

Análisis morfológico en uniones soldadas mediante el uso de ensayos no destructivos específicos para la identificación de socavado interno y falta de penetración en juntas de tuberías de acero ASTM A36.

Sergio Andres Hurtado Avella

Director:

Elver Carvajal

Codirector:

Gilberto Quintero mantilla

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Mecánica
División de ingenierías
Bogotá D.C.
2014

Análisis morfológico en uniones soldadas mediante el uso de ensayos no destructivos específicos para la identificación de socavado interno y falta de penetración en juntas de tuberías de acero ASTM A36.

Sergio Andres Hurtado Avella
1015424545

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Director:
Elver Carvajal
Codirector:
Gilberto Quintero mantilla

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Mecánica
División de ingenierías
Bogotá D.C.
2014

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo constante e incondicional, esmero y paciencia, lo cual fue indispensable para lograr la finalización de una etapa muy importante en mi vida.

A mis directores de tesis quienes asumieron la dirección de este proyecto de grado que a su vez me aportaron con sus metodologías y experiencias tanto en la teoría como en la práctica.

CONTENIDO

RESUMEN	14
1 GENERALIDADES.	15
1.1 INTRODUCCION.....	15
1.2 JUSTIFICACION	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo general:	17
1.3.2 Objetivos específicos:.....	17
2 MARCO TEORICO	18
2.1 MATERIAL ASTM A36.	18
2.2 PROCESO DE SOLDADURA SMAW. (SOLDADURA DE ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO)	20
2.2.1 Principio de funcionamiento.....	21
2.2.2 Capacidades y Limitaciones del proceso.	22
2.2.3 Características eléctricas, elementos y variables que interfieren en el proceso SMAW	22
2.3 GEOMETRÍA DE LAS JUNTAS DE SOLDADURA.....	25
2.4 DISCONTINUIDADES.....	28
2.4.1 Falta de Penetración.....	29
2.4.2 Socavado Interno.	30
2.5 INFORME DE EVALUACIÓN WPS	31
2.6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	34
2.6.1 Líquidos penetrantes.	36
2.6.2 Partículas Magnéticas.	40
2.6.3 Ultrasonido.	45
2.6.4 Radiografía.....	54
3 EXPERIMENTACION.....	57
3.1 VARIABLES CRÍTICAS DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA.	57

3.2	FABRICACIÓN DE PROBETA A UTILIZAR.	62
3.2.1	WPS - ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	65
3.3	UTILIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	67
3.3.1	Ensayo de Líquidos Penetrantes.....	72
3.3.2	Ensayo de Partículas Magnéticas.	79
3.3.3	Ensayo de Ultrasonido Phase Array.	84
3.3.4	Ensayo de Radiografía.	101
3.4	TABLA DE COMPARACIÓN DISCONTINUIDADES – ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.	102
3.5	ENSAYO DESTRUCTIVO	104
3.6	REDACCIÓN ARTÍCULO.....	108
4	CONCLUSIONES.....	109
5	RECOMENDACIONES.....	110
6	LISTA DE REFERENCIAS.....	111

LISTA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1: Componentes principales del proceso SMAW	21
Ilustración 2: Soldaduras aplicables en junta a tope	26
Ilustración 3: Diversas geometrías para juntas a tope	27
Ilustración 4: Características de Junta a tope.....	28
Ilustración 5: Discontinuidad de Falta de penetración en una junta a tope	29
Ilustración 6: Discontinuidad de socavado en una junta a tope.....	30
Ilustración 7: Líneas de flujo del campo magnético.....	40
Ilustración 8: Incidencia perpendicular del haz sónico	48
Ilustración 9: Incidencia angular del haz sónico.....	49
Ilustración 10: Definición grafica de zona muerta	49
Ilustración 11: Representación A-Scan por ultrasonido.....	52
Ilustración 12: Representación C-Scan por ultrasonido.....	53
Ilustración 13: Representación S-Scan por ultrasonido	53
Ilustración 14: Guía de selección de procesos y aportes para aceros estructurales ASTM	57
Ilustración 15 : Discontinuidades que aparecen fundamentalmente en el proceso de soldadura.....	58
Ilustración 16: Curva volt-ampere típica para fuentes de potencia de corriente constante y de voltaje constante	59
Ilustración 17: Comparación diámetro del electrodo	61
Ilustración 18: Posición de soldeo 6G.....	62
Ilustración 19: Imagen de la probeta en 3D (Realizada en Solid Works).....	63
Ilustración 20: Dimensiones de la junta a soldar.....	63
Ilustración 21: Presentación de la junta soldada.....	67
Ilustración 22: Presentación de la junta soldada.....	68
Ilustración 23: Raíz de la junta soldada.....	68

Ilustración 24 : Discontinuidad de falta de penetración inducida en la probeta.	69
Ilustración 25: Morfología de la discontinuidad de falta de penetración.....	69
Ilustración 26: Discontinuidad de socavado interno inducido en la probeta	70
Ilustración 27: Morfología de la discontinuidad de socavado interno	70
Ilustración 28: Ubicación y longitudes aproximadas de las discontinuidades en la probeta soldada	71
Ilustración 29: Kit de Líquidos penetrantes.....	73
Ilustración 30: Limpieza de la superficie.....	74
Ilustración 31: Aplicación de Líquidos Penetrantes.....	75
Ilustración 32: Remoción del exceso del penetrante.....	76
Ilustración 33: Aplicación de revelador en presentación.	76
Ilustración 34: Aplicación de revelador en presentación.....	77
Ilustración 35: Aplicación de revelador en la raíz (Falta de penetración)	77
Ilustración 36: Aplicación de revelador en la raíz (Socavado interno).....	78
Ilustración 37: Yugo Magnético y Bulbo	79
Ilustración 38: Ubicación del Yugo en la raíz del cordón de soldadura.....	81
Ilustración 39: Ubicación del Yugo en la presentación del cordón de soldadura.	82
Ilustración 40: Falta de penetración (1) y socavado interno (2) por END de Partículas Magnéticas	82
Ilustración 41: Equipo Olympus OmniScan (Izquierda), Acoplante (Derecha).....	84
Ilustración 42: Palpador 5L64 A12 (Izquierda), Zapata SA12-N555 (Derecha)	85
Ilustración 43: Trayectoria del palpador sobre la probeta.....	85
Ilustración 44: Toma 1 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)	89
Ilustración 45: Toma 2 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)	90
Ilustración 46: Toma 3 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)	91
Ilustración 47: Toma 4 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)	92

Ilustración 48: Toma 5 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)	94
Ilustración 49: Toma 1 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno).....	95
Ilustración 50: Toma 2 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno).....	96
Ilustración 51: Toma 3 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno).....	97
Ilustración 52: Toma 4 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno).....	98
Ilustración 53: Toma 5 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno).....	99
Ilustración 54: Comparación grafica de las discontinuidades.	103
Ilustración 55: Grafica esfuerzo - deformación.....	104
Ilustración 56: Dimensiones de las probetas para ensayo de tracción	105
Ilustración 57: Maquina Universal de pruebas destructivas	105
Ilustración 58: Prueba de tensión de probeta.	107
Ilustración 59: Probetas de ensayo a tracción finalizado. 1) Probeta sin discontinuidad, 2) Probeta con Fala de penetración, 3) Probeta con socavado interno.....	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Requerimientos a tensión para aceros estructurales ASTM A36	19
Tabla 2: Composición química acero estructural ASTM 36	19
Tabla 3: Ejemplo de WPS (Welding Procedure Specification)	33
Tabla 4: Técnicas de limpieza en líquidos penetrantes.	38
Tabla 5: Técnicas de aplicación del penetrante	39
Tabla 6: Técnicas de eliminación del exceso de penetrante.....	39
Tabla 7: Técnicas de aplicación del revelador.....	39
Tabla 8: Tipos de campo magnético	43
Tabla 9: Tipos de magnetización.....	44
Tabla 10: Tipos de onda	48
Tabla 11: Tipos de palpadores utilizados para ultrasonido industrial	50
Tabla 12: Métodos y técnicas de ultrasonido.	51
Tabla 13: Geometría y dimensiones de probeta	63
Tabla 14: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Falta de penetración. 64	
Tabla 15: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Socavado Interno.	64
Tabla 16: WPS - Especificación de procedimiento de soldadura.....	66
Tabla 17: Valores obtenidos del Ensayo no destructivo de Ultrasonido	100
Tabla 18: Tabla de comparación Discontinuidades Vs Ensayos no destructivos.....	102
Tabla 19: Resultados pruebas de tensión en la maquina universal.	106

LISTA DE DIAGRAMA DE FLUJO

Diagrama de flujo 1: Procedimiento Ensayo no destructivo de Líquidos Penetrantes.....	72
Diagrama de flujo 2: Procedimiento Ensayo no destructivo de Partículas Magnéticas	80
Diagrama de flujo 3: Procedimiento Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array ..	86

LISTA DE ANEXOS.

Anexo 1: Electrodo para soldar aceros al carbono (AWS: A5.1)

Anexo 2: Artículo de investigación sobre: Análisis morfológico en uniones soldadas mediante el uso de ensayos no destructivos específicos para la identificación de socavado interno y falta de penetración en juntas de tuberías de acero en ASTM A36.

RESUMEN

Este documento presenta el proyecto correspondiente al análisis morfológico en uniones soldadas realizadas por el proceso de soldadura SMAW mediante el uso de ensayos no destructivos específicos para la identificación de socavado interno y falta de penetración en juntas de tuberías de acero ASTM A36, con el objetivo de profundizar en la evaluación de las discontinuidades halladas mediante los ensayos no destructivos: Tintas Penetrantes (PT), Partículas Magnéticas (MT), Inspección Visual (VT), Radiación (RT) y en Ultrasonido Phase Array (UT) dando una caracterización real a cada uno de los defectos mencionados anteriormente que pueden aparecer durante un proceso normal de soldadura. Puntualizando cuál de los ensayos no destructivos es el que tiene más cualidades para identificar las discontinuidades propuestas, tanto de tipo volumétrico como superficial, obteniendo a su vez factores como el tamaño y características visuales.

Los ensayos no destructivos nombrados anteriormente se realizarán con el apoyo e investigación de Soldaduras West Arco donde nos brindaran la información necesaria para dar solución a nuestro proyecto, teniendo en cuenta que se puedan hacer todos los END para así lograr un desarrollo total de las actividades propuestas.

1 GENERALIDADES.

1.1 INTRODUCCION

En la industria actual a nivel nacional como internacional se han ido expandiendo los procesos de fabricación y a su vez los sectores de metalmecánica y petrolera en donde se utilizan infinidad de máquinas, estructuras, tuberías, herramientas y dispositivos los cuales se van desgastando con el uso, el tiempo y con la falta de mantenimiento. Con el paso de los años para minimizar riesgos y alargar la vida útil de algún equipo o componente se crearon diferentes métodos y aplicaciones para identificar posibles falencias. Algunos de esos métodos de inspección son los ensayos destructivos y los ensayos no destructivos con los que se pueden determinar propiedades, características, identificar fallas, etc.

La soldadura es un proceso importante porque proporciona una unión permanente y las partes soldadas se vuelven una sola unidad. Al unir dos metales se crea una junta (unión soldada) donde tendrá ciertas características, así como también si no es aplicada de la forma correcta posiblemente quedarán discontinuidades. Se puede llegar a tener una amplia variedad de discontinuidades pero como enfoque principal en este documento estarán la falta de penetración y socavado interno.

La falta de penetración es un defecto muy perjudicial que aparece en la raíz de la junta soldada y se da por una mala preparación del bisel al no tener un buen perfil maquinado y al mismo tiempo también interfieren variables en el proceso de soldadura que son indispensables, de tal forma que si no se seleccionan los parámetros adecuados se pueden generar las discontinuidades. Cuando se detecta este defecto en la unión soldada se debe rechazar prácticamente ya que puede generar riesgos en el futuro de su operación. El socavado interno, se da cuando el material base es fundido durante el proceso y hubo falta de material de aporte sobre el metal base. Estas discontinuidades son generalmente producidas en varios procesos de soldadura como por ejemplo, el SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) o por su nombre en español *“Soldadura de Arco Manual con Electrodo Revestido”*), donde su uso y aplicación es muy común en muchos lugares del mundo.

Es de gran importancia identificar esos defectos y definirlos muy bien puesto que a nivel Colombia existe conocimientos muy generales sobre la caracterización de las discontinuidades mencionadas en los ensayos no destructivos, cuando se identifican, se abarca un conjunto de defectos sin definir, es decir, al rechazar una discontinuidad se generaliza diciendo que es una discontinuidad volumétrica o

lineal sin identificar precisamente cual es el defecto real por el cual se está rechazando dicha junta.

1.2 JUSTIFICACION

El propósito fundamental de la detección de los defectos en la soldadura es el de determinar si los ensambles soldados satisfacen criterios de aceptación de un código o norma específicos. Determinar cuáles son los defectos presentes en uniones soldadas, es de gran ayuda ya que se puede determinar en qué condiciones que se presentan en el proceso de soldadura, para que existan los diferentes defectos como: porosidad, escoria, falta de penetración, falta de fusión, socavado, grietas, desalineamiento, entre otras. Por lo tanto es de vital importancia, conocer el amplio marco de estudio que tiene la caracterización de la soldadura, y así indicar que es lo que no se debe hacer en un proceso de soldadura SMAW en una unión soldada, para una aplicación industrial específica.

Una observación general que se podría indicar, es que las empresas que sueldan estructuras metálicas como líneas de oleoducto, gaseoductos o desagües, y al mismo tiempo las que hacen tanques de presión, sí implementan las normas y los códigos, pero no establecen un criterio de aceptación específico, es decir, rechazan un tipo de discontinuidad si es volumétrica o lineal por medio de las normas, códigos y especificaciones establecidas para la evaluación de dicha unión soldada, mas no existe el criterio de describir el tipo de discontinuidad que se encontró en la junta soldada, al no saber si es socavado, escoria, poros, falta de fusión, laminaciones, entre otras.

Esta metodología para caracterizar la defectología en la soldadura por medio de Ensayos No Destructivos, en este caso el defecto de falta de penetración y socavado interno, es necesaria para que las industrias del sector metal mecánico y entidades dedicadas a la investigación de soldadura, tengan una metodología y procedimiento para reconocer directamente los defectos que se presentan en el proceso de soldadura mediante SMAW utilizando Ensayos No Destructivos para su caracterización.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general:

Identificar la morfología de las discontinuidades de socavado interno y falta de penetración en juntas soldadas por proceso SMAW de tubería ASTM A36, mediante ensayos no destructivos especificados.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Determinar las variables críticas que influyen en el socavado interno y falta de penetración en la junta soldada, realizadas durante el proceso SMAW.
- Fabricar y realizar las probetas por el proceso de Soldadura SMAW, teniendo en cuenta las especificaciones del procedimiento de soldeo, así como el reporte de calificación del procedimiento de fabricación e inspección de la junta soldada WPS (*“Welding Procedure Specification”* y en español *“Especificación del Procedimiento de Soldadura”*).
- Realizar los Ensayos No Destructivos en la unión soldada y a partir de los resultados obtenidos, determinar las características de la morfología de las discontinuidades estudiadas en este documento.
- Determinar y comparar mediante pruebas a tensión, el efecto de la discontinuidad en la unión soldada según el defecto inducido de falta de penetración y socavado interno.
- Elaborar un artículo identificando la importancia que tiene hallar las discontinuidades en las uniones soldadas.

2 MARCO TEORICO

2.1 MATERIAL ASTM A36.

Durante los últimos cien años, se han caracterizado las propiedades de los aceros por su masiva utilización. El motivo principal está centrado en la enormidad de usos que se le puede dar, y la versatilidad de sus propiedades mecánicas. Otra ventaja, es que algunas de estas propiedades pueden ser modificadas para ajustarse al destino final que se le quiera dar al producto. Dentro de las propiedades podemos mencionar las siguientes: [1]

- **Ductilidad:** Es una propiedad importante porque mide la capacidad de un material para absorber sobrecargas y ser trabajado en frio.
- **Dureza:** Es la resistencia de un material a la penetración por una herramienta. Existe muchos métodos para determinar el tipo de dureza de un acero como Dureza Rockwell y Dureza Brinell, los cuales determinan las propiedades de resistencia de los materiales.
- **Maleabilidad:** La maleabilidad se refiere a la creación de filamentos formando finas láminas que conserva su entereza para que no se rompa.
- **Tenacidad:** Se refiere a la energía necesaria que se le tiene que aplicar a un acero para generar una fractura.

Dentro de los ensayos a que se someten los aceros, destacaremos los más utilizados:

- Ensayo de tracción o tensión.
- Ensayo de dureza.
- Ensayo de impacto.

Propiedades mecánicas:

Tabla 1: Requerimientos a tensión para aceros estructurales ASTM A36

Requerimientos a tensión*		
Láminas, Vigas* y barras	Ksi (Mpa)	*ver orientación del espécimen bajo la prueba a tensión según especificación A6. para la gama formas de brida sobre 426lb/ft (634kg / m), el 80 KSI (550Mpa) resistencia a la tensión máxima no se aplica una elongación mínimo en 2in (50mm) de 19% se aplica.
Esfuerzo último	50-80 (400-550)	*** Punto de fluencia 32 KSI (220 MPa) para las placas de más de 8in (200mm) de espesor. Alargamiento de que no es obligatorio determinarle para placa de piso. Las placas de más de 24 in (600 mm) el requisito de elongación se reduce dos puntos porcentuales. Ver los ajustes de elongación en la sección de ensayo de tracción de la especificación A6
Esfuerzo de fluencia	36 (250)	
Láminas y Barras, **, ***		
Elongación en 8in. (200mm), min, %	20	
Elongación en 2in. (50mm), min, %	23	
Dureza	120-135 HB	HB: Dureza Brinell

Fuente: [2]

Composición Química:

Tabla 2: Composición química acero estructural ASTM 36

Product	Shapes ^A	Plates ^B					Bars ^B			
Thickness, in. [mm]	All	To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 2½ [40 to 65], incl	Over 2½ to 4 [65 to 100], incl	Over 4 [100]	To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 4 [100], incl	Over 4 [100]
Carbon, max, %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganese, %	...	...	0.80-1.20	0.80-1.20	0.85-1.20	0.85-1.20	...	0.60-0.90	0.60-0.90	0.60-0.90
Phosphorus, max, %	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur, max, %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon, %	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.15-0.40	0.15-0.40	0.15-0.40	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.40 max
Copper, min, % when cop per steel is specified	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

^A Manganese content of 0.85-1.35 % and silicon content of 0.15-0.40 % is required for shapes with flange thickness over 3 in. [75 mm].

^B For each reduction of 0.01 percentage point below the specified carbon maximum, an increase of 0.06 percentage point manganese above the specified maximum will be permitted, up to the maximum of 1.35 %.

Fuente: [2]

Soldabilidad:

Según la norma ASTM A36/A36M-8, cuando el acero vaya a ser soldado, tiene que ser utilizado un procedimiento de soldado adecuado para el grado de acero y el uso o servicio previsto. Por lo que se recomienda consultar el Apéndice X3 de la Especificación A 6/A 6M para obtener información sobre soldabilidad. [2]

Requerimientos de tensión:

El acero A- 36 tiene como esfuerzo de fluencia mínimo de 36ksi. Además, es el único acero que puede obtenerse en espesores mayores a 8 pulgadas, aunque estas placas como excepción, solo están disponibles con esfuerzo de fluencia mínimo inferior especificado, siendo este 32ksi. Normalmente, el material de conexión se especifica cómo A-36, sin importar el grado de sus propios componentes primarios. El esfuerzo último de tensión de este acero varía de 58ksi a 80 ksi; para cálculos de diseño se utiliza el valor mínimo especificado. [2]

Aplicaciones:

Las aplicaciones comunes del acero estructural A-36 es en la construcción, y es moldeado en perfiles y láminas, usadas en edificios e instalaciones industriales; cables para puentes colgantes, atirantados y concreto reforzado; varillas y mallas electrosoldada para el concreto reforzado; láminas plegadas usadas para techos y pisos. [2]

2.2 PROCESO DE SOLDADURA SMAW. (SOLDADURA DE ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO)

Es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia, es decir, la unión de metales por medio de una acción térmica de un arco eléctrico, que se conserva entre la punta del electrodo recubierto y la superficie del metal base mientras se mantiene una distancia ideal y así generar una unión entre granos fundidos y formar un único sistema de cristales.

El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material estirado o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales de la cobertura del electrodo son estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera por

medio de los gases que se crean cuando el recubrimiento se descompone por el calor del arco. La protección empleada, junto con otros ingredientes de la cobertura y del alambre del núcleo, controlan en gran medida las ' propiedades mecánicas, la composición química y la estructura metalúrgica del metal de soldadura, así como las características de arco del electrodo. La composición de la cobertura del electrodo varía dependiendo del tipo de electrodo [3].

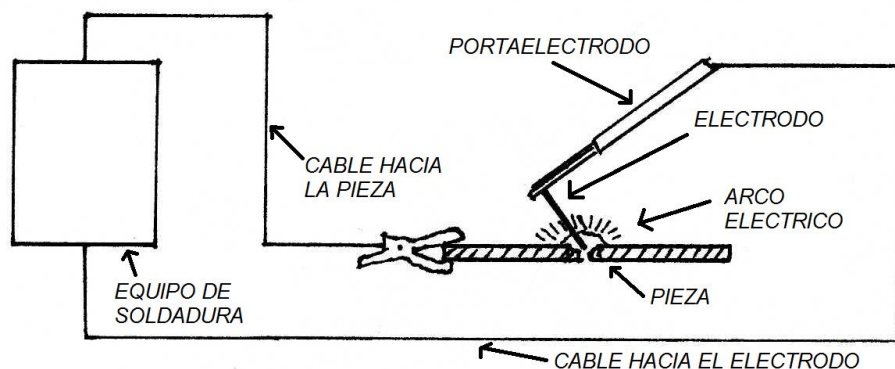
2.2.1 Principio de funcionamiento

El circuito empieza con una fuente de potencia eléctrica con cables que van conectados de forma directa al portaelectrodo y a la pieza de trabajo. El conjunto (la unión soldada) se empieza a crear cuando por medio de la acción térmica que produce el arco eléctrico, se va derritiendo la punta de electrodo, dejando un charco de metal de aporte, fundiendo rápidamente pequeños glóbulos de metal fundido. El electrodo se mueve a lo largo de la longitud del trabajo fusionando una porción del metal base con el metal de aporte de forma continua.

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para derretir ambas partes, dicha corriente puede ser tanto alterna como continua dependiendo del electrodo empleado. La fuente de potencia debe ser capaz de controlar el nivel de corriente dentro de un intervalo razonable para responder a las complejas variables del proceso de soldadura [3].

En la siguiente imagen se ilustra los elementos necesarios para crear el circuito eléctrico y así poder realizar el proceso de soldadura por arco de metal protegido (SMAW).

Ilustración 1: Componentes principales del proceso SMAW



Fuente: Autor

2.2.2 Capacidades y Limitaciones del proceso.

Existen infinidad de industrias en las que se puede utilizar este proceso de soldadura como por ejemplo la industria automotriz, marítima, aeronáutica, manufactura, etc, dependiendo el tipo de acero que se utilice.

Algunas de las ventajas son las siguientes:

- El equipo es económico, de fácil manipulación y portátil.
- El material que recubre al electrodo proporciona el mecanismo para proteger la unión soldada que se está haciendo, evitando las oxidaciones durante el proceso.
- El proceso no es sensible a factores externos como corrientes de aire, tal como si lo es en el proceso de soldadura de arco protegido con gas.
- Se puede utilizar en una amplia gama de metales y aleaciones.
- Dependiendo del área donde se valla a soldar, no hay límite para tener acceso puesto que existen varios diámetros de electrodos con los cuales es posible llegar a tal punto.

Las limitaciones se deben principalmente a la soldabilidad de algunos materiales al momento de proceso, es decir, el calor que se genera en el momento no es soportado por la pieza y simplemente se funde el metal base. Al mismo tiempo en algunos materiales no es suficiente la protección del arco y esto hace que se contamine con oxígeno.

La longitud del electrodo también es otra limitación puesto que generalmente vienen en una longitud de 9 a 18 pulgadas, lo cual hace que el proceso se vuelva un poco lento con respecto al proceso FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*) en español *“soldadura por arco con núcleo de fundente”*, donde se utiliza un electrodo continuo, mientras que para el proceso SMAW una vez consumido el electrodo hay que poner uno nuevo.

2.2.3 Características eléctricas, elementos y variables que interfieren en el proceso SMAW

Fuente de Potencia:

Tipo de corriente de salida: Se puede utilizar corriente alterna o continua dependiendo del tipo de fuente y electrodo escogido. El tipo de corriente

seleccionada para el proceso influye en el rendimiento del electrodo, cada una con sus ventajas y limitaciones dependiendo de la aplicación que se vaya a utilizar.

- **Caída de voltaje:** La caída de voltaje es menor si se utiliza corriente alterna haciendo que sea apropiada cuando se trabaja a cierta distancia de la fuente de potencia.
- **Golpe del arco.** La corriente alterna pocas veces presenta problemas de golpe del arco porque el campo magnético se está invirtiendo constantemente (120 veces por segundo). El golpe de arco puede ser un problema significativo cuando se suelda acero ferrítico con corriente continua a causa de los campos magnéticos desequilibrados que rodean al arco.[3]
- **Baja Corriente:** Al manejar una corriente continua con un electrodo de diámetro pequeño y baja corriente de soldadura, da como resultado mejores características de operación y un arco más estable.
- **Espesor del metal.** Se puede soldar tanto metal laminado como secciones gruesas empleando corriente continua. La soldadura de lámina metálica con corriente alterna es menos recomendable que con corriente continua. Las condiciones del arco en los niveles de corriente bajos requeridos para materiales delgados son menos estables cuando se usa potencia corriente alterna que cuando se usa corriente continua.[3]

Equipo Accesorio

- **Portaelectrodos:** es un dispositivo el cual se utiliza por lo general en procesos de soldadura manuales para sostener el electrodo. Al mismo tiempo es parte fundamental para conducir la corriente del cable al electrodo y así cerrar el circuito. Tiene un mango de alta resistencia, aísla el calor y la corriente del contacto directo con el soldador.
- **Conexión con la pieza de trabajo:** es un dispositivo que por lo general se le llama pinza de masa y su función principal es conectar mediante un cable pieza de trabajo a la fuente. Esta pinza debe estar hecha de un material no aislante para garantizar la conexión completa del circuito.
- **Cables para soldadura:** su función principal es conectar el portaelectrodos y la pinza de masa a la fuente de potencia; son parte del circuito de soldadura. El

cable deber tener una flexibilidad para que el operario soldador pueda manipularlos al momento mover el portaelectrodos o para llevarlos de un lugar a otro. El tamaño (diámetro) de este, debe ser proporcional a la longitud para que no exista ningún tipo de resistencia y así evitar un riesgo de sobrecalentamiento.

- **Careta:** el uso de la careta es de carácter obligatorio principalmente para la protección de los ojos, cuello, frente y aquellas partes que estén cercanas a la cara. Si no se utilizará, el soldador estaría expuesto chispas, salpicaduras y rayos directos del arco produciendo quemaduras. La careta debe ser ligera de tal forma que no tenga mucho peso para que así el soldador se sienta cómodo y pueda realizar su labor.
- **Equipo adicional:** Es importante tener las superficies de trabajo limpias, por lo general las piezas de metal tienden a ensuciarse de escoria u otro material que puede interferir en el proceso. Algunos de los implementos más comunes de limpieza son una grata o cepillo con cerdas de metal, martillo, mazo, cincel, entre otras.

Eliminación de escoria: La escoria es la capa de residuos del electrodo que queda encima del cordón de soldadura una vez soldado. Es de gran importancia limpiar ya sea con grata mecánica, líquidos o equipos complementarios estos residuos, ya que puede quedar atrapada entre los múltiples pases y afectar considerablemente la integridad de la soldadura. Dando como resultado una junta defectuosa.

Conexión con la pieza de trabajo: Conectar la pinza de masa junto a la pieza de trabajo es imprescindible ya que de ella depende cerrar el circuito eléctrico para poder crear el arco eléctrico. Colocar debidamente el cable es importante ya que si la posición no es la correcta, se puede provocar el golpe del arco y dificultar el control del arco eléctrico. Es importante que este bien sujetado a la pieza de trabajo puesto que si hay una conexión defectuosa no se establecerá un contacto eléctrico continuo.

Posteriormente en la sección **3.1 Variables críticas durante el proceso de soldadura**, se mencionan las variables críticas que lleva el proceso de soldadura SMAW.

Algunas de las aplicaciones se pueden dar según:

- **Materiales:** El proceso SMAW puede servir para unir la mayor parte de los metales y aleaciones comunes. La lista incluye los aceros al carbono, los de baja aleación, los aceros inoxidables y el hierro colado, así como cobre, níquel y aluminio y sus aleaciones. La soldadura por arco de metal protegido también se usa para unir una amplia gama de materiales químicamente disimiles. El proceso no se usa para materiales en los que resulta insatisfactoria la protección del arco provista por los productos gaseosos de una cobertura de electrodo. Los metales reactivos (Ti, Zr) y refractarios (Cb, Ta, Mo) pertenecen a esta categoría.[12]
- **Espesores:** El proceso de arco de metal protegido se puede adaptar a materiales de cualquier espesor dentro de ciertos límites prácticos y económicos. Si el espesor es menor que 1.6mm (1/16 de pulg), el metal base se fundirá de lado a lado y el metal derretido se perderá. [12] No hay un límite superior de espesor, solo que con otros procesos de soldadura podría ser más económico.
- **Posición de soldadura:** Esta es una gran ventaja que tiene el proceso SMAW frente a otros, puesto que se puede soldar en cualquier posición con la mayor parte de materiales para los que el proceso es apropiado. Lo ideal sería soldar en posición horizontal ya que el soldador no necesita de habilidades desarrolladas y es más simple y efectivo de realizar el proceso. Para las posiciones diferentes a esta ya sean verticales o por encima de la cabeza es necesario utilizar un electrodo de menor diámetro.

2.3 GEOMETRÍA DE LAS JUNTAS DE SOLDADURA.

Las uniones soldadas se diseñan teniendo en cuenta en primera instancia la resistencia mecánica y la seguridad que la pieza soldada debe ofrecer en las condiciones de servicio normales a las que se someterá. Hay que tener en cuenta que el esfuerzo que una soldadura de una carga dinámica es muy diferente al de una carga estática. Además de la confiabilidad que debe tener la estructura soldada, debe diseñarse de modo que sean económicas y accesibles para el soldador durante la fabricación.

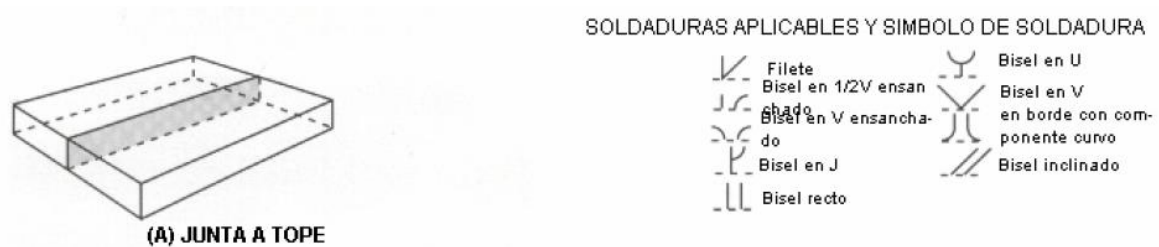
Hay cinco juntas básicas usadas en soldadura de metales: a tope, en L, en T, solapada y en borde. Un número de diferentes tipos de soldadura puede ser

aplicado a cada tipo de junta dependiendo del diseño de la junta, y estos son mostrados al lado de cada tipo de junta. El diseño de la junta identifica, “la forma, las dimensiones y la configuración de la junta” [4].

Soldadura a tope “surco”

Se emplean diferentes tipos de diseños de unión para este tipo de soldadura. En la selección del diseño más apropiado para una aplicación específica influyen algunos factores como: La idoneidad para la estructura, si es viable para la función que va a desempeñar, la accesibilidad de la unión para soldarla, el costo de la soldadura, la posición en la cual el soldador va a realizar su trabajo, entre otros [4]. Por economía y también para reducir la distorsión y los esfuerzos residuales, el diseño de la unión debe tener una abertura en la raíz y un ángulo que conceda resistencia mecánica e integridad suficiente. Hay varios tipos de uniones para lograr esa resistencia mecánica: unión en J y en U, las cuales son recomendadas para secciones gruesas.

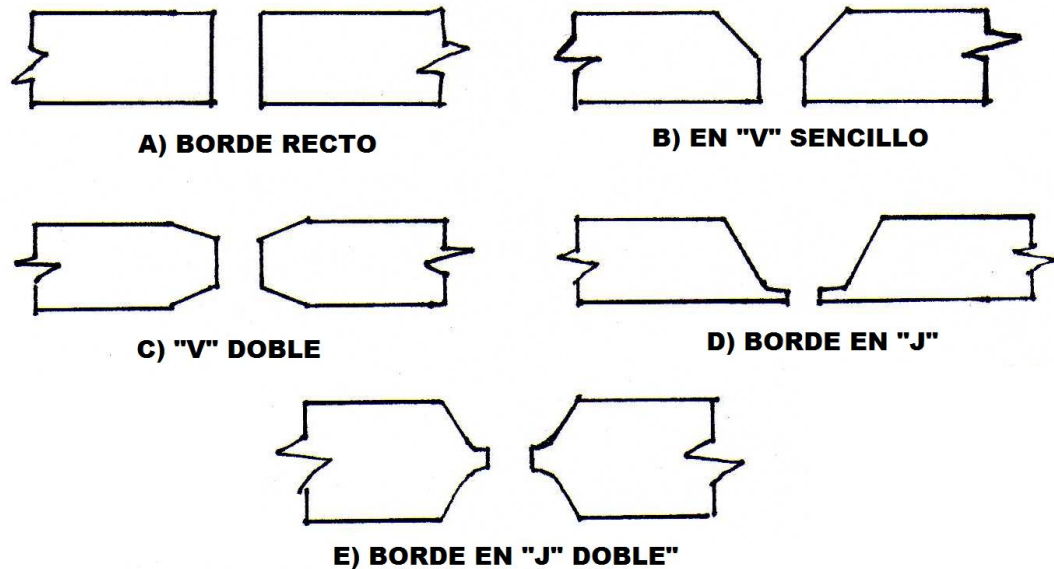
Ilustración 2: Soldaduras aplicables en junta a tope



Fuente: [4]

La identificación del tipo de soldadura está indicada en la geometría de la junta. La geometría de la junta es, “la forma y dimensión de una junta vista en sección transversal antes de ser soldada”. Cuando una junta es vista en sección transversal, la forma del borde de cada componente a ensamblar a menudo reseña el tipo y símbolo de soldadura especificado. Tipos adicionales de soldadura y diseños de biseles pueden ser hechos usando varias formas o componentes estructurales cuando las preparaciones de borde o superficie son aplicadas [4].

Ilustración 3: Diversas geometrías para juntas a tope



Fuente: Autor

Partes de la junta soldada

Dependiendo del tipo de junta y de su diseño, existe una nomenclatura para establecer parámetros en la geometría. Es importante tener conocimiento de las partes que están incluidas, para así asociar y seleccionar el mejor proceso de soldadura.

- Raíz de la junta
- Superficie de bisel
- Superficie de la raíz
- Abertura de raíz
- Ángulo de chaflán
- Ángulos de bisel

Ilustración 4: Características de Junta a tope



Fuente: [4]

2.4 DISCONTINUIDADES.

La mayoría de procesos de soldadura son procesos manuales, y la calidad de la unión depende de varios factores que intervienen en el proceso, pero también en gran parte de la habilidad del soldador, este debe tener la certificación adecuada para proceder con el procedimiento del proceso de soldadura que se aplique. Por ende se debe establecer rigurosamente las variables y a su vez los materiales que interactúan de proyectos estructurales de gran magnitud.

Las uniones soldadas contienen diversos tipos discontinuidades en tamaños y formas. Se considera discontinuidad a la interrupción de la uniformidad del material, éstas no son perjudiciales hasta cierto nivel; por encima de éste, se llama defecto. El nivel de aceptación puede variar dependiendo de requisitos mínimos para no generar riesgos en las condiciones de servicio normal. Estas pautas están plasmadas en normas, códigos y especificaciones, las cuales su función es dar un estándar de calidad para los trabajos de soldadura y a su vez establecer una tolerancia para dichos trabajos.

A continuación se van a describir los defectos que se van a desarrollar en este proyecto.

2.4.1 Falta de Penetración.

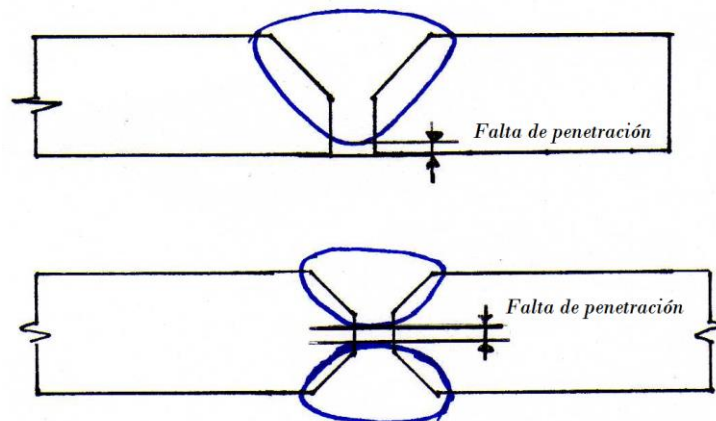
Es una discontinuidad la cual se identifica porque aparece en la superficie de la raíz del cordón de soldadura, éste, no quedará adecuadamente relleno con metal de aporte dejando un vacío. (Ver *Ilustración 5*, *Ilustración 24* e *Ilustración 25*).

Esta falta de penetración puede ser debida a una separación excesivamente pequeña de la raíz, a un electrodo demasiado grueso, a una corriente de soldadura insuficiente, a una excesiva velocidad de pasada, penetración incorrecta en la ranura, etc [11].

Al utilizar un ángulo de desplazamiento inadecuado y añadiendo mala una manipulación del electrodo, se creará una franja en el cordón de soldadura con un déficit de metal de aporte, creando por ende la discontinuidad de falta de penetración.

En la siguiente imagen se observa un ejemplo para la discontinuidad de falta de penetración.

Ilustración 5: Discontinuidad de Falta de penetración en una junta a tope



Fuente: Autor

La mayoría de los códigos ponen límites a la cantidad y el grado de penetración parcial admisible, y varios códigos no aceptan ninguna penetración parcial. La falta de penetración puede ser provocada por falta de experiencia del soldador, una configuración inadecuada, o contaminación excesiva [5].

En la sección **3.2 Fabricación de la probeta a utilizar** se encuentran la *Tabla 15: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Falta de penetración*, que nos muestran los valores de los parámetros con los que se va a inducir la discontinuidad de falta de penetración.

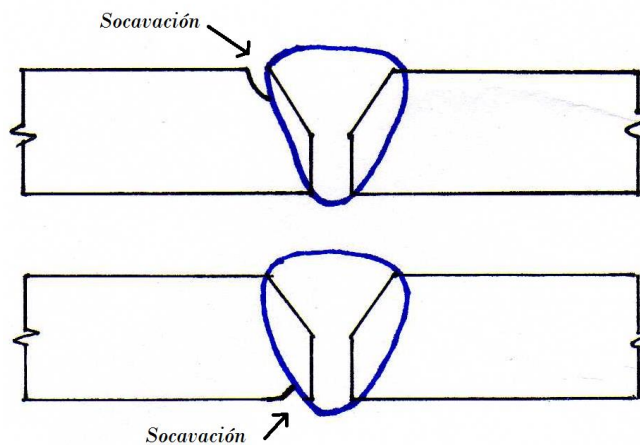
2.4.2 Socavado Interno.

Una socavación es una discontinuidad superficial que sucede en el metal base adyacente a la soldadura. Es una condición en la cual el metal base ha sido fundido durante el proceso de soldadura y no hubo una cantidad suficiente de material de aporte para llenar la depresión resultante. El resultado es un agujero alargado en el metal base que puede tener una configuración relativamente filosa. Dado que es una condición superficial, es particularmente dañina para todas aquellas estructuras que vayan a estar sometidas a cargas de fatiga [5].

Es interesante notar que para las soldaduras con bisel, la socavación puede ocurrir tanto en la superficie de soldadura como en la superficie de la raíz de la soldadura o mejor llamado como socavado interno. (Ver *Ilustración 6, Ilustración 26 e Ilustración 27*)

La orientación, manipulación y tamaño de electrodo son los principales factores por que cuales se genera la discontinuidad. Características eléctricas y variables como amperaje y arco eléctrico se deben controlar utilizando las recomendaciones de fabricante ya que de lo contrario podría existir un exceso de calor y posteriormente aparecerá el socavado.

Ilustración 6: Discontinuidad de socavado en una junta a tope



Fuente: Autor

En la sección **3.2 Fabricación de la probeta a utilizar** se encuentran la *Tabla 16: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Socavado Interno*, que nos muestran los valores de los parámetros con los que se va a inducir la discontinuidad de socavado interno.

2.5 INFORME DE EVALUACIÓN WPS

Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS):

Un WPS (“*Welding Procedure Specification*”) es un documento que ha sido preparado y aprobado por medio de la calificación y es usado para suministrar la dirección necesaria y el control cuando se realiza una soldadura. Como mínimo, este procedimiento tiene que relacionar todas las variables esenciales y no esenciales para el proceso de soldadura que se aplique (por ejemplo SMAW, GMAW, FCAW, etc.). [7]

Estas variables incluyen:

- Las variables esenciales y no esenciales relativas a cada proceso usado en el procedimiento.
- Las variables esenciales suplementarias cuando la prueba de impacto sea requerida.
- Los rangos aceptables (por ejemplo los calificados).
- Otra información que se desee para un control adicional.

El WPS relaciona las variables, tanto esenciales como no esenciales, y los valores y variaciones aceptables de estas, se crea para dar una guía de construcción sobre la junta a soldar, información que es de gran utilidad al soldador u operario de soldadura.

Términos Importantes en el WPS:

- **Cupón de Prueba:** Un cupón de prueba es el conjunto de materiales base utilizados a ser soldados completamente para la prueba de calificación del WPS.

- **Espécimen de Prueba:** Un espécimen de prueba es una porción que se extrae del cupón de prueba la cual va a ser sometida a algún ensayo con el objetivo de demostrar el WPS, por ejemplo pruebas de doblez, tensión, fractura, etc.

Aspectos a considerar al momento de comenzar con la preparación de un WPS:

- Valorar la compatibilidad del metal de soldadura aportado en relación al metal base.
- Las propiedades metalúrgicas requeridas.
- Las propiedades mecánicas deseadas.
- Los requisitos de servicio de la pieza una vez soldada.

Para la aplicación posterior del mismo:

- La habilidad de los soldadores.
- El equipo disponible.
- La localización de las soldaduras.
- Aspectos económicos.

Para el desarrollo del WPS es importante tener en cuenta los siguientes términos a que son muy esenciales.

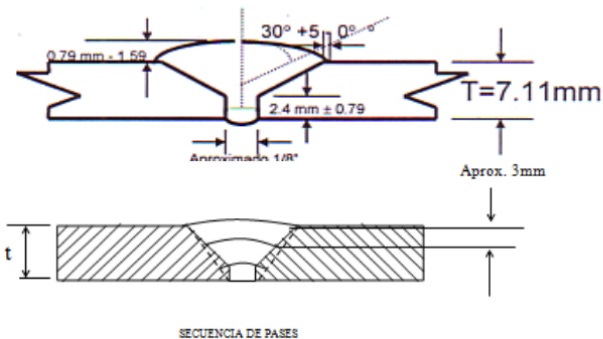
Los tipos de variables para especificaciones de procedimientos a soldar WPS se dividen variables esenciales, variables esenciales suplementarias y variables no esenciales. [8]

Variables esenciales: son aquellas en las cuales un cambio, que se describe en las variables específicas, es considerado que afecta las propiedades mecánicas del conjunto soldado y requerirá recalificación de la WPS. Las variables esenciales suplementarias se requieren para metales los cuales otras secciones especifican pruebas de tenacidad y son variables esenciales para cada proceso de soldar.

Variables no esenciales: Son aquellas en las cuales un cambio que se describe en las variables específicas, puede ser hecho en la WPS sin recalificación.

En la *Tabla 3 Ejemplo de WPS (Welding Procedure Specification)*, podemos observar un ejemplo de WPS, la ubicación de las casillas no debe tener un orden en específico siempre y cuando se encuentren las variables esenciales necesarias para describir el procedimiento que se está evaluando.

Tabla 3: Ejemplo de WPS (Welding Procedure Specification)

 		ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA API 1104				
REFERENCIA: API STANDARD 1104, 5.2				FECHA:		
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA N°: CEC-API1104-01						
COMPAÑÍA: CAMPO ESCUELA COLORADO "UIS"				SOLDADURA DE: TUBERÍA		
PROCESO:						
MATERIAL:		YIELD SGTRENGHT:				
DIÁMETRO:		SCH:		DIÁMETRO (6.2.2.)		
ESPESOR DE PARED:		ESPESOR DE PARED (6.2.2)				
DISEÑO DE LA JUNTA:						
METAL DE APORTE (TABLA 1):				NÚMERO DE PASES:		
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS:						
POSICIÓN:						
DIRECCIÓN DE SOLDEO:						
NUMERO DE SOLDADORES:						
TIEMPO ENTRE PASES:						
TIPO DE ALINEADORES:				REMOCIÓN ALINEADORES		
LIMPIEZA Y/O PULIMENTO:						
PRECALENTAMIENTO/PWHT:						
FUNDENTE DE RESPALDO:						
VELOCIDAD DE AVANCE:						
ESQUEMA DE LA JUNTA: 						
TAMAÑO DEL ELECTRODO Y NÚMERO DE PASES						
PASE N°	ELECTRODO	DIÁMETRO	VOLTAJE	AMPERAJE	POLARIDAD	VELOCIDAD
Elaboró:	Sergio Ramírez Celis Jorge G. Sáenz González		Revisó:		Aprobó:	
Fecha:			Fecha:		Fecha:	

Fuente: [14]

2.6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

En la industria actual a nivel nacional como internacional se han ido expandiendo los procesos de fabricación y a su vez los sectores de metalmecánica y petrolera en donde se utilizan infinidad de máquinas, estructuras, tuberías, herramientas y dispositivos los cuales se van desgastando con el uso, el tiempo y con la falta de mantenimiento. Con el paso de los años para minimizar riesgos y alargar la vida útil de algún equipo o componente se crearon diferentes métodos y aplicaciones para identificar posibles falencias. Algunos de esos métodos de inspección son los ensayos no destructivos. Para la selección de los estos debemos establecer los siguientes cuatros parámetros

Selección de los métodos específicos: Para seleccionar un tipo de método se debe conocer principalmente tres categorías las cuales influyen directamente con la pieza que se analizará.

1. **Material:**Cuál es su naturaleza, propiedades, en qué estado se encuentra.
2. **Proceso de fabricación:** cuál fue su proceso de fabricación para así establecer si existe alguna indicación que apareció durante este proceso, también si al momento de transportar el material sufrió algún cambio.
3. **Función:** es muy útil saber sí las indicaciones que están en el material aparecieron durante el desarrollo de una operación que estuviera ejecutando.

El tamaño y la forma de la pieza influirán en la selección del ensayo no destructivo ya que los métodos de inspección tendrán sus ventajas, desventajas y también sus limitaciones.

Obtener las indicaciones: Se debe conocer previamente cuales son los defectos que hay para tener idea de su naturaleza, la morfología en donde suele aparecer comúnmente, el tamaño que tiene la indicación, etc.

Interpretar dicha indicación: Es la analogía de la indicación con la morfología, naturaleza, ubicación orientación y tamaño, dependiendo de estas, aparecen indicaciones falsas que consisten en una mala aplicación del método y por ende aparecen; indicaciones no relevantes que son producidas por la estructura o configuración de la pieza, en algunos caso es ocasionada por las características del material; y por ultimo indicaciones relevantes que son producidas por una discontinuidad.

Evaluación de la indicación: En esta se observa la relación que tiene con la indicación con las propiedades naturales del material. Así mismo para establecer estos criterios se utilizan códigos, normas y especificaciones para evaluar y dar un reporte de si la pieza analizada es aceptada o rechazada según la función que esté cumpliendo.

❖ **Ensayos no destructivos Superficiales:**

Con estos ensayos solo se comprueba la homogeneidad superficial de un material. Su principal aplicación es para detectar discontinuidades que están abiertas a la superficie, aunque existen algunos ensayos que pueden determinar discontinuidades subsuperficiales a una profundidad no mayor a 3 mm.

Los ensayos no destructivos que aplican para determinan las discontinuidades superficiales son:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Partículas Magnéticas (MT)
- Electromagnetismo (ET)

❖ **Ensayos no destructivos Volumétricos:**

Su aplicación principal está en detectar discontinuidades que se encuentre a más de 3 mm de la superficie, como su nombre lo indica permite conocer la uniformidad de un material en su espesor y detectar discontinuidades internas que no son visibles a simple vista.

Los ensayos no destructivos que aplican para determinan las discontinuidades volumétricas son:

- Radiografía Industrial (RT)
- Ultrasonido Industrial (UT)
- Radiografía Neutrónica (NT)
- Emisión Acústica (AET).

2.6.1 Líquidos penetrantes.

El ensayo destructivo de líquidos penetrantes se utiliza para detectar discontinuidades que están abiertas a la superficie. El principio en el cual se basa esta técnica, es utilizar un líquido fluorescente pueda penetrar a los orificios que se encuentren en la superficie mediante la propiedad de **capilaridad** y a su vez que pueda ser retenido.

Este ensayo no destructivo menciona algunas propiedades que son importantes en los líquidos que se utilizan. Algunas de esas son las siguientes

Capilaridad: es la propiedad que tiene algunos fluidos de ingresar por diámetros muy pequeños.

Tensión superficial: lo cual es la forma de cohesión de las moléculas en la superficie.

Mojabilidad: como su nombre lo indica, es la capacidad que tiene un líquido para mojar, es decir, el poder de humectación logrando expandirse por la superficie de un sólido.

Viscosidad: es la resistencia de un líquido a fluir por una superficie.

Volatilidad: Es aquella propiedad físico-química de algunos componentes, constituyentes de la mezcla líquida, de pasar al estado gaseoso (evaporarse) más o menos fácilmente de la superficie en examen.

Punto De Inflamación: Es la temperatura mínima a la cual el líquido penetrante debe ser calentado, en condiciones normales de laboratorio, para producir vapor en cantidad suficiente como para formar una mezcla inflamable.

Las pequeñas grietas superficiales que se pueden encontrar en la superficie de materiales no porosos, actúan también como capilares y favorecen la penetración en las mismas de fluidos que tengan una reducida tensión superficial. Este fenómeno ocurrirá independientemente de la orientación de las grietas, ya que no es la gravedad la que hace introducirse el líquido en la discontinuidad [9].

Ventajas generales del ensayo de líquidos penetrantes:

- Es una técnica que permite encontrar cualquier tipo de discontinuidad superficial.

- El diseño, la geometría, el tamaño y la forma de la pieza no es un inconveniente para realizar la inspección.
- Es una técnica razonablemente rápida y fácil de emplear.
- No tiene complejidad en la aplicación del ensayo
- Son equipos portátiles y económicos.

Limitaciones generales del ensayo de líquidos penetrantes:

- Es un ensayo que solo identifica discontinuidades superficiales.
- No se puede aplicar a materiales no porosos.
- Al momento de realizar el ensayo se debe limpiar la superficie de tal modo que no quede con recubrimientos para no afectar los resultados.
- Los inspectores deben tener una amplia experiencia.

Procedimiento para el desarrollo del Ensayo no destructivo de Líquidos Penetrantes

Primero se debe realizar una inspección visual sobre el área de interés para así con los líquidos penetrantes justificar la aparición del defecto.

Es transcendental tener en cuenta las fases del procedimiento para que en el momento de hacer la inspección se dé con criterio un resultado. Las fases varían según el método, pero en general siempre van a tener la siguiente secuencia:

- a) Como primera medida se hace una inspección visual con el fin de determinar a simple vista si existen discontinuidades y así tener una ubicