión de pierna debe de consistir de soldaduras de arco seccionadas para verificar la inspección visual y checar la fusión de ambas piernas fusionadas y otros subestadares internos de las condiciones de la soldadura.

Los requerimientos para las soldaduras de filete para la fusión de la pierna 1 y pierna 2 representan como la fusión de piernas de una soldadura depositada de forma triangular es mostrada en la Fig.3. La garganta (T) requerida para las soldaduras de filete es la mínima dimensión (longitud) de la raíz de la soldadura a la cara de la soldadura, como lo muestra la soldadura de referencia Fig.4.^[1]

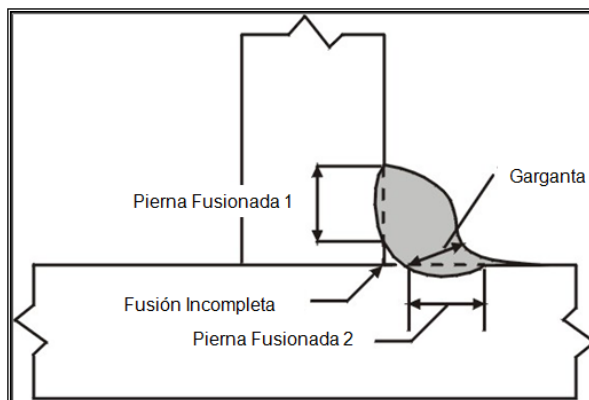


Fig. 3 Unión en T con soldadura de filete con fusión incompleta^[1]

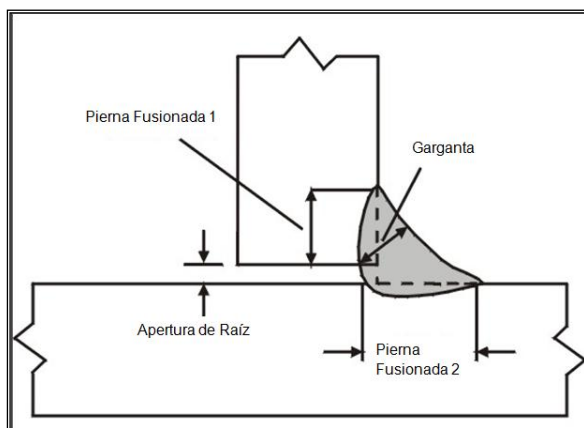


Fig. 4 Unión en T con soldadura de filete y apertura de raíz^[1]

La inspección de soldaduras que se utiliza actualmente es la que indica el código de fabricación de soldaduras que utiliza el cliente final. En dicha inspección se toma un chasis por turno dependiendo de la cantidad de modelos y líneas disponibles, además de la producción programada.

En común acuerdo con el cliente se seleccionan los puntos a ser inspeccionados en el chasis y conforme a una secuencia de corte de dichos puntos, estos cortes son realizados por medio de plasma y después se les realiza un pulido y un posterior macroataque para proceder a la evaluación

estereoscópica de la muestra tomando en cuenta los requerimientos del código antes descrito.

Al realizar este tipo de prueba se pierde por completo el chasis, ya que es inspeccionado en la mayoría de sus puntos más importantes, donde las soldaduras son el refuerzo principal. La principal función de esta información procedente de la prueba destructiva es evaluar dimensionalmente la soldadura y asegurar su fusión, en la Fig.5 se muestra el estado de un chasis después de realizar la prueba, de la Fig.6 se observa el seccionamiento de los soportes principales del chasis.



Fig. 5. Chasis después de prueba^[2]



Fig. 6 Soporte de cabina^[2]

2.2 EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

La evaluación no destructiva es definida como aquellos métodos utilizados para probar una parte, material o sistema sin menoscabar su futura utilidad.^[3]

La evaluación no destructiva es descrita como prueba no destructiva (NDT), inspección no destructiva (NDI), y examinación no destructiva (NDE). Las actividades asociadas con la evaluación incluyen prueba, inspección y examinación, preliminarmente envuelve observación en o a través y/o la medición de algunas características de un objeto. Frecuentemente hay que determinar algunas características del objeto para conocer los sitios donde el objeto contiene irregularidades, discontinuidades o fallas. Esas examinaciones, inspecciones o pruebas son usados para determinar la solides física de un material sin menoscabar su utilidad. La evaluación no destructiva es una poderosa herramienta que puede ayudar a garantizar seguridad, calidad y fiabilidad; incrementa la productividad, reduce riesgos, protegen el ambiente y reducen costos.^[4]

2.2.1 Selección de ensayos no destructivos (END)

La selección de un método END o una combinación de métodos END primero requiere un claro entendimiento del problema a ser resuelto.

La evaluación no destructiva puede ser convenientemente dividida en nueve distintas áreas:

- Detección y evaluación de fallas
- Detección y evaluación de fugas
- Metrología (medida de dimensiones) y evaluación
- Determinación y evaluación de ubicaciones
- Caracterización de estructura o microestructura
- Estimación de propiedades físicas y mecánicas
- Determinación de resistencia y respuesta dinámica
- Análisis de sintonía
- Determinación de la composición química

2.2.1.1 Detección y evaluación de fallas

La detección de fallas es usualmente considerada como el mas importante aspecto de los END. Hay muchos enfoques imaginables para seleccionar un método END. Un enfoque es considerar que hay solo seis factores primarios envueltos en la selección de un método END:

- La razón de la realización del END
- El tipo de fallas de interés en el objeto
- El tamaño y orientación de las fallas que son despreciables
- La ubicación prevista de las fallas en el objeto de interés
- El tamaño y forma del objeto
- Las características del material a ser evaluado

Después que las razones para seleccionar un END han sido establecidas se debe de especificar que tipo de fallas son rechazables, el tamaño y orientación de las fallas que son rechazables, y la localización de las fallas que pueden causar que el objeto sea rechazable. El tipo, tamaño, orientación y localización

de las fallas que serán causa de rechazo, deben de ser determinadas si es posible usando análisis de esfuerzos y/o calculo de mecánica de fracturas. Si los cálculos definitivos no son económicamente factibles, el tipo, tamaño y orientación de la falla que serán causa del rechazo del objeto deben de ser estimadas con el apropiado factor de seguridad.^[3]

El tipo, tamaño y localización de de fallas rechazables son a menudo establecidas por un código, estándar o requerimiento, como lo son La Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, Código de Recipientes a Presión, Comisión Regulatoria de Requerimientos Nucleares o la Asociación Americana de Soldadura Código de Soldadura Estructural. Si uno de estos aplica al objeto en consideración, la información necesitada estará disponible en uno de estos documentos.

2.2.1.2 Fallas volumétricas y planeares

Cuando el tamaño y orientación de la falla rechazable ha sido establecida, hay que determinar que tipo de fallas son rechazables. En general hay dos tipos de fallas: volumétricas y planas. Las fallas volumétricas pueden ser descritas como por tres dimensiones o un volumen. En la Tabla 1 se enlistan varios tipos de fallas volumétricas con los métodos END útiles para detección. Las fallas planas son delgadas en una dimensión pero grandes en las otras dos. La Tabla 2 enlista algunos de los varios tipos de fallas, con los métodos END apropiados para la detección.^[3]

Tabla 1, Clasificación de las fallas volumétricas y los métodos de detección
END ^[4]

Fallas Volumétricas
➤ Porosidad
➤ Inclusiones
Escoria
Tungsteno
Otras
➤ Contracciones
➤ Hoyos y abolladuras
➤ Adelgazamientos por corrosión
➤ Picaduras por corrosión
Métodos de detección NDE
➤ Visual (superficie)
➤ Réplica (superficie)
➤ Líquidos penetrantes (superficie)
➤ Partículas magnéticas (superficie y subsuperficie)
➤ Corrientes de Eddy
➤ Microondas
➤ Ultrasonido
➤ Radiografía
➤ Tomografía computarizada de rayos x
➤ Radiografía de neutrones
➤ Termografía
➤ Holografía óptica
➤ Metrología de marcas
➤ Imagen digital mejorada

Tabla 2 Clasificación de las fallas planas y los métodos de detección NDE.^[4]

Fallas planas
➤ Discontinuidades
➤ Laminaciones
➤ Falta de adhesión
➤ Traslapes de forja o rolado
➤ Cerraduras de fundición en frío
➤ Fisuras por tratamiento térmico
➤ Fisuras por pulido
➤ Fisuras de enchapado
➤ Fisuras por fatiga
➤ Fisuras por tensión-corrosión
➤ Fisuras de soldadura
➤ Falta de fusión
➤ Penetración incompleta
➤ Desprendimientos de soldadura
Métodos de detección NDE
➤ Visual
➤ Microscopía de réplica
➤ Partículas magnéticas
➤ Campo magnético
➤ Corrientes de Eddy
➤ Microondas
➤ Perturbaciones en la corriente eléctrica
➤ Megabsorción
➤ Ultrasonido
➤ Emisión acústica
➤ Termografía

2.2.1.3 Localización, forma y tamaño de fallas

Además de la clasificación de las fallas como volumétricas y planas, es necesario considerar la localización de las fallas en el objeto. Las fallas pueden ser convenientemente clasificadas como fallas superficiales o como fallas internas que no interceptan las superficies. La tabla 3 enlista los métodos END usados para detectar fallas de superficie e interiores. ^[4]

Tabla 3 Métodos END para la detección de fallas interiores y de superficie ^[4]

Superficie
➤ Visual
➤ Replica
➤ Líquidos penetrantes
➤ Partículas magnéticas
➤ Campos magnéticos
➤ Corrientes de Eddy
➤ Ultrasonido
➤ Emisión acústica
➤ Termografía
➤ Holografía óptica
➤ Metrología de marcas (speckle metrology)
➤ Holografía acústica
➤ Imagen digital mejorada
➤ Microscopia acústica
Interiores
➤ Partículas magnéticas (uso limitado)
➤ Campos magnéticos
➤ Perturbaciones en la corriente eléctrica
➤ Megabsorción
➤ Corrientes de Eddy
➤ Microondas
➤ Ultrasonido
➤ Emisiones acústicas
➤ Radiografía
➤ Tomografía computarizada de rayos x
➤ Radiografía por neutrones
➤ Termografía (posiblemente)
➤ Holografía óptica (posiblemente)
➤ Holografía acústica (posiblemente)

2.2.1.4 Características para la selección de un método de inspección

Algunas de las características para seleccionar el método adecuado para la inspección de un ensamble de soldadura son los siguientes.

- Acceso a la región bajo inspección
- Geometría de la estructura (plana, curvada, delgada, gruesa)
- Condiciones de la superficie(suave o irregular)
- Modo de inspección (preservicio, en servicio, continuo, periódico, puntual)
- Medio ambiente (hostile, bajo el agua, etc.)
- Tiempo disponible para la inspección
- Fiabilidad
- Aplicación de técnicas múltiples
- Costo

Fallas en las consideraciones adecuadas de las limitantes impuestas por una aplicación específica, puede resultar en la selección de un equipo sofisticado e inútil.

De tal forma se han establecido criterios y técnicas de inspección óptimas que pueden ser seleccionadas o diseñadas y construidas.

Exactitud.- Es el atributo de un método de inspección que describe la exactitud de la técnica dentro de los límites de su precisión. En otras palabras la técnica es altamente exacta si los indicadores resultantes de la técnica son correctos. Eso no significa realmente que la técnica fue capaz de detectar todas las discontinuidades presentes, más bien que los que se indican en realidad existen.

Sensibilidad.- Por otra parte se refiere a la capacidad de la técnica para detectar discontinuidades que son pequeñas o que tienen propiedades solo

ligeramente diferentes en el material que residen. La Fig.7^[4] ilustra esquemáticamente el concepto de exactitud y sensibilidad en contexto con la posibilidad de detección. La sensibilidad es ganada a expensas de la exactitud por que la alta sensibilidad incrementa la posibilidad de falsas alarmas.

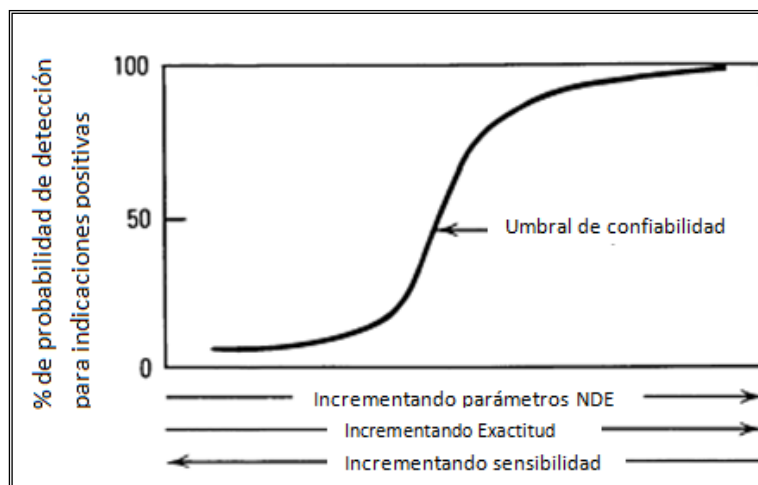


Fig.7 La probabilidad de detección para una indicación positiva verdadera. ^[4]

El mínimo tamaño de parámetro NDE requerido para establecer conveniente para tal propósito, debe estar a la derecha de la región de transición o umbral de fiabilidad para alcanzar una fiabilidad satisfactoria

Fiabilidad.- Es la combinación de exactitud y sensibilidad, tres factores influyen en la fiabilidad:

Procedimiento de inspección incluyendo la instrumentación; factor humano (motivación del inspector, experiencia, entrenamiento, educación, etc.) y el análisis de datos. Equipo sin calibrar, inapropiada aplicación de la técnica e inconsistente calidad de los accesorios del equipo (transductores, coples, filmes, químicos, etc.) pueden afectar la exactitud y en algunos caso la sensibilidad. Técnica pobre del inspector, respuesta desconocida, falta de concentración y otros factores combinados pueden combinarse para reducir la fiabilidad.

El análisis de datos o la falta de estos pueden influir en la fiabilidad también; generalmente las inspecciones llevadas a cabo en condiciones en las cuales la probabilidad de detección es menos que 100% y no es constante con severas discontinuidades. Consecuentemente estadísticas deben de ser utilizadas para establecer el nivel de confiabilidad que deben de ser agregados al resultado de inspección.

Alta sensibilidad con baja exactitud puede ser mucho peor desde el punto de vista de la fiabilidad, como baja sensibilidad con alta exactitud, especialmente si el nivel de sensibilidad es adecuado para la detección de las discontinuidades de la soldadura en cuestión. Como regla general la región de transición de la curva de probabilidad de detección indica el grado de fiabilidad. ^[4]

2.2.2 Introducción a los métodos de evaluación no destructiva

Los métodos no destructivos son utilizados para:

- Para determinar si el material base es aceptable antes del uso para fabricación
- Para determinar la aceptabilidad de un ítem después de cada paso de la fabricación
- Para determinar si un producto es aceptable para su uso inicial después de la fabricación final
- Para determinar si un producto es aceptable para uso continuo

Los métodos de evaluación no destructiva convencionales son los siguientes de acuerdo a ASM^[5]:

1. Inspección Visual (VT)
2. Inspección por Líquidos penetrantes (PT)
3. Inspección por Partículas magnéticas (MT)
4. Inspección por Ultrasonido (UT)
5. Inspección por Radiografía(RT)
6. Inspección Corrientes de Eddy (EC)

2.2.2.1 Inspección visual

La inspección visual es la observación de una pieza por un inspector ya sea directa o indirectamente para determinar la presencia o ausencia de discontinuidades en la superficie y decoloraciones y la condición general de la pieza, la inspección visual debe de ser la primera evaluación no destructiva aplicada, se pueden observar fallas superficiales como corrosión, contaminación, acabado superficial, es una de los métodos mas utilizados para visualizar soldaduras.

Algunos equipos utilizados pueden ser boroscopios Fig.8, lupas o simplemente la propia visión humana, auxiliada de apoyos visuales y calibradores dimensionales.^[5]

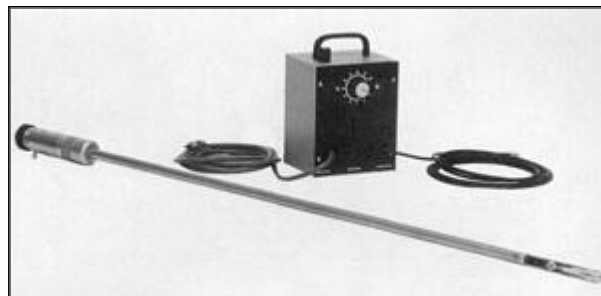


Fig. 8 Equipo óptico^[4]

Este método provee un significado de detección y examinación de una gran variedad de defectos superficiales.

Para la inspección se soldaduras es ampliamente usada para la detección de los siguientes defectos:

- Exactitud dimensional de las soldaduras
- Conformidad de la soldadura al tamaño y contorno requeridos
- Aceptabilidad de la apariencia de la soldadura conforme a la rugosidad de la soldadura, salpicaduras y limpieza
- Presencia de defectos superficiales como cráteres sin relleno, marcas de puntos, socavados, traslapes y fisuras.

2.2.2.2 Líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes revela superficies dañadas por medio de la salida de un medio penetrante a través de un fondo contrastante. Esto es realizado aplicando un penetrante a una superficie pre limpiada y los defectos de la pieza que va a ser inspeccionada. El penetrante es aplicado a la superficie y se le deja permanecer por un tiempo preestablecido [Fig.9]. El líquido penetrante será absorbido por cualquier superficie abierta por medio de capilaridad. Enseguida se remueve el exceso de penetrante entonces un revelador es aplicado el cual da reversa a la acción de la capilaridad y saca al penetrante de los defectos [Fig. 10], la norma de referencia es la ASTM 165 para la aplicación de esta técnica.

Las indicaciones resultantes revelan la presencia de defectos que pueden ser visualmente inspeccionados y evaluados. [5]

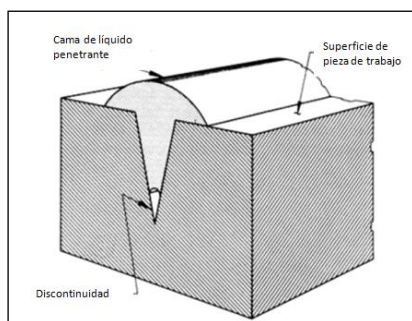


Fig. 9 Líquido penetrante [3]

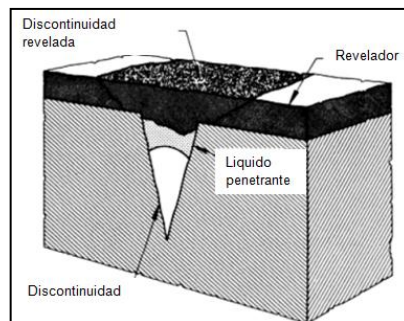


Fig. 10 Líquido revelador [3]

Existen 2 tipos de líquidos penetrantes:

- Fluorescentes.- líquido penetrante fluorescente revelable con luz ultravioleta
- Visibles.- Indicación mediante un líquido contrastante por lo regular rojo con el fondo contrastante de un revelador blanco, la revelación tiende a ser más gruesa que el defecto.

Por lo general se utiliza para la detección de defectos como fisuras que no pueden ser vistas a simple vista o aperturas pequeñas que se encuentren en la

accesibilidad de la superficie de la pieza, por lo tanto solo se limita a ese tipo de defectos.^[4]

2.2.2.3 Partículas magnéticas

La prueba de partículas magnéticas es usada para localizar discontinuidades en la superficie y en la subsuperficie o defectos en materiales ferromagneticos. Como las fallas presentes en una parte magnetizada causaran un campo magnético Fig.11 que resaltará de la pieza por el cambio de dirección que generará la falla y el espacio que genera en ellas. Si partículas magnéticas son aplicadas a esta superficie, serán mantenidas en el lugar de la falla por la fuga de flujo magnético para dar una indicación visual, la norma ASTM E709 es la guía para la aplicación de esta técnica.^[5]

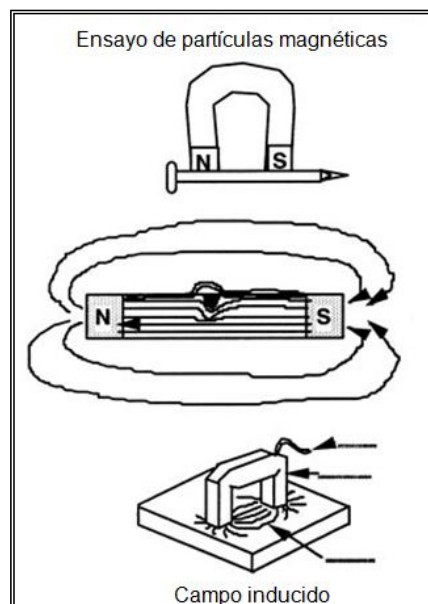


Fig. 11 Principio de campo magnético ^[3]

Los tipos de defectos que pueden ser detectados son, fisuras, falta de penetración, falta de fusión y porosidad cerca de la superficie.

El equipo utilizado es un yugo electromagnético y partículas electromagnéticas para la indicación de las discontinuidades según sea su aplicación, por lo general por medio seco si es utilizado para aplicaciones terrestres.

El flujo de la campo magnético por lo general tiene que ser perpendicular a la falla para lograr un salto en el campo más notorio por tal razón, el yugo debe de ser manipulado en varias direcciones durante la inspección. [4]

2.2.2.4 Ultrasonido

La técnica de ultrasonido es un método en el cual rayos de ondas de sonido en altas frecuencias son introducidos en el material para la detección de fallas en la superficie y la subsuperficie del material. Las ondas de sonido viajan a través del material con algo de tendencia a perder energía y son reflejados a la interface. El rayo reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas o discontinuidades. [4] Fig.12

En general los ultrasonidos son vibraciones mecánicas o ondas de presión similares al sonido audible. La única diferencia es el paso o la frecuencia de la vibración que es mucho mas grande. El sonido audible cubre los rangos de 30 Hz a 15 KHz. Vibración por encima de 15 KHz son generalmente referentes a ultrasonido, pero para ensayos no destructivos el rango es usualmente de 1MHz a 30 MHz o mas alto. Esas ondas de ultrasonido pueden ser altamente direccionadas y pueden ser enfocadas en puntos pequeños o una línea delgada dependiendo de los requerimientos. [6]

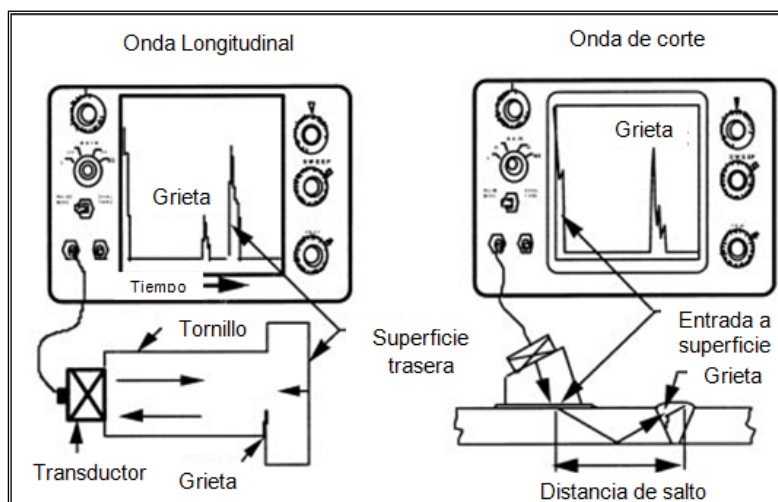


Fig. 12 Esquema de análisis ultrasónico [3]

Algunos de los equipos que son mayormente inspeccionados con esta técnica son los siguientes:

- Componentes de molinos: rodillos, flechas, etc.
- Equipo de poder: turbinas, rotores generadores, tuberías de presión, soldaduras, recipientes a presión y componentes de reactores.
- Partes de motores a propulsión: turbina, compresor y engranes.
- Componentes de aeronaves: secciones de chasis y ensamblajes de composites.
- Materiales de maquinaria: blocks, herramientas de acero y brocas.
- Partes de trenes: ejes, ruedas, rieles y rieles soldados.
- Partes automotrices: forjas, vaciados dúctiles y componentes ensamblados o soldados.

La norma ASTM E164 es la guía para la examinación de soldaduras por medio de la técnica ultrasónica de contacto.

Técnicas de Escaneo.-El sistema de prueba ultrasónico puede ser usado con 3 formas de escaneo, cada tipo de escaneo provee un diferente escenario de la información ultrasónica.

Escaneo A.- En este tipo de escaneo se presenta el dato en una dimensión mostrando la respuesta a lo largo del patrón de haz a una específica localización del objeto de prueba, la profundidad de los defectos es indicada por el tiempo de vuelo (Fig. 13b) , el tamaño de la discontinuidad puede ser estimada por la amplitud de la señal reflejada, el tipo de discontinuidad puede ser determinado por un análisis de amplitud y fase. ^[3]

Escaneo B.- El objeto de prueba es escaneado a lo largo de un eje para producir una presentación de su sección cruzada, la localización a lo largo del patrón de escaneo es mostrada en el eje X y los valores del tiempo de vuelo son mostrados a lo largo del eje Y (Fig.13c). Por producirse una sección cruzada, el escaneo B es menos práctico para la inspección de volúmenes grandes. ^[3]

Escaneo C.- El escaneo C presenta una vista del área de las discontinuidades vistas desde encima (Fig.13d), los datos de localización y tamaño de las discontinuidades están disponibles desde los cambios en amplitud como una función de la posición.

Los sistemas modernos de escaneo C usan computadoras para controlar la posición del transductor y adquirir imágenes, documentar y guardar la información de la prueba.^[3]

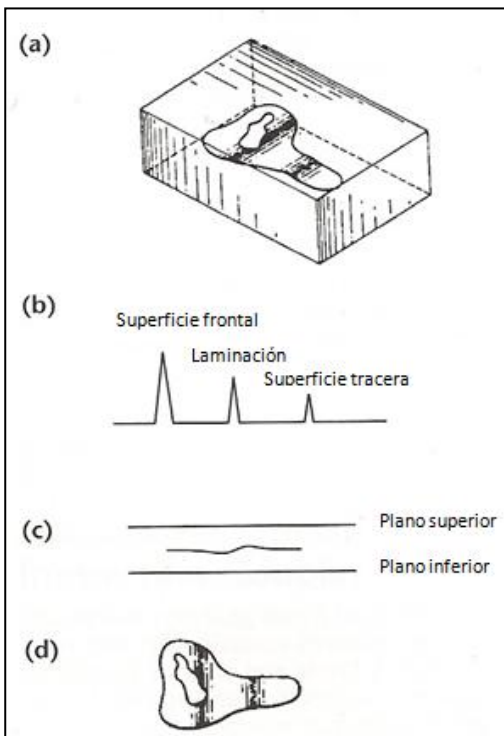


Fig. 13 Técnicas de Escaneo^[3]

2.2.2.5 Radiografía

Radiografía es el término general dado al método de inspección que esta basado en la absorción diferencial de radiación penetrante – cualquier radiación electromagnética de muy corta longitud de onda o radiación particular por parte de la pieza de trabajo que está siendo inspeccionada. Debido a la diferencia en densidad y variación en el espesor de la parte o diferencias en las características de absorción causadas por la densidad, diferentes porciones de la pieza de trabajo absorben diferentes cantidades de radiación penetrante. Esas variaciones en la absorción de radiación penetrante puede ser monitoreada detectando la radiación que no es absorbida y que pasa a través de la pieza plasmándose en una película o siendo censada y mostrada por medios electrónicos, la norma ASTM E94 es la guía para la aplicación de la técnica radiográfica. ^[4] Fig.14

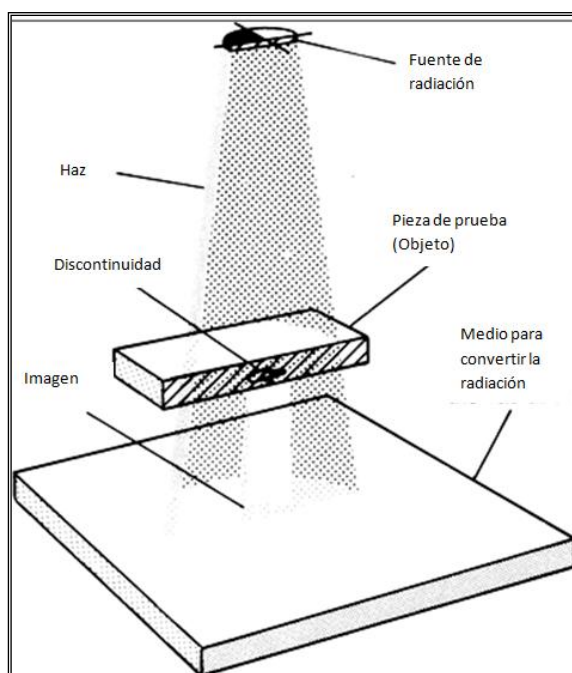


Fig.14 Principio de la radiografía ^[4]

Dos tipos de energía pueden ser utilizados para la aplicación de la técnica, los cuales son rayos X y rayos gamma, los dos tipos de energía difieren en su

forma de ser producidas, los rayos x resultan de la interacción entre un rápido movimiento de una corriente de electrones y átomos en un objetivo de material sólido, mientras que los rayos gamma son emitidos durante la decadencia radioactiva de un núcleo atómico.

2.2.2.6 Corrientes de Eddy

Esta técnica esta basada en los principios de inducción electromagnética y es usada para identificar entre una gran variedad de condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas en metales ferro magnéticos y no ferro magnéticos así como en piezas de metal. Las corrientes de Eddy pueden ser utilizadas para:

- Medir o identificar cualquier condición y propiedades como conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, condiciones de tratamiento térmico, dureza y dimensiones físicas.
- Detectar cordones, traslapes, grietas, abolladuras e inclusiones.
- Diferenciar metales disimiles y detecta diferencias en su composición, microestructura y otras propiedades.
- Medir el espesor de recubrimientos en metales conductivos y no conductivos o el espesor de recubrimientos de metal no magnéticos en metales magnéticos.
- El método de corrientes de Eddy es adaptable inspección de alta velocidad y como es un método no destructivo de no contacto puede ser utilizado para la inspección de lotes completos.

El método se basa en la medición indirecta entre el instrumento de lectura, las características estructurales y la utilidad de la parte que esta siendo inspeccionada debe de ser cuidadosamente y repetidamente establecidas.

Existen 2 tipos de bobinas para la inspección de diferentes tipos de materiales y configuraciones geométricas como se puede observar en la (Fig.15) , la bobina

circular para secciones constantes como tuberías, varillas, etc. Y las bobinas planas para superficies planas como placas u otras piezas.

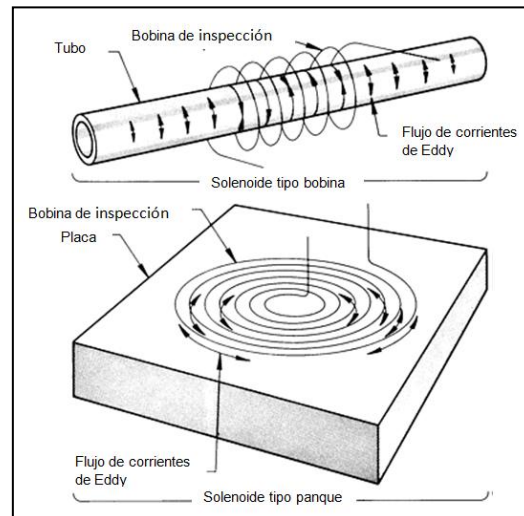


Fig.15 tipos de bobinas para inspección por corrientes de Eddy. [4]

2.2.3 Métodos no destructivos utilizados en la industria automotriz

La industria automotriz contempla una gran cantidad de procesos de producción de diferentes tipos de productos, ensambles, subensambles y productos finales como tal después de pasar por el proceso constructivo, se requiere asegurar la calidad de las partes que se estén trabajando. Una gran parte de estas técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la industria están concentradas principalmente en las soldaduras de puntos o soldaduras laser de las carrocerías mientras que otras partes como los son los chasis tienden a hacerse por métodos netamente destructivos para cumplir con el código de la aplicación.

Dentro de las técnicas utilizadas actualmente en la industria automotriz y que siguen en evolución se encuentran las siguientes como lo indica W. Roye [7], principalmente para la inspección de carrocerías y piezas de fundición.

- Técnica de soldadura.- Soldadura de puntos de carrocería
- Técnica de inspección.- Inspección ultrasónica pulso eco de puntos auxiliada por computadora Fig. 16^[7]

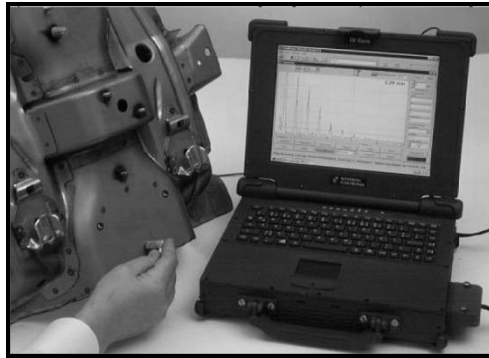


Fig. 16 Inspección ultrasónica de soldadura de puntos^[7]

Por medio de esta técnica se pueden obtener datos de la calidad de los puntos como se muestra en la siguiente Fig.17^[7].

Para el punto 1 . Es un punto de buena calidad y se obtuvo la secuencia de ecos como se muestra, debido a la presencia de grano grueso, la atenuación del sonido cae rápidamente

Para el punto 2 Es un punto reducido en dimensiones y se obtiene una señal con ecos intermedios debido a que el diámetro del campo de sonido es mayor al del punto.

Para el punto 3, En una unión sin fusión y son transparentes para el sonido, pero la atenuación lenta del sonido produce un eco más largo.

Para el punto 4, Cuando no hay unión solo se obtiene el eco de la primera lámina.

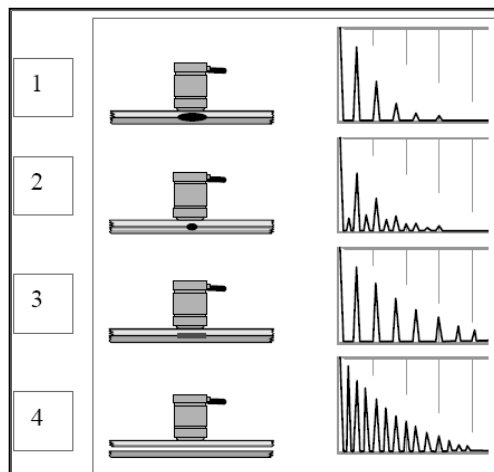


Fig. 17 Datos de inspección ultrasónica^[7]

Técnica de soldadura.- Soldadura de cordones laser

Técnica de inspección.- técnica de inspección ultrasónica de ondas guiadas, como se muestra en la Fig. 18 en donde el emisor E genera una onda guiada a través de la placa y pasa a través de la soldadura L para ser detectada por la sonda de recepción R para asegurar una buena aplicación de la soldadura.^[7]

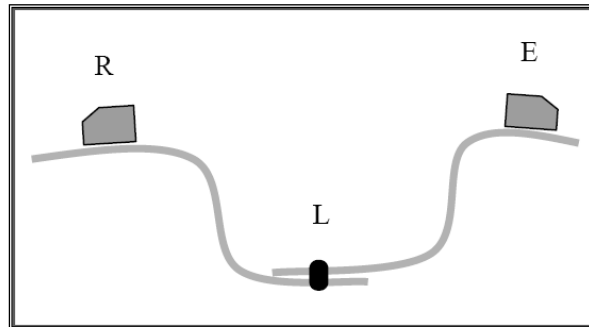


Fig. 18 Inspección por ondas guiadas^[7]

Técnica de soldadura.- Soldadura GMAW

Técnica de inspección.- técnica de inspección ultrasónica de ondas guiadas, en esta técnica el emisor tiene 3 transductores sónicos que envían las ondas a través de la placa y la soldadura para ser detectadas por el receptor como se muestra en la Fig. 19^[7], en este tipo de soldaduras una buena soldadura es indicada por una amplitud grande y una soldadura de baja amplitud se considera de mala calidad, en la Fig. 20^[7] se puede apreciar una inspección en una soldadura de carrocería de un automóvil.

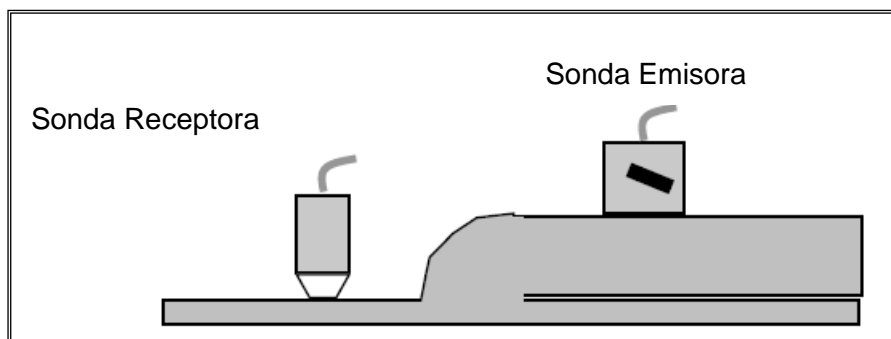


Fig. 19 Esquema de inspección^[7]

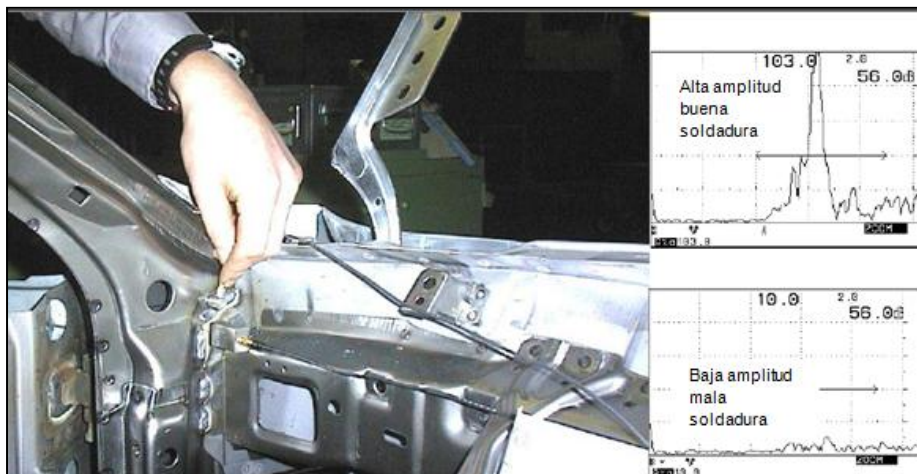


Fig. 20 Inspección de soldaduras de carrocería [7]

Después de haber visto todas las técnicas y metodologías para evaluar las discontinuidades que se pueden presentar en cualquier proceso y algunas que se utilizan actualmente en la industria automotriz, ahora hay que definir las discontinuidades de estudio , considerando los requerimientos de la norma del cliente que los rige, entre los defectos que más se presentan en la empresa son las siguientes:

- Falta de penetración
- Falta de fusión
- Porosidad externa
- Socavado
- Traslape

La porosidad, socavado y traslape de soldadura son fallas que se presentan por variaciones en el proceso o por calibración inadecuada de los herramientas para sujeción y montaje de piezas, mas es importante mencionar que pueden ser detectados y evaluados visualmente conforme a los requerimientos de la norma del cliente.

Por otra parte la falta de fusión y la falta de penetración son defectos considerados planares, que no pueden ser vistos a simple vista por ser características internas de la soldadura.

La falta de fusión y falta de penetración resulta de una inapropiada manipulación del electrodo y el uso incorrecto de las condiciones de soldadura. La fusión se refiere al grado en el cual, la superficie del metal base original a ser soldada ha sido fusionada al metal de aporte.

Por otra parte, la penetración se refiere al grado en el cual el metal base a sido fusionado y re-solidificado resultando en una garganta mas profunda que la que presenta la unión, antes de ser soldada. En efecto, una junta puede ser completamente fusionada pero tener incompleta penetración en la raíz para y no obtener el tamaño de garganta especificado. Basado en lo anterior, la falta de fusión está localizada en los lados de las paredes de la junta y la falta de penetración está localizada cerca de la raíz Fig.21^[4].

En algunas configuraciones de juntas, como las juntas a tope, los dos términos pueden ser usados indistintamente. Las causas de falta de fusión incluyen excesiva velocidad de soldadura, puenteos, excesivo tamaño de electrodo, insuficiente corriente, pobre penetración de la unión, inapropiada manipulación del electrodo y excesivo sopleo de arco. La falta de penetración puede ser el resultado del flujo de corriente de soldadura, excesiva velocidad de soldadura, inapropiada manipulación del electrodo o contaminación de la superficie por oxido, aceite, o suciedad que impide la fusión completa del metal subyacente.

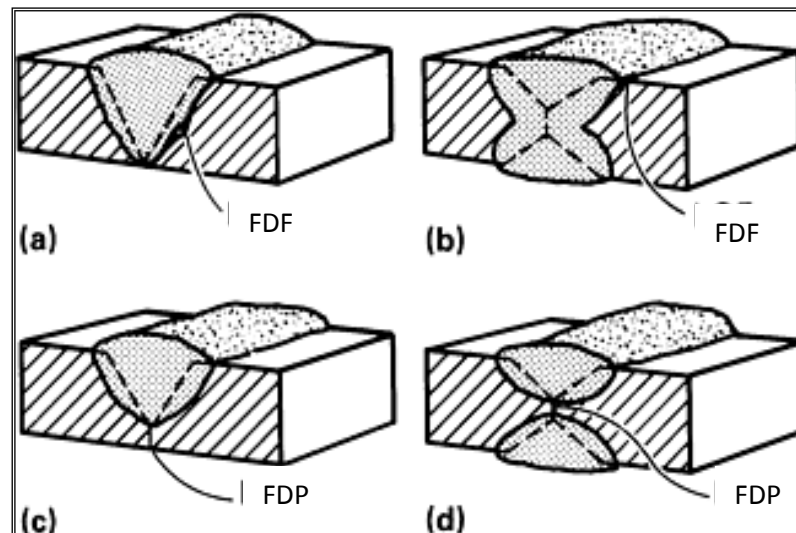


Fig. 21 (a) Falta de fusión (b) falta de fusión, (c) falta de penetración, (d) falta de penetración^[4]

Los métodos radiográficos pueden ser incapaces de detectar esas discontinuidades en ciertos casos, por el pequeño efecto que ellos tienen en la absorción de rayos X. De cualquier forma, la falta de fusión en las paredes es fácilmente detectada por radiografía. Ultrasónicamente ambos tipos de discontinuidades a menudo aparecen como severas, casi continuas, porosidad lineal, debido a la naturaleza de las áreas no adheridas de la unión. Salvo en hojas delgadas o placas, esas discontinuidades pueden ser muy profundas para ser detectadas por inspección por partículas magnéticas.

Tomando en cuenta las técnicas básicas de inspección para soldaduras y la problemática a resolver, se deben de tomar en cuenta los factores principales a considerar que son las características de la discontinuidad:

Falta de penetración: es una discontinuidad producida por variaciones en el proceso en este caso GMAW, en realidad es una característica de las soldaduras o un parámetro medible en la actualidad más exactamente solo con

la aplicación de técnicas destructivas y macroataque por medio del cual se pueden identificar dichas características de la soldadura como lo son los tamaños de la misma. Las normas de la industria automotriz nos fijan ciertas características para las diferentes tipos de juntas, entonces para poder verificar esta característica de penetración se necesita un proceso calificado capaz de medir el parámetro, se debe considerar que esto consistiría en la medición de la profundidad de penetración de la soldadura por lo tanto los métodos visuales superficiales quedan descartados como lo son la inspección visual, líquidos penetrantes.

La soldadura al tener forma irregular, puede presentar muchos defectos que pueden estar dentro de los parámetros permitidos, también nos limitan el uso de técnicas subsuperficiales como corrientes magnéticas o de Eddy, que requerirían un perfil más constante o imperfecciones como grietas que no son tan comunes en la soldadura GMAW.

Tomado en cuenta las anteriores observaciones es necesario abundar en técnicas avanzadas que nos ofrezcan mayor penetración y la posibilidad de visualizar la soldadura o proporcionar información dimensional además de la posibilidad de detectar otros tipos de defectos internos.

Entre las posibles técnicas que podrían dar un buen resultado para la inspección de las soldaduras y proporcionar información veraz acerca de la soldadura, se encuentran las técnicas radiográficas y de ultrasonido que son técnicas no destructivas, capaces de analizar espesores grandes y proporcionar información interna de la unión, tanto dimensional como de defectos potenciales.

La radiografía y el ultrasonido son técnicas de evaluación de soldadura que proporcionan información interna acerca de la soldadura, mas es necesario tener una buena calibración e interpretación de los resultados por lo tanto en

este tipo de inspecciones hay que tener una técnica de evaluación no destructiva con un buen nivel de fiabilidad.

Existe una gran diversidad de técnicas para evaluar soldaduras por medio de ultrasonido y radiografía, y hasta cierto punto las tendencias tienden a desplazar la radiografía para utilizar cada día más el ultrasonido en sus diferentes modalidades y en sus diferentes campos respectivos.

2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS NO CONVENCIONALES

2.3.1 Inspección ultrasónica de soldaduras

Actualmente en la industria de la soldadura la presencia de las inspecciones no destructivas cada día está más presente ya que conforme van evolucionando y apareciendo nuevas técnicas de inspección, se vuelven más precisas y fiables, por lo tanto su aplicación cobra gran relevancia. Entre las tecnologías que tienen mayor crecimiento tecnológico para la inspección de soldaduras esta la tecnología de ultrasonido, según cifras de la industria de la soldadura, existe una distribución con tendencia a aplicar el ultrasonido según se muestra en la Fig.22 ^[8]

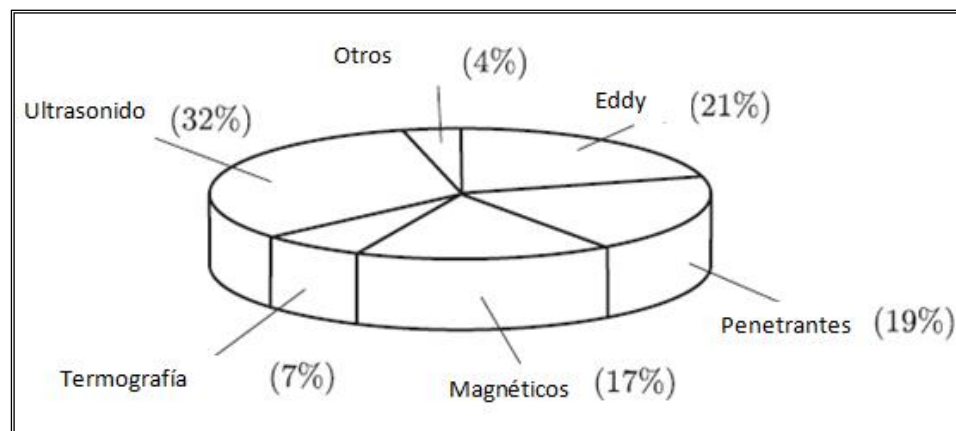


Fig. 22 Distribución de los métodos no destructivos principales^[8]

Algunos de los tipos de juntas que pueden ser inspeccionadas además de los métodos ultrasónicos recomendados son los siguientes, para soldaduras de esquina Fig.23. ^[8]

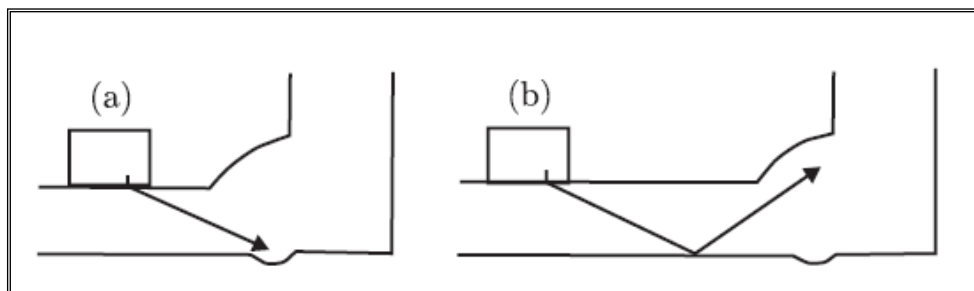


Fig. 23 a) Para un haz directo desde el transductor b) Para un haz simple reflejado ^[8]

Para soldaduras en T Fig.24^[8]

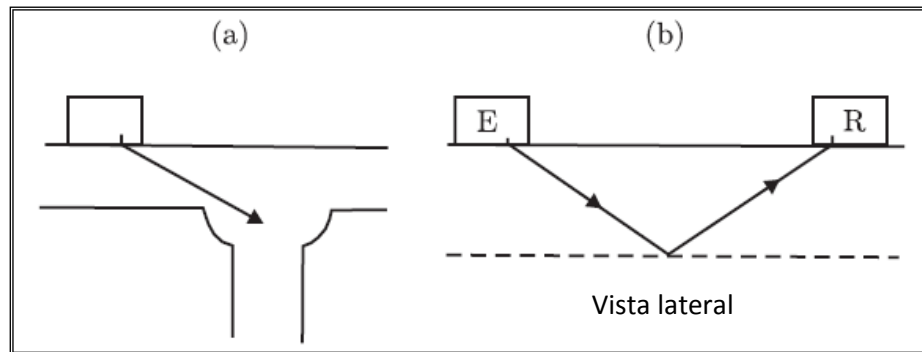


Fig. 24 a) Por un haz directo desde el transductor b) Esquema de combinación separada^[8]

Para soldaduras de traslape Fig.25^[8]

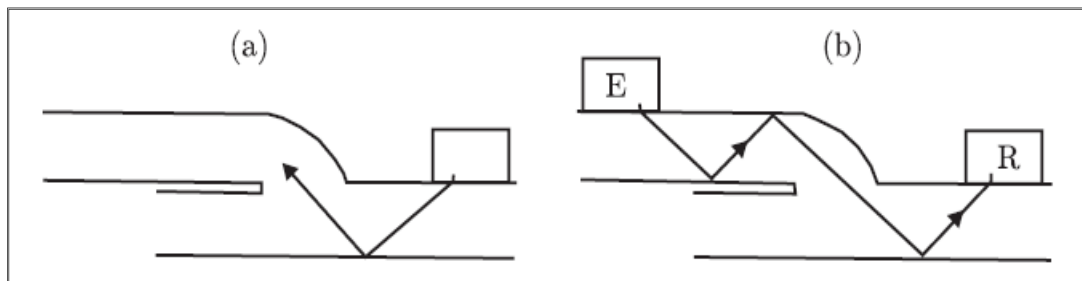


Fig. 25 a) Por un haz reflejado desde el transductor b) Esquema de combinación separada^[8]

2.3.1.1 Inspección de soldaduras con ondas guiadas

Principio de operación

Los transductores acústicos electromagnéticos fueron desarrollados en los años 70's como una alternativa de inspección de no contacto en seco a los transductores piezoeléctricos de cople. La tecnología EMAT difiere del ultrasonido convencional en la forma en que el sonido es generado en la parte a ser inspeccionada. Un EMAT consiste de un magneto y una bobina de alambre, usa fuerzas de Lorentz y magnetorestricción para generar una onda acústica en el mismo material.

Este equipo no requiere de coples haciendo de los EMATS una técnica adecuada para automatización, alta velocidad y aplicaciones de inspección en línea. Un EMAT induce ondas ultrasónicas en el objeto de prueba con dos campos magnéticos interactuando. Un campo de relativa alta frecuencia generado por la bobina eléctrica interactúa con un campo de baja frecuencia generado por imanes para crear una onda en la superficie del material de prueba, en la Fig.26^[9] se observa la comparación entre un piezoeléctrico convencional de ultrasonido y un EMAT.^[9]

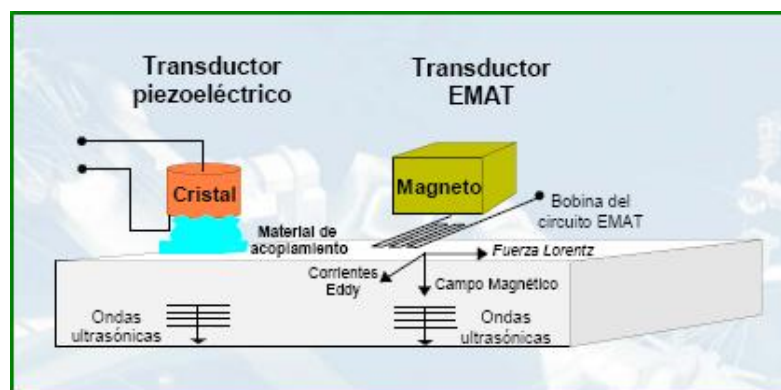


Fig. 26 Comparaciones de un transductor piezoeléctrico con un EMAT ^[9]

2.3.1.2 Inspección EMAT para soldaduras usando ondas guidas

La tecnología EMAT aporta varias ventajas sobre la inspección ultrasónica de soldaduras convencional. La onda de corte es más comúnmente usada para inspección ultrasónica de soldaduras. Las ondas de corte vertical y horizontal tienen partículas de vibración perpendiculares a la dirección de la onda. El ultrasónico convencional, utiliza ondas de corte vertical, con un ángulo de entre 30° y 60° desde el haz normal. Manteniendo la posición de la sonda es crítico obtener una inspección precisa. Una limitación de las ondas de corte vertical en la inspección de soldaduras es la inhabilidad para cubrir el volumen vertical completo del material como se observa en la Fig.27^[9]. En algunos defectos puntuales puede hasta limitar la inspección completa. Por otra parte las ondas de corte horizontal pueden ser utilizadas para la inspección de soldaduras por dos razones importantes:

- 1.- No cambian de dirección, velocidad y movimiento cuando son interferidas por superficies paralelas a la dirección de polarización. Esto es especialmente importante cuando se examinan soldaduras austeníticas y materiales con estructuras de grano dendríticos.
- 2.- La energía horizontal de corte a 90° se convierte en onda guiada que llena el volumen completo del material y permite la inspección de la sección cruzada de la soldadura.

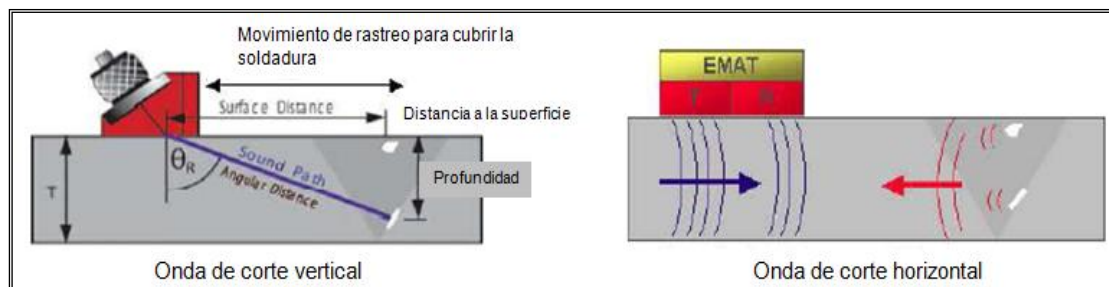


Fig. 27 Escaneo vertical vs escaneo horizontal ^[9]

Tipo de discontinuidades detectables:

- Puntos (1D)
- Costuras (2D)
- Superficies (2D)
- Volúmenes (2D)
- Espesores y distancias
- Propiedades de materiales (dureza y nodularidad)

Materiales

- Conductores eléctricos y magnéticos
- Ferrosos (acero al carbón, inoxidable, níquel y cobalto)
- No ferrosos (aluminio, cobre, bronce , uranio y otros)

Geometrías discretas y continuas

- Placas delgadas y gruesas
- Cilindros, pernos y tubos
- Elementos estructurales

2.3.1.3 Inspección de soldaduras de filete con EMAT

La inspección de una soldadura en filete se puede llevar a cabo según estudios realizados en la actualidad, mediante la técnica EMAT , técnicas como partículas magnéticas, corrientes de Eddy y líquidos penetrantes pueden proporcionar información acerca de las condiciones superficiales de la soldaduras y también subsuperficiales. Las técnicas de ultrasonido piezoeléctrico de contacto son utilizadas comúnmente pero es necesario hacer un acople entre la pieza y la sonda. Por lo tanto, estudios realizados utilizando la técnica EMAT con ondas de corte horizontal a través de la soldadura de filete detectaron fisuras en la soldadura subsuperficial utilizando ondas Rayleigh y de rastreo. ^[9]

En la Fig.28 se muestran los patrones de onda utilizados y su modo de propagación a través de la superficie de la soldadura de filete.

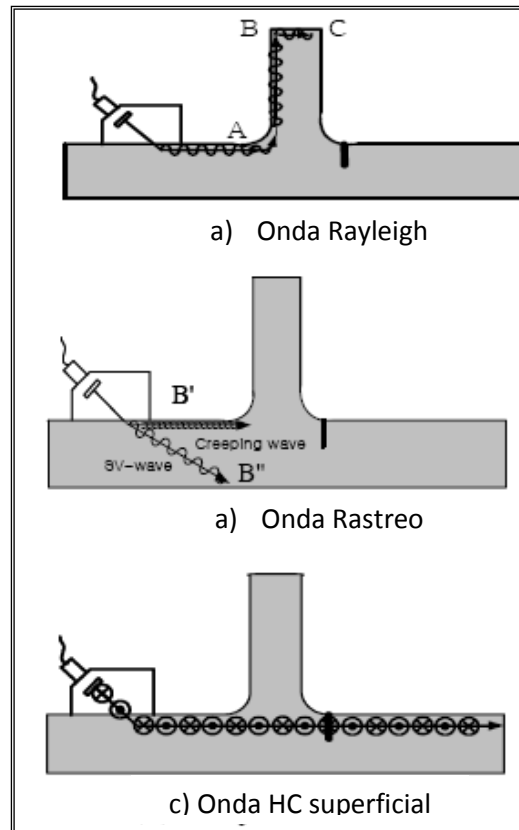


Fig. 28 Patrones de ondas^[11]

El experimento se realizó en configuración de contacto y sin contacto como se observa en Fig.29^[11] (a y b).

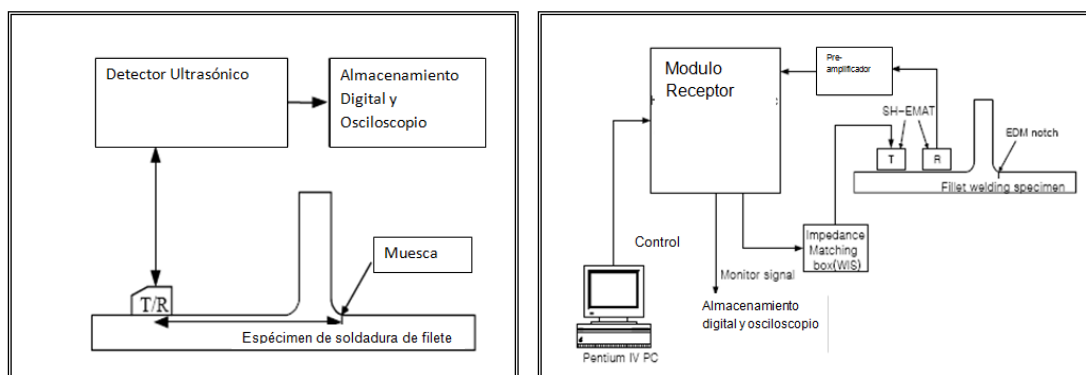


Fig. 29 Configuraciones EMAT de contacto y sin contacto^[11]

El espécimen de prueba se describe en la Fig.30, al cual se le realizaron 3 muescas de 2 mm de profundidad, 0.3mm de ancho y 5,7 y 10 mm de longitud respectivamente.

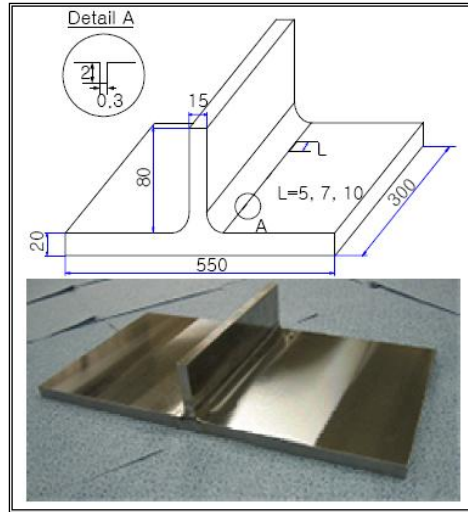


Fig. 30 Espécimen de prueba ^[11]

En la Fig. 31^{a[11]} se observan las ondas típicas para Rayleigh y Rastreo para la soldadura de filete del experimento, estos resultados son para la serie de EMAT con contacto, se puede observar la detección de los 3 defectos por medio de los ecos generados por las diferentes ondas en la Fig. 31b. ^[11]

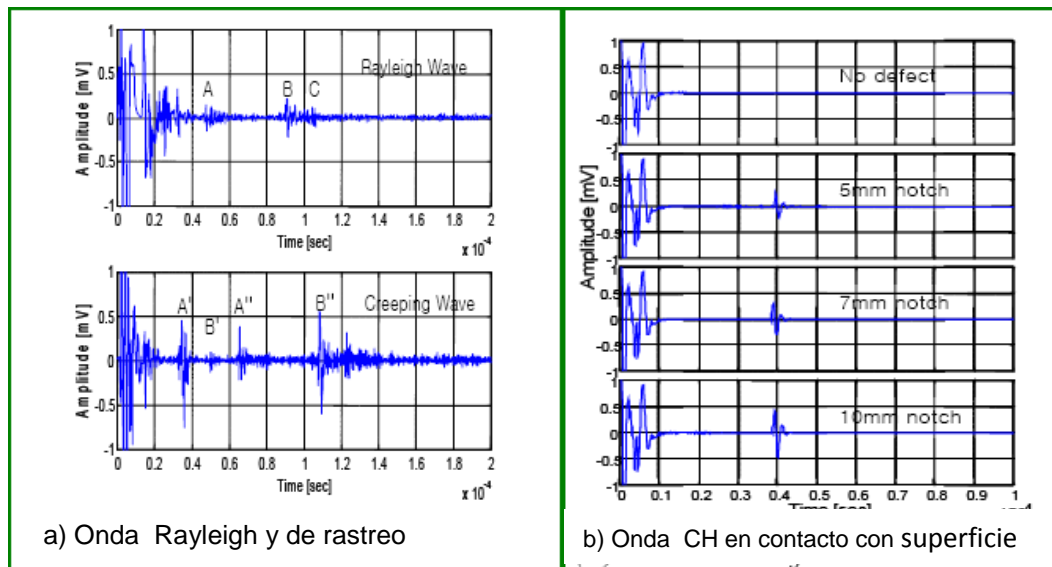


Fig. 31 Ondas de detección de contacto con superficie ^[11]

En la Fig.32^[11] se puede observar los resultados de la prueba con ondas de corte horizontal SH sin contacto con amplitudes más pequeñas para mejor visualización de las variaciones.

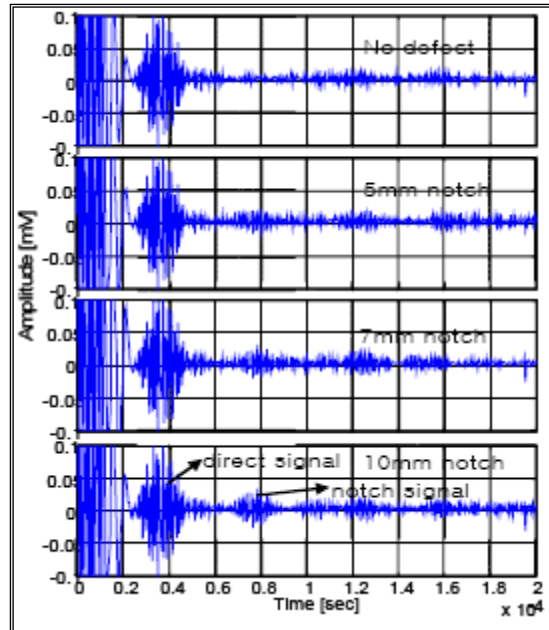


Fig.32 Onda CH sin contacto ^[11]

2.3.2 Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica de Arreglo de Fases

2.3.2.1 Tecnología arreglo de fases (Phased Array)

La tecnología de ultrasonido arreglo de fases genera un haz de ultrasonido cuyos parámetros (tales como el ángulo, la distancia focal y el tamaño de la zona de focalización) pueden ajustarse mediante un software. Además, se puede multiplexar el haz dentro de una red extendida. Esto abre la puerta a toda una serie de nuevas posibilidades. Por ejemplo, es posible cambiar rápidamente el ángulo del haz para inspeccionar una pieza sin necesidad de desplazar el palpador. La tecnología de ultrasonido arreglo de fases también permite reemplazar el uso de múltiples palpadores, incluso, ciertos componentes mecánicos. La inspección de una pieza mediante un haz de ángulo variable permite también maximizar la detección —cualquiera que fuese la orientación del defecto— optimizando al mismo tiempo la relación señal-ruido.

En la Fig. 33^[10] se puede observar el esquema de emisión y recepción de información.

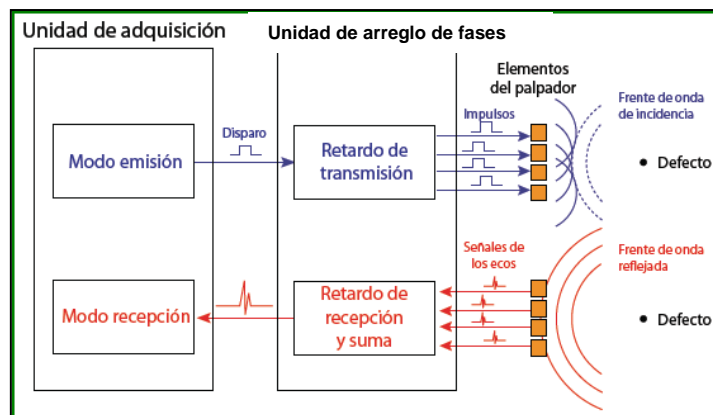


Fig. 33 Diagrama emisión recepción arreglo de fases ^[10]

La técnica de arreglo de fases para la inspección de soldaduras tiene ciertas ventajas sobre otras técnicas; como radiografía, por el hecho de que es posible tener altos rangos de detección para defectos planares críticos, como falta de fusión, fisuras y penetración, que sería un vacío en la soldadura. Las técnicas de arreglo de fases permite hacer barrido, direccionado, escaneo y enfoque del haz ultrasónico, mediante la programación de sus elementos emisores por medio de computadora, como se ilustra en la Fig.34^[12]

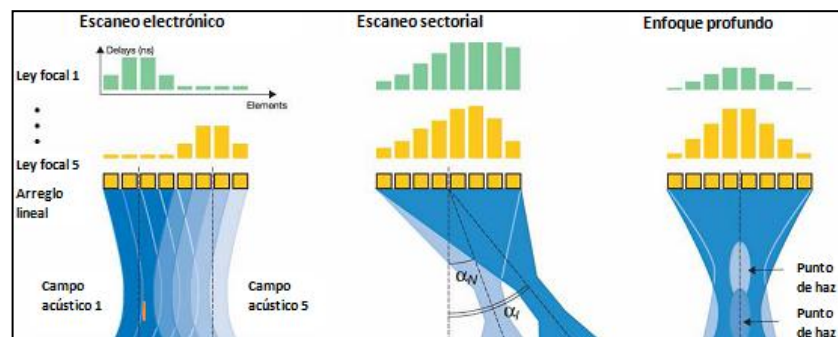


Fig. 34 Sistemas de escaneo y enfoque de arreglo de fases^[12]

El sistema de detección de discontinuidades se ilustra en la Fig.35^[12] donde se observa la emisión guiada y después la recepción de la señal de eco. ^[12]

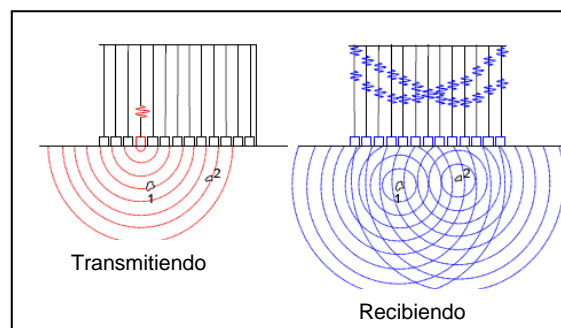


Fig. 35 Visualización de la detección de defectos^[12]

Una de las ventajas más importantes de la técnica ultrasónica de arreglo de fases es en si la programación de los transductores que permiten el escaneo sectorial conocido como S-Scan ya sea en forma lineal o angular como se muestra en la Fig.36^[14], esto permite hacer barridos de soldaduras completas sin necesidad de mover la sonda , ya que por sí solo realizara la inspección y recibirá la información en la misma posición, además de la posibilidad de utilizar

bases de contacto angulares mejorando con esto la posición en soldaduras de traslape y en T, además de que también cuenta con los escaneos principales A,B y C.^[13]

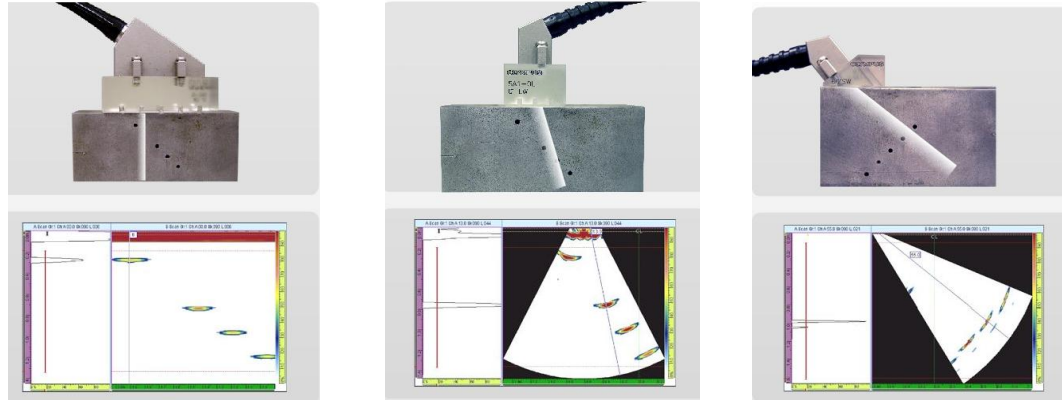


Fig. 36 Modalidades del escaneo sectorial ^[13]

Algunas otras ventajas de la técnica de arreglo de fases son las siguientes

- Velocidad
- Imagen
- Flexibilidad de inspección
- Almacenamiento de datos
- Reproducibilidad

Otra de las ventajas importantes es el escaneo físico de la soldadura ya que por el hecho de poder hacer el escaneo lateral de la soldadura por completo sin tener que mover el transductor, el desplazamiento solo se hace hacia un lado y no de forma alternada como en el ultrasonido convencional, como se puede observar en la Fig.37.^[13]

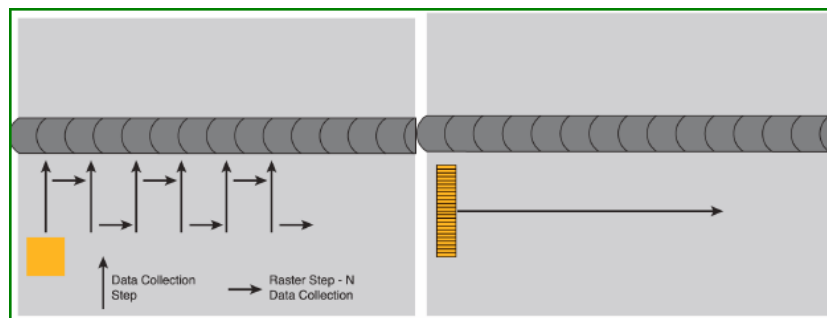


Fig. 37 Escaneo longitudinal ^[9]

2.3.2.2 Inspección de soldaduras mediante arreglo de fases

Las soldaduras son típicamente inspeccionadas con ángulos de sondeo de 45 a 70°, la sonda de haz direccionado puede ser ajustado de 35° a 75° conociendo la geometría de la soldadura(tipo, ancho y espesor) la distancia óptima de la sonda puede ser calculada, empezando a una distancia con el mínimo ángulo de 35° golpea el filo de haz en un rebote, como se observa en la Fig.38^[13], para una soldadura a tope.^[13]

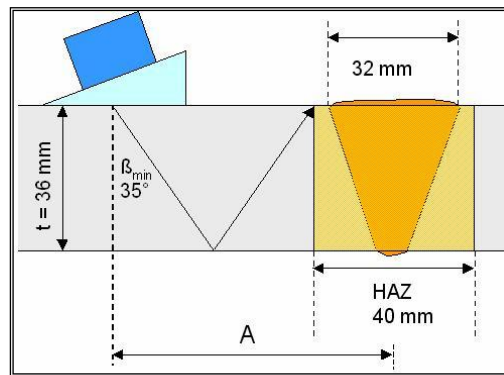


Fig.38 Ángulo de proyección para soldadura a tope ^[13]

La evaluación e interpretación de la soldadura por medio del escaneo sectorial es la siguiente Fig. 39^[13]

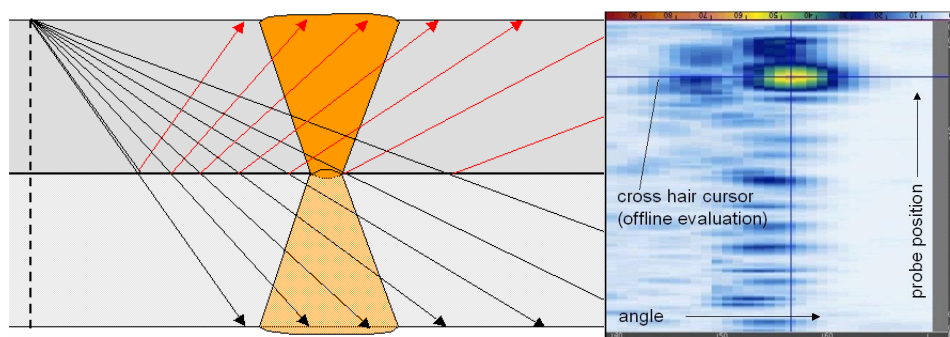


Fig.39 a) Escaneo de soldadura con reflejo montado para el escaneo C b) Vista superior de escaneo C ^[13]

2.3.2.3 Evaluación de Defectos de soldaduras a tope

La imagen sectorial permite directamente la localización y dimensionamiento de las discontinuidades, desde esta imagen es posible diferenciar entre las indicaciones geométricas y los defectos reales como la falta de fusión en la Fig.40 y el comportamiento del eco de la discontinuidad puede ser fácilmente encontrado que el defecto tiene una profundidad total de 6 mm.^[13]

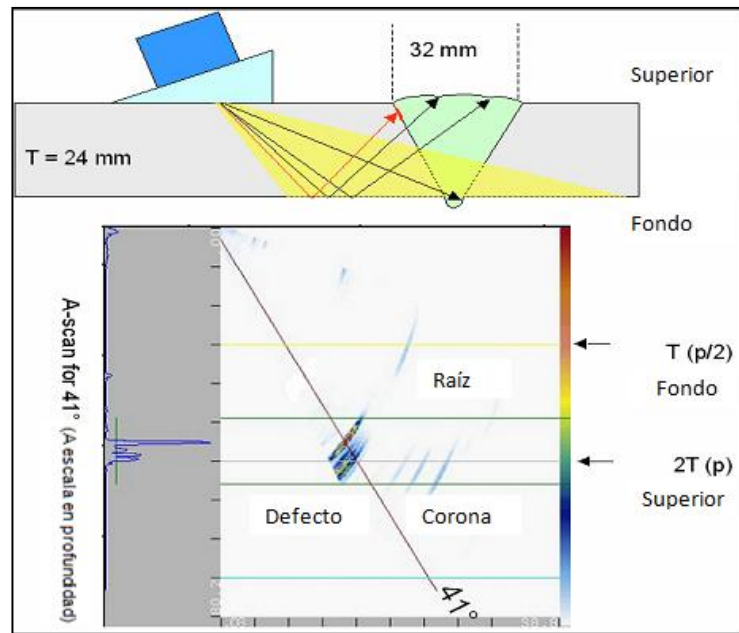


Fig. 40 Falta de fusión en la pared + ecos geométricos^[13]

2.3.2.4 Evaluación de defectos de soldaduras en T y en equina

En el caso de que la superficie opuesta de la soldadura este accesible, la prueba de esas soldaduras es realmente simple y efectiva usando un arreglo lineal, el ancho y cualquier posible defecto de la soldadura puede ser directamente desplegado en el escaneo B, una inspección rápida puede ser realizada como se observa en la Fig.41 ^[13], se puede utilizar también un escaneo C y registrar la imagen. ^[13]

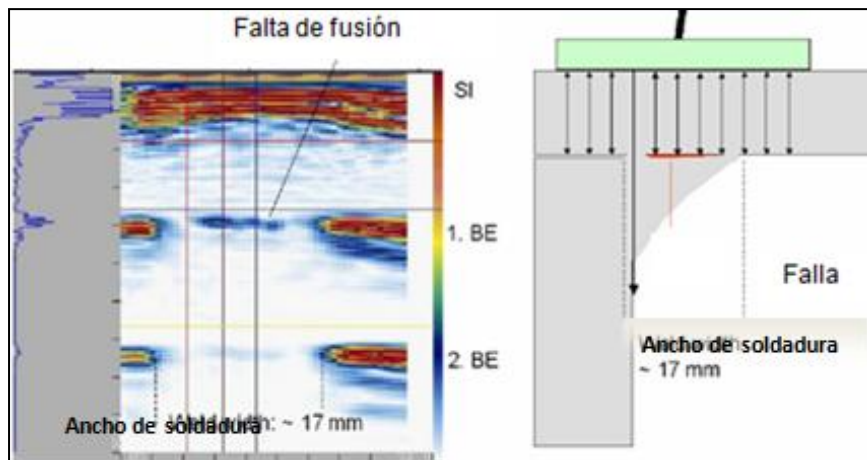


Fig.41 Escaneo de una soldadura en esquina vista en el escaneo B ^[13]

2.3.3 Inspección de soldaduras mediante la técnica ultrasónica de pulso-eco

La técnica pulso-eco fue de las primeras técnicas en utilizarse para la evaluación ultrasónica ya que en esta se utiliza un emisor y un receptor, al salir la técnica pulso eco esta ya no requería un receptor separado, ya que estaba ensamblado en el mismo, la técnica de pulso-eco mezcla estas dos características de emisor y receptor y la técnica eco para evaluar ultrasónicamente, lo que la hace más precisa para la descripción y dimensionamiento de fallas.

En la industria de la soldadura existen una gran configuración de soldaduras y algunas de ellas se consideran soldaduras difíciles para su evaluación:

- Las soldaduras muy delgadas de los asientos de los autos en T y en traslape
- Juntas en T y a tope en la construcción
- Juntas a traslape en la construcción
- Juntas en la construcción para refuerzo

Al realizar una medición la información en la pantalla nos dará un nivel de amplitud, si este nivel de amplitud decrece significa que algo (mala geometría de la sonda, discontinuidades, corte de soldadura más delgado, etc.) detiene parte del haz ultrasónico. Faltas de fusión o inclusiones en el área de la soldadura reducen la fuerza del haz ultrasónico, lo cual nos dice que algo está mal en la unión.

En la Fig. 42^[14] se observa un buen posicionamiento de los transductores que nos darán una buena señal, en la Fig.43^[14] se observa una mala ubicación del emisor lo cual desvía el haz ultrasónico.^[14]

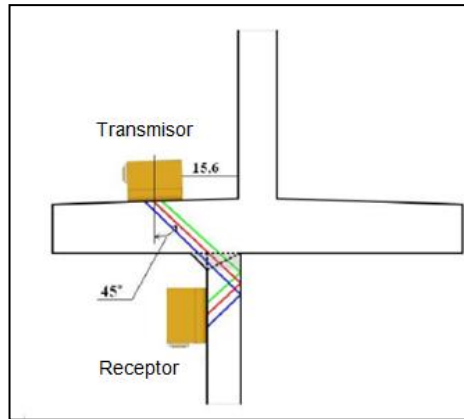


Fig. 42. Transmisión de haz ultrasónico en óptima geometría de prueba. ^[14]

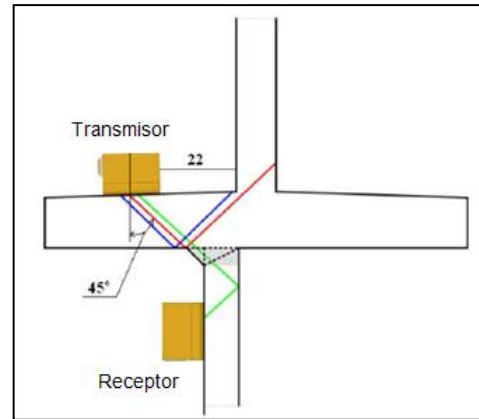


Fig. 43 Transmisión de haz ultrasónico en no óptima geometría de pruebas. ^[14]

En la Fig.44 se observa el patrón en el escaneo A que proporciona la información de la viga que está siendo evaluada, este proceso puede ser mecanizado o manual como se observa en la Fig.45^[14]

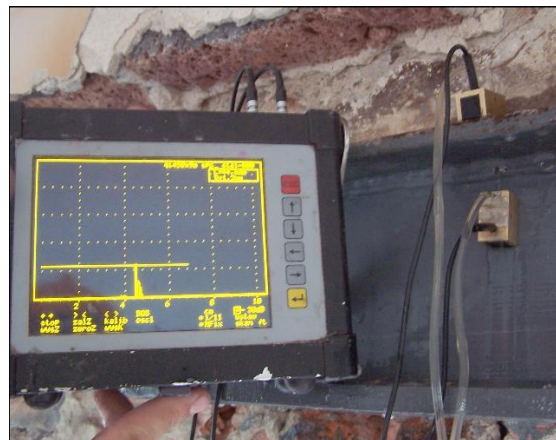


Fig. 44 Escaneo de una junta en T ^[14]

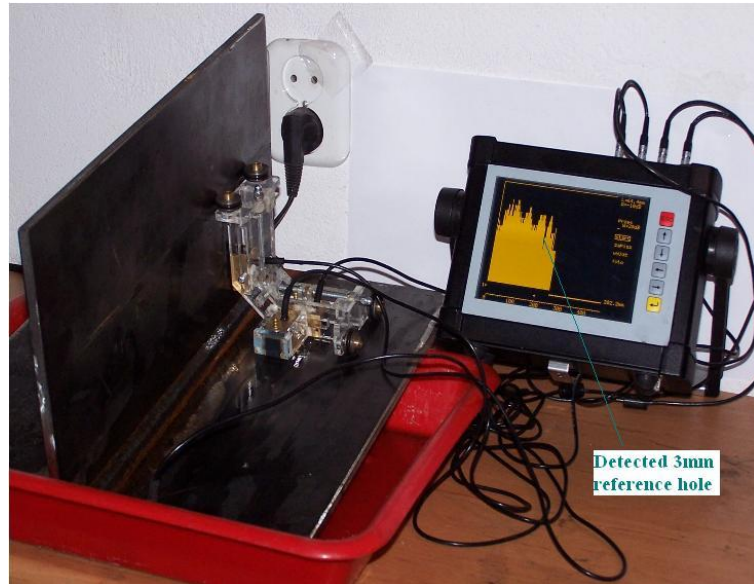


Fig. 45 Sistema mecanizado para detección^[14]

2.4 INSPECCIÓN DE SOLDADURA MEDIANTE TÉCNICAS RADIOGRÁFICAS

Las técnicas radiográficas en la actualidad son las técnicas de mayor uso para la evaluación de soldaduras y que es utilizada en conjunto con otras técnicas para la confirmación de discontinuidades en soldaduras, ésta se basa en la cantidad de radiación que puede ser absorbida por los diferentes materiales ya sea por su densidad o su espesor, está bien definida la teoría y las practicas recomendadas para la misma, tuvo sus orígenes y mayor uso para las aplicaciones médicas y en la actualidad ha tenido una gran cantidad de avances y aplicaciones en el campo industrial, sin duda es la técnica más socorrida para la evaluación se soldaduras en tuberías y otros elementos estructurales.

2.4.1 Inspección radiográfica en tiempo real

Unas de sus variaciones más modernas de la radiografía es la radiografía digital, que consiste en la incidencia de un haz de rayos X a través de una pieza y una posterior recepción de la misma en una pantalla de elementos sensores que pueden ser de silicio amorfo o una pantalla fluoroscópica los cuales reciben los diferentes rangos de radiación que permitió pasar la pieza y mediante diferentes elementos electrónicos y ecuaciones para la transformación de la señal, ésta puede ser interpretada mediante una imagen en una pantalla. Esta técnica sin duda es mucho más rápida que una radiografía convencional de película; la cual necesita tiempo y habilidad para ser revelada. En la técnica de radiografía digital o en tiempo real los datos pueden ser revisados al instante o en un mínimo de tiempo dando una buena resolución y certeza de los defectos, unas desventajas que puede presentar esta técnica es el espacio confinado requerido para la máquina, aunque ya existen algunos dispositivos portátiles como se observa en la Fig.46^[17], otra limitante es la resolución de la imagen que depende del tamaño de la matriz de recepción de la radiación. En la Fig.47^[18] se observan los elementos principales

para la aplicación de la técnica que es una fuente de rayos X, el elemento a inspeccionar y la pantalla receptora de la radiación.



Fig.46 Radiografía en tiempo real portátil^[17]

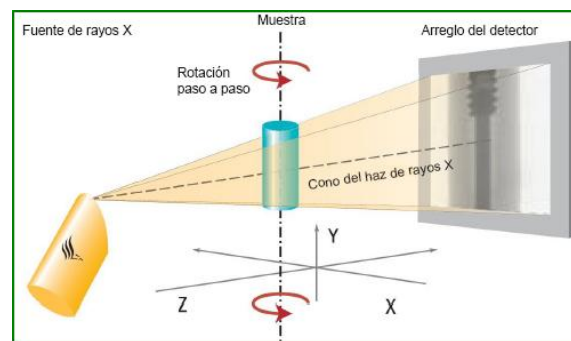


Fig.47 Técnica de radiografía en tiempo real^[18]

En la radiografía en tiempo real además de ser realizada en poco tiempo tiene la posibilidad de ser rotada durante la inspección y ver otras secciones en el mismo tiempo pudiendo de esta forma detectar discontinuidades que no podrían ser visible en otra posición y pudiendo variar los parámetros de inspección para adaptarlos al nuevo espesor o sección al rotarla. Como se puede observar en la Fig. 48 además de los elementos principales también interactúa con una gran variedad de procesadores y controladores los cuales conformaran la imagen final, algunas veces algunos defectos se pueden percibir pero con poca definición y en esos casos se tiende a variar la distancia entre la pieza y la fuente y entre la pieza y la pantalla receptora de la radiación y de esta forma es

posible incrementar el tamaño de zona de inspección y poder percibir las discontinuidades en mayor tamaño. [20]

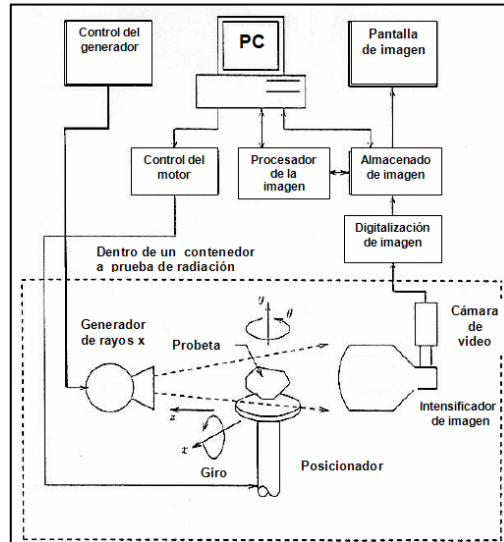


Fig.48 Diagrama general del proceso de radiografía en tiempo real^[19]

Se han realizado aplicación en el campo de la aviación para la inspección de elementos compósitos como lo son las alas de los aviones y algunos otros elementos ligeros dando excelentes resultados mediante la radiografía digital, ewert en su experimentación evaluó mediante esta técnica, elementos de aviones Airbus donde demostró que mediante la técnica de radiografía digital se mejora la eficiencia y la calidad de la imagen en comparación con la radiografía de filme. En la experimentación se utilizó una fuente portable de rayos X, una pantalla de alta sensibilidad de fosforo y un arreglo de detectores digitales, debido a que la fuente de radiación utiliza una técnica de flash, los operadores no son expuestos a altas dosis de radiación. [19]

2.5 TÉCNICAS NO CONVENCIONALES

Dentro de las técnicas de evaluación no destructivas existen algunas otras técnicas que están siendo desarrolladas las cuales están aún en proceso de

investigación. Estas técnicas toman principios como el ultrasonido y las aplican generando los elementos fundamentales mediante otras técnicas.

2.5.1 Visualización ultrasónica laser

Este equipo conocido como LUV por sus siglas en inglés utiliza un laser pulsado para generar la onda ultrasónica, un espejo para enfocar el barrido y un sensor ultrasónico para la recepción de las señales y un software diseñado por LabView como se observa en la Fig.49^[22]

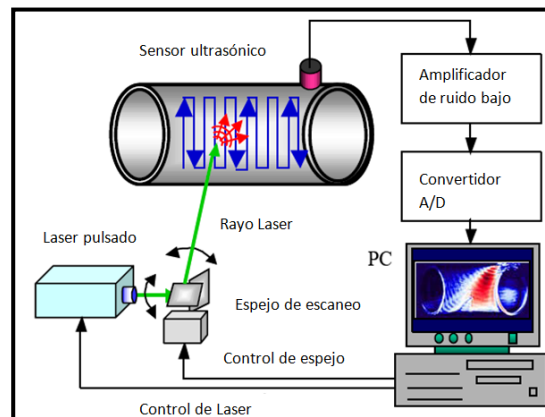


Fig. 49 Configuración de equipo LUV ^[22]

Mediante esta técnica es posible ver la disipación de la onda ultrasónica a través del material, y también los defectos. La técnica genera una onda ultrasónica de excitación térmica mediante el láser de pulsos y detecta la propagación de las señales vía el transductor ultrasónico fijado en una posición. En la Fig.50^[22] se muestra visualizada la propagación del ultrasonido de un tubo de acero inoxidable con corrosión interna por cada 10Ms de tiempo de propagación.

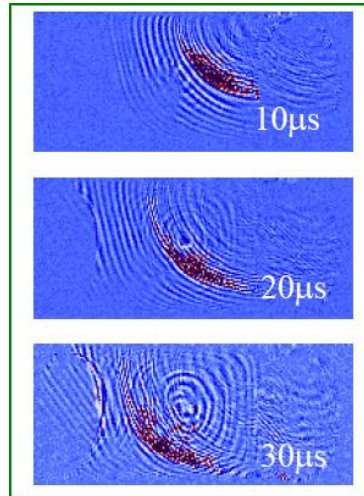


Fig.50 Propagación del ultrasonido cada 10 μ s. [22]

Mediante esta técnica es posible hacer análisis de fallas en elementos diferentes pudiendo cubrir todo el volumen con un barrido.

En la Fig.51 se observa el análisis de un tubo con un pequeño agujero el cual fue detectado mediante esta técnica. [22]

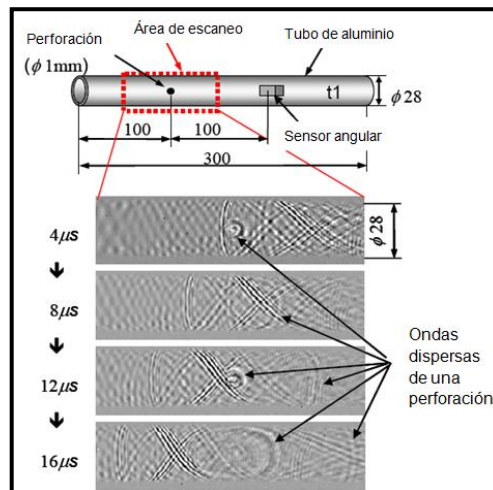


Fig.51 Inspección de tubo de aluminio con un agujero [22]

La técnica de generación de ultrasonido por láser está en constante desarrollo y otra de sus variantes es el hacerla con receptores de no contacto o acoplados con aire como se verá en la siguiente información en donde boro [22], genera ondas guiadas mediante un sistema láser y de recepción ultrasónica, sin contacto para la inspección de fallas en ensayos no destructivos.

Por ser una técnica de recepción por medio de un receptor acoplado por aire, éste está un poco más orientado a la detección de defectos superficiales como lo son pequeñas grietas en superficies, pero utilizando bien los parámetros se logra una penetración bastante buena.

La generación del ultrasonido por alta energía de iluminación láser por nanosegundos genera ondas de esfuerzos ultrasónicos, la frecuencia y dirección de propagación es controlada mediante patrones de iluminación.

Existen 2 tipos de fuentes láser, como se puede observar en la Fig.52^[22].

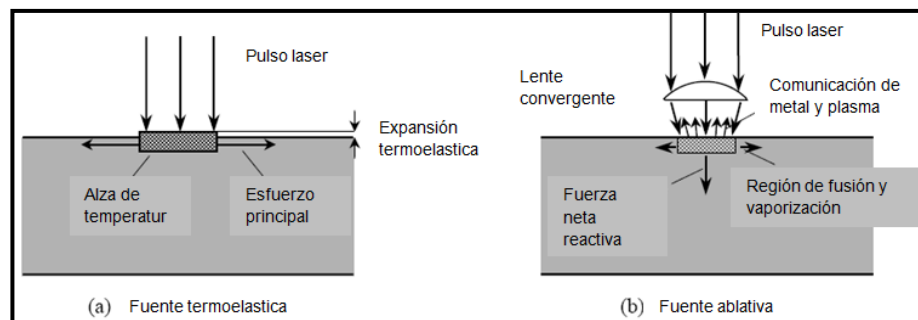


Fig.52 Diferentes tipos de fuentes de generación ultrasónica láser^[22]

La presencia de grietas, cambios de sección, presencia de corrosión, delaminaciones y otros defectos modulan la propagación de la onda y son detectados sin la necesidad de un escaneo de la superficie completa, mediante ésta técnica se pueden inspeccionar estructuras completas sin la necesidad de hacer contacto con la pieza y por un solo lado y con altas velocidades de inspección por no necesitar un acoplamiento.

En la Fig. 53^[23] se muestra la configuración y método de detección de fallas por medio de un escaneo en modalidad A.

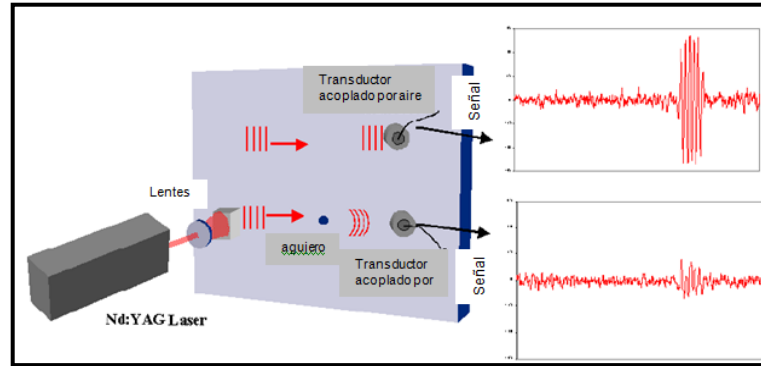


Fig.53 Diagrama de ultrasonido híbrido configuración usando un generador láser y un detector de cople por aire ^[23]

Se realizaron varios experimentos en donde se demostró la eficacia del sistema para la detección de grietas o discontinuidades, en la Fig.54^[23] se muestra los efectos que tiene en la onda la presencia de una grieta en el camino de la misma que transforma la onda de baja frecuencia en una de orden mas alto.

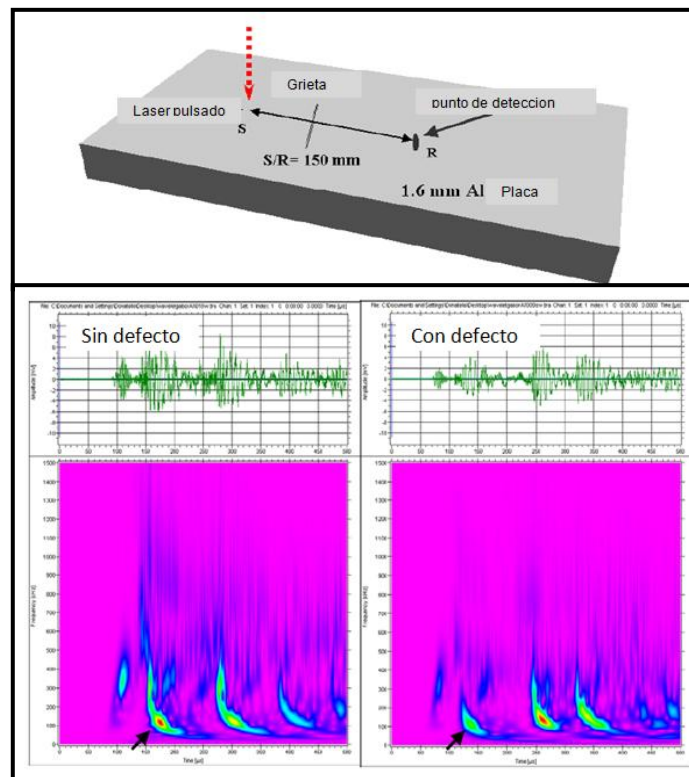
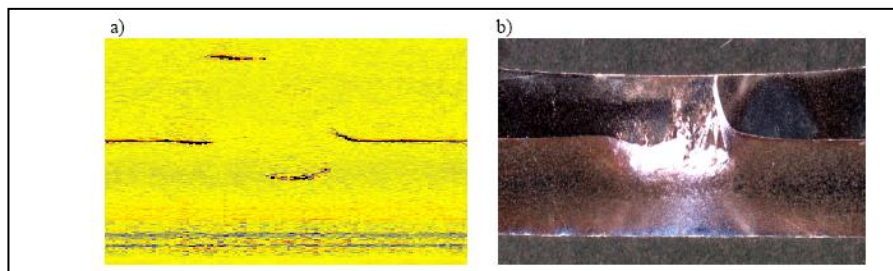


Fig.54 Esquema de realización de experimento para detección de grieta ^[23]

La técnica ha sido también utilizada en el ramo de la industria automotriz para evaluar soldaduras realizadas con método de soldadura por fricción agitación e interpretadas por medio de la técnica láser de inspección ultrasónica, blounin ^[22] en su publicación hace referencia a ésta técnica en varios campos de la industria automotriz como soldadura y elementos vaciados, utilizó la técnica de ultrasonido por láser para la evaluación de soldaduras a traslape por método de soldadura por fricción agitación como se explica a continuación.

Mediante la aplicación del láser ultrasónico y un algoritmo de técnica de apertura de enfoque sintético, propuso la detección de defectos como se puede apreciar en la Fig.55^[23] mediante esta técnica se pudieron detectar los defectos en esa soldadura mediante escaneo C y escaneo B la frecuencia ultrasónica fue de 220 MHz.



Agujeros de gusano por mala relación de rotación

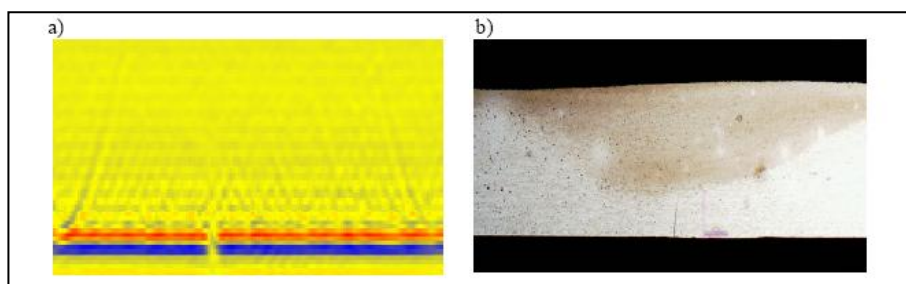


Fig.55 Falta de penetración en soldadura ^[23]

2.5.2 Tomografía computarizada industrial

La técnica de tomografía computarizada un corte delgado de la pieza de prueba es escaneado con un haz delgado de radiación, el cual es atenuado conforme pasa a través de la pieza de prueba. La fracción del haz de rayo-X que es atenuada es directamente relacionada con la densidad y el espesor del material a través del cual el haz viajó y a la composición del material y la energía del haz del rayo X. La tomografía computarizada utiliza esta información desde varios ángulos diferentes, para determinar la configuración del corte seccional con ayuda de un algoritmo de reconstrucción computarizado. Este algoritmo de reconstrucción determina cuantitativamente el mapeo punto por punto y el coeficiente de atenuación relativo de radiación desde una serie de mediciones de radiación unidimensional Fig.56 [4].

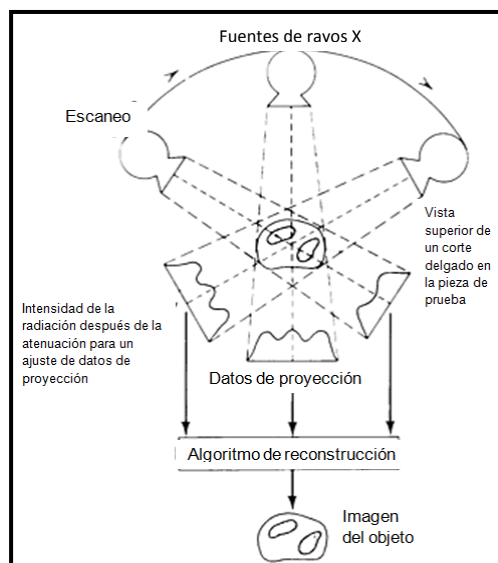


Fig.56 Configuración de sistema tomográfico [4]

El sistema contiene una fuente de radiación y un detector de radiación lineal donde se encuentran los sensores, con un manipulador de precisión para escanear una porción de sección de corte desde diferentes ángulos. El detector de radiación es usualmente un arreglo lineal de sensores de radiación. La fuente de rayos X es colimada para formar un haz de abanico delgado que es lo suficientemente ancho para ser expuesto a todos los elementos del detector. El espesor del haz estrecho define el espesor de los cortes de sección a ser

medidos. El sistema de adquisición de datos lee las señales de cada elemento individual convirtiendo esas mediciones a valores numéricos y transfiriendo esos datos a la computadora para ser procesados. El algoritmo de reconstrucción de imagen genera una imagen de dos dimensiones desde la serie de mediciones de radiación unidimensional tomadas desde diferentes ángulos de escaneo. Los algoritmos de reconstrucción para generar la imagen de TC cae en dos grupos: técnicas de transformadas y técnicas de iteración. El proceso de reconstrucción TC rindiendo un arreglo en dos dimensiones de números correspondientes a la sección de cruce del objeto. Cada uno de esos números es un pixel o elemento de la figura en la imagen de corte seccional Fig.59, la imagen reconstruida es un arreglo de muchos valores de pixeles por imagen, los arreglos tienen tamaños de 128 X128, 256 X 256, 512 X 512 o 1024 X 1024 pixeles por arreglo. Debido a que la medición de la transmisión de escaneo está hecho con haz de rayo X de un espesor determinado (Fig.57a)^[4], el valor del pixel en la imagen de dos dimensiones corresponde a un volumen del material en el objeto referido como voxel o volumen del elemento (Fig.57b)^[4].

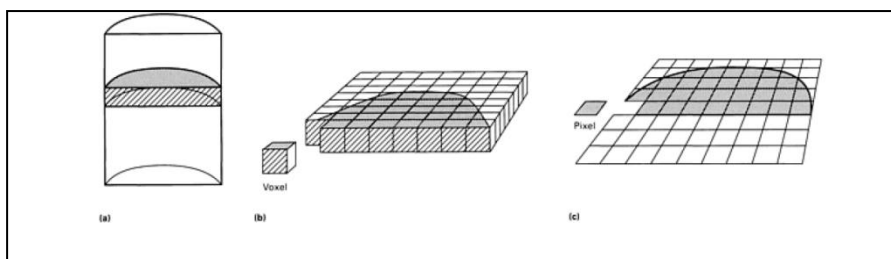


Fig. 57 Componentes de una imagen de tomografía computarizada^[4]

Los valores de los pixeles usualmente, es un valor integral que es proporcional al promedio del coeficiente de atenuación lineal del rayo X del material en el correspondiente voxel. El coeficiente de atenuación lineal es, aproximadamente proporcional a la densidad física del material y es función del número atómico efectivo del material y la distribución espectral del haz del rayo X. Debido a que esos valores de pixeles son más o menos proporcionales a la densidad del material son algunas veces referidos como densidad o como

valores de densidad de rayos X. Este es un concepto muy útil en la interpretación de imágenes, pero es necesario recordar que otros factores afectan este valor cuando los objetos contienen múltiples materiales o cuando las imágenes obtenidas a diferentes energías son comparadas.

Para permitir la interpretación de la información en los números de arreglos reconstruidos, esta información se muestra visualmente como una imagen. La percepción humana es limitada y no puede distinguir los muchos miles de tonos de niveles de densidad que se pueden presentar en una simple imagen. Para distinguir pequeñas diferencias de densidad sobre un gran rango de densidades, el sistema muestra un rango limitado de números TC sobre el rango de escala de grises completo de la pantalla visual y es una poderosa herramienta para el análisis de imágenes en pantalla. El color también puede ser usado para mejorar la imagen mostrada donde los rangos de los números TC son presentados con un color particular. Las escalas de colores pueden ser fijados como los colores del arcoíris, como tonos de color particular o como un cuerpo de espectro caliente imitando los colores emitidos como si el objeto fuera calentado.^[2]

Instituciones como el Centro Tecnológico AIMEN han desarrollado sistemas tomográficos para la evaluación de defectos, utilizándolo como un sistema END. En la institución desarrollaron un sistema con fines de utilizarlo para la inspección como ensayos no destructivos, desarrollaron un sistema de inspección tomográfico que también pueden proporcionar imágenes radiográficas digitales (CT/DR) para ensayos dimensionales y no destructivos, el sistema incluye un detector con un arreglo de 1280 elementos activos con espaciamientos submilimétricos y un tubo de rayos X mini-focus de 225 KV con un sistema integrado de 3 ejes para el posicionamiento de la pieza y los elementos emisor y detector, la longitud total del equipo es de 1mt. Se desarrolló también un software para la visualización y análisis automatizado de las radiografías, tomografías y la generación de imágenes 3D de los cortes de tomografía, en la Fig.58 se observa la configuración del sistema.^[24]



Fig.58 Configuración de sistema tomográfico [23]

El software de control fue desarrollado en LabView integrando el posicionador mecánico y la adquisición de datos. Mediante el software se pueden controlar la inicialización del sistema y permite la selección de los parámetros relacionados con la adquisición, como el tiempo de integración, número de subejemplos, modo de escaneo y geometría, espaciamento entre corte hasta 0.1mm y el número de proyecciones, ver Fig.59^[24].

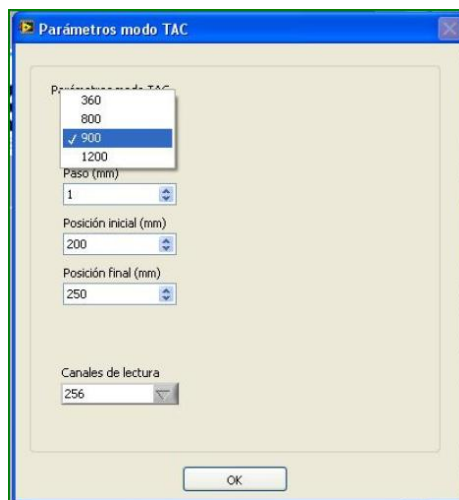


Fig.59 Parámetros de control de software^[24]

Otra de las características del software es la paleta de colores mediante la cual se pueden visualizar diferentes colores y tonalidades, el ojo humano puede distinguir miles de colores pero solo algunos niveles de grises no mas de 100.

La aplicación de las paletas de pseudocolor permite al usuario visualizar detalles de diferentes estructuras en la imagen como se puede observar en la Fig.60 ^[25] donde se inspecciona un tubo de arena.

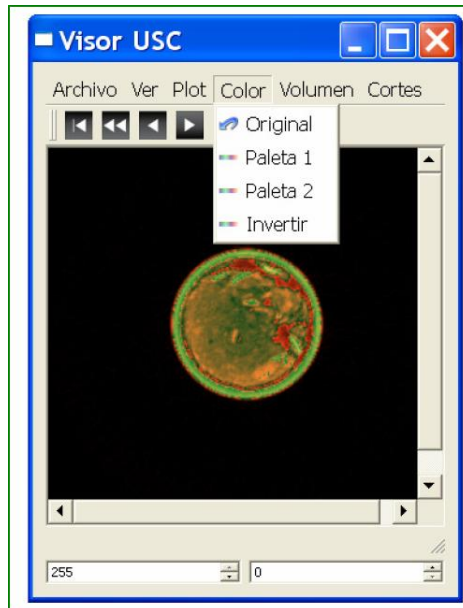


Fig.60 Paleta de Pseudocolores^[25]

El menú también permite presentar el perfil de escala de grises para las coordenadas de los píxeles como se observa en la Fig. 61^[25]

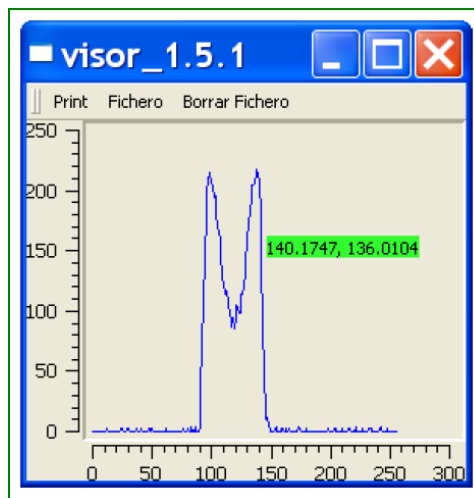


Fig.61 Perfil de escala de grises por píxeles^[25]

Una de las principales ventajas de los equipos tomográficos es poder realizar cortes individuales (slice) y poder unirlos para formar el 3D de la pieza que se

encuentra en inspección o analizar cortes en partículas para evaluar alguna característica en especial, en la Fig.62 , donde se observa una soldadura en aluminio en la imagen a) una radiografía frontal de la pieza y se observan una gran cantidad de poros, haciendo una inspección tomográfica se pueden observar claramente estos poros e incluso pueden ser medidos para verificar dimensiones y posición , haciendo esto de una manera más rápida y dando la posibilidad de obtener una imagen 3D de la pieza.^[26]

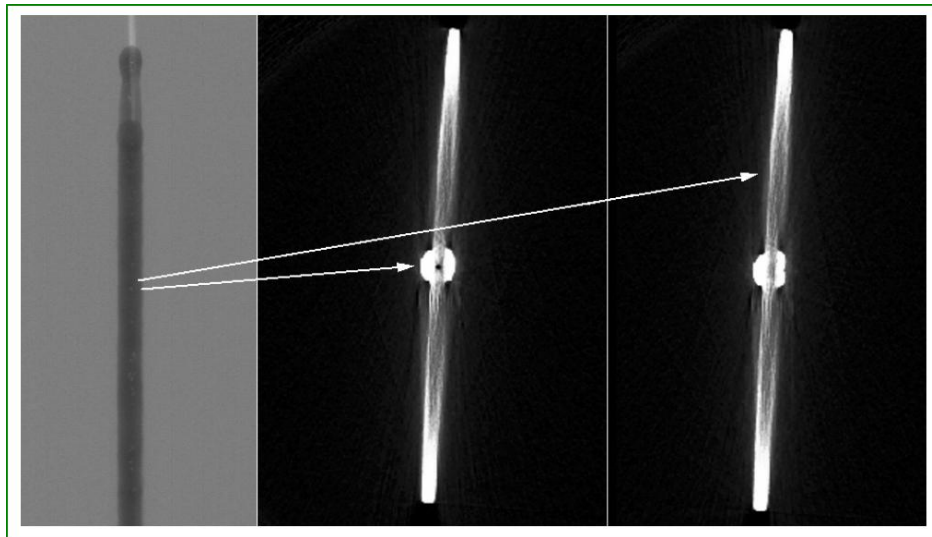


Fig.62 Imagen radiográfica de soldadura a) radiografía frontal, b) y c) cortes de las secciones señaladas donde se pueden observar poros.^[26]

Se han desarrollado equipos tomográficos capaces de inspeccionar soldaduras en campo por medio de tomografía computarizada proporcionando buena resolución y precisión de los defectos. Equipos de este tipo utilizan una fuente de rayos X y una matriz receptora, el viaje del tubo de rayos X se realiza en forma paralela al tubo, para tener mejor ángulo para la detección de discontinuidades como se observa en la Fig.63^[26], los pasos para la adquisición de los datos en la tubería para la reconstrucción son los siguientes:

- Movimiento del tubo de rayos X paralelo al eje del tubo.
- Adquisición de cientos de proyecciones
- Reconstrucción de la sección cruzada

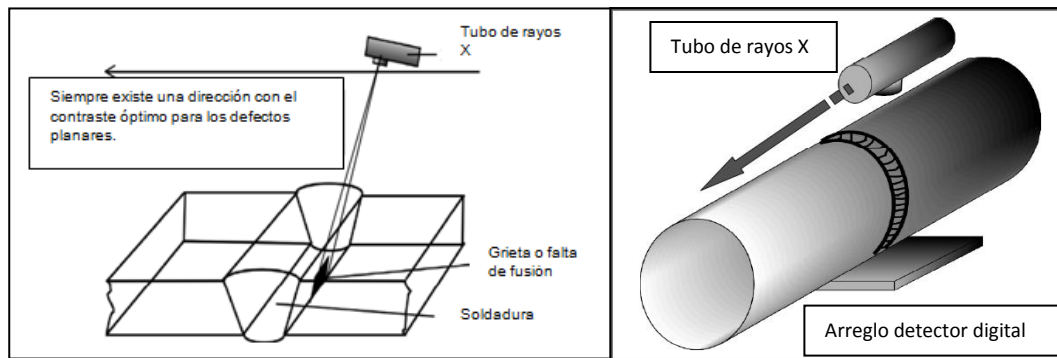


Fig.63 Adquisición de datos TAC^[26]

Mediante esta técnica es posible obtener imágenes muy exactas que nos pueden mostrar las discontinuidades con una precisión muy cercana a la real, en la Fig. 64 se observa la diferencia entre una metalografía y un escaneo tomográfico, el cual puede ser también integrado para formar el 3D de la soldadura.^[26]

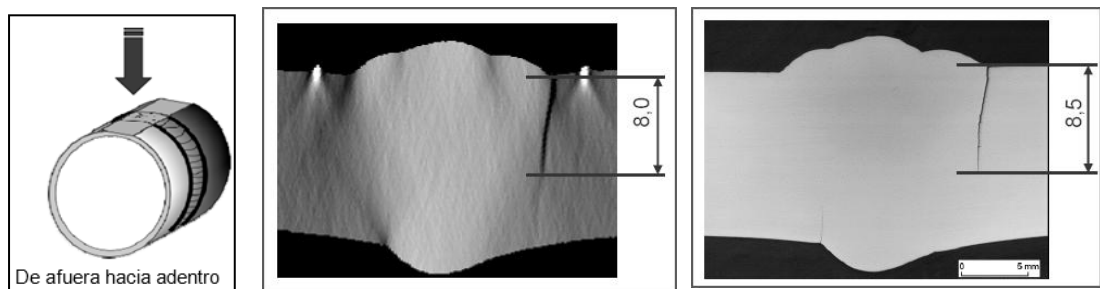


Fig.64 a) Zona de escaneo b) Metalografía c) Escaneo tomográfico^[26]

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CONVENCIONALES

Las técnicas convencionales proporcionan las bases fundamentales para la aplicación de técnicas más modernas mas no constituyen un factor decisivo para la resolución del problema en discusión, el problema requiere una técnica de penetración suficiente para detectar zonas fusionadas, dentro de la bibliografía consultada se encontraron las técnicas convencionales como lo son líquidos penetrantes, partículas magnéticas; estas técnicas no proporcionan suficiente penetración para llegar a la zona de conflicto por lo tanto deben de ser descartadas, las técnicas convencionales de radiografía y ultrasonido proporcionan información acerca de discontinuidades planas y volumétricas pero están limitadas por la posición de las mismas además de que no son capaces de visualizar la zona de fusión como dos elementos diferentes para poder medirla, sin embargo son capaces de detectar faltas de fusión y faltas de penetración además de algunas fallas volumétricas como poros.

3.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS NO CONVENCIONALES

3.2.1 Ensayos no destructivos ultrasónicos

Los ensayos ultrasónicos constituyen una gran fuente de obtención de información acerca de discontinuidades como el ensayo de arreglo de fases por medio del cual se pueden detectar discontinuidades como falta de penetración o falta de fusión que son discontinuidades que aborda la problemática, mas sin

embargo las técnicas como el ultrasonido de no contacto aun requiere más investigación y desarrollo para poder evaluar si es factible la visualización no solo de defectos si no de los pequeños cambios que produciría un cambio en la metalurgia del metal base y de la soldadura para así poder definir dicha zona.

3.2.2 Ensayos no destructivos tomográficos

La inspección tomográfica industrial ha tenido grandes adelantos en el campo de la investigación de defectos o discontinuidades en piezas de producción, por medio de esta técnica es posible ver el volumen de la muestra en inspección y conocer sus atributos físicos, al trabajar esta técnica con factores de atenuación de la radiación; tal vez podría ser factible la investigación en este campo para poder detectar por medio de las diferentes tonalidades que se presentarían por el cambio de atenuación, la zona de fusión y poder medirla, pero una de sus limitantes más importantes es el tiempo de inspección necesario, ya que puede extenderse y varias horas dependiendo de la geometría y tamaño de la pieza.

Tabla 4.- Comparativa de las técnicas de inspección

Técnica	Tiempo de inspección	Costo	Penetración
Inspección visual	Medio	Bajo	Superficial
Líquidos penetrantes	Alto	Bajo	Superficial
Partículas magnéticas	Alto	Bajo	Superficial
Radiografía convencional	Alto	Alto	volumétrico
Radiografía en tiempo real	Bajo	Alto	Volumétrico
Tomografía computarizada	Alto	Alto	Volumétrico
Ultrasonido convencional	Alto	Medio	Volumétrico
Ultrasonido arreglo de fases	Medio	Alto	Volumétrico
Ultrasonido EMAT (ondas guiadas)	Medio	Medio	Volumétrico
Ultrasonido laser (LUV)	Medio	Alto	Volumétrico

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

Después del análisis bibliográfico se llegó a las siguientes conclusiones:

- Las técnicas de inspecciones convencionalmente utilizadas en la industria de la soldadura son limitadas para detectar las características requeridas por el proceso.
- Las técnica de ultrasonido es capaz de detectar y dimensionar algunos tipos de fallas; como faltas de fusión y penetración, pero esta limitado en su modalidad de contacto por la geometría de la pieza de inspección.
- La técnica ultrasónica sin contacto como lo es el ultrasonido en su modalidad EMAT y laser pueden ser capaces de detectar fallas en la zona de fusión; más esto sería de forma cualitativa y no cuantitativa.
- Utilizando una técnica de inspección cualitativa puede ser posible valorar las soldaduras, pero esto requeriría de la modificación de la norma de inspección, la cual rige los procedimientos de inspección internos en la empresa.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Daimler Chrysler Corporation, Process Stándar For Arc Welding Automotive Components ps-9472, 2004, United States of America.
- [2] Metalsa, planta Derramadero, abril 2010, Saltillo, Coahuila, México
- [3] America society for nondestructive testing, nondestructive testing handbook volume 17 ultrasonic testing, 2007, United States of America
- [4] ASM Internacional, ASM handbook volume 7 nondestructive evaluation and quality control, 2006, United States of America
- [5] Trimm, M, Practical failure analysis the periodical volume 3, 2008, United States of America
- [6] Magnetic analysis corporation, Flaw detection using ultrasonic test techniques, 2008, www.mac-ndt.com
- [7] Roye, W, “nondestructive inspection methods in the automotive industry”, ecndt conference, 2006, España.
- [8] Barkhatov ,V , Development of methods of ultrasonic nondestructive testing of welded joints, 2003, Russia.
- [9] Borja Lopez, Weld inspection with emat using guided waves. , 2008,
- [10] Berke, M , Buechler, J, Practical experiences in manual ultrasonic phased array 17th world conference on nondestructive testing, 2008 , China.
- [11] Ik-keun, Fillet weldments monitoring using non-contact EMAT techniques, 2006, korea.
- [12] Moles, M, Phased arrays for pipeline girth weld inspections, 2007,Argentina.
- [13] Bulavinov, A , Real-time quantitative ultrasonic inspection, 2007, Argentina.
- [14] Michnowski, R, Ultrasonic examination of „difficult” welds wladyslaw, 2008, China.
- [15] <http://www.olympus-ims.com>
- [16] <http://www.ndt.net>
- [17] <http://www.sentinelndt.com>, 2007
- [18] <http://www.ilog.net>,inspección de rayos x y tomografía computarizada

- [19] Lara, J, Leon, G, Avances tecnológicos en la inspección radiográfica, 2006, México.
- [20] Wang, B, Takatsubo, J , The development of laser ultrasonic visualization equipment and its application in nondestructive inspection, 2008, China
- [21] Ewert, U, Redmer, B, Radel, C, Mobile x-ray inspection of light weight materials, 2009, Alemania.
- [22] Blounin, A, kruger S, Levesque, D, Applications of laser-ultrasonics to the automotive industry, 2008 , Canadá.
- [23] Djordjevic, B, Cerniglia, D , Cosenza, C , Guided wave non-contact ultrasonic for nde, 2004, USA.
- [24] Franco, L, Martínez, Juan, An own-developed ct/dr system for visualization and defect recognition in ndt, 2010, España.
- [25] Franco, L, Gómez, F, Iglesias, A, Industrial radiography and tomography based on scanning linear scintillator array, 2007, España.
- [26] Ewert, U, Radel, C, Mobile tomographic inspection of girth welds and aircraft components with tomocar and its qualification procedure, 2009, Alemania.
- [27] Metalsa, Propuesta técnica para proyecto de inspección de soldadura, Fomix, 2009.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.- Clasificación de las fallas volumétricas y los métodos de detección NDE

Tabla 2.- Clasificación de las fallas planas y los métodos de detección NDE

Tabla 3.- Métodos NDE para la detección de fallas interiores y de superficie

Tabla 4.- Comparativo de las técnicas de inspección

LISTADO DE FIGURAS

- Fig. 1 Soldadura de ranura en chasis, ranura flare
- Fig. 2 Soldadura de ranura en chasis, ranura en V.
- Fig. 3 Unión en T con soldadura de filete con fusión incompleta
- Fig. 4 Unión en T con soldadura de filete y apertura de raíz
- Fig. 5. Chasis después de prueba
- Fig. 6 Soporte de cabina
- Fig.7 La probabilidad de detección para una indicación positiva verdadera. ^[4]
- Fig. 8 Equipo óptico
- Fig. 9 Líquido penetrante
- Fig. 10 Líquido revelador
- Fig. 11 Principio de campo magnético
- Fig. 12 Esquema de análisis ultrasónico
- Fig. 13 Técnicas de Escaneo
- Fig.14 Principio de la radiografía
- Fig.15 tipos de bobinas para inspección por corrientes de Eddy.
- Fig. 16 Inspección ultrasónica de soldadura de puntos
- Fig. 17 Datos de inspección ultrasónica
- Fig. 18 Inspección por ondas guiadas
- Fig. 19 Esquema de inspección
- Fig. 20 Inspección de soldaduras de carrocería
- Fig. 21 (a) Falta de fusión (b) falta de fusión, (c) falta de penetración, (d) falta de penetración
- Fig. 22 Distribución de los métodos no destructivos principales
- Fig. 23 a) Para un haz directo desde el transductor b) Para un haz simple reflejado
- Fig. 24 a) Por un haz directo desde el transductor b) Esquema de combinación separada

- Fig. 25 a) Por un haz reflejado desde el transductor b) Esquema de combinación separada
- Fig. 26 Comparaciones de un transductor piezoeléctrico con un EMAT
- Fig. 27 Escaneo vertical vs escaneo horizontal
- Fig. 28 Patrones de ondas
- Fig. 29 Configuraciones EMAT de contacto y sin contacto
- Fig. 30 Espécimen de prueba
- Fig. 31 Ondas de detección de contacto con superficie
- Fig.32 Onda CH sin contacto
- Fig. 33 Diagrama emisión recepción arreglo de fases
- Fig. 34 Sistemas de escaneo y enfoque de arreglo de fases
- Fig. 35 Visualización de la detección de defectos
- Fig. 36 Modalidades del escaneo sectorial
- Fig. 37 Escaneo longitudinal
- Fig.38 Ángulo de proyección para soldadura a tope
- Fig.39 a) Escaneo de soldadura con reflejo montado para el escaneo C b) Vista superior de escaneo C
- Fig. 40 Falta de fusión en la pared + ecos geométricos
- Fig.41 Escaneo de una soldadura en esquina vista en el escaneo B
- Fig. 42. Transmisión de haz ultrasónico en óptima geometría de prueba.
- Fig. 43 Transmisión de haz ultrasónico en no óptima geometría de pruebas.
- Fig. 44 Escaneo de una junta en T
- Fig. 45 Sistema mecanizado para detección
- Fig.46 Radiografía en tiempo real portátil
- Fig.47 Técnica de radiografía en tiempo real
- Fig.48 Diagrama general del proceso de radiografía en tiempo real
- Fig. 49 Configuración de equipo LUV
- Fig.50 Propagación del ultrasonido cada 10 μ s.
- Fig.51 Inspección de tubo de aluminio con un agujero
- Fig.52 Diferentes tipos de fuentes de generación ultrasónica láser

Fig.53 Diagrama de ultrasonido híbrido configuración usando un generador láser y un detector de cople por aire

Fig.54 Esquema de realización de experimento para detección de grieta

Fig.55 Falta de penetración en soldadura

Fig.56 Configuración de sistema tomográfico

Fig. 57 Componentes de una imagen de tomografía computarizada

Fig.58 Configuración de sistema tomográfico

Fig.59 Parámetros de control de software

Fig.60 Paleta de Pseudocolores

Fig.61 Perfil de escala de grises por pixeles

Fig.62 Imagen radiográfica de soldadura a) radiografía frontal, b) y c) cortes de las secciones señaladas donde se pueden observar poros.

Fig.63 Adquisición de datos TAC

Fig.64 a) Zona de escaneo b) Metalografía c) Escaneo tomográfico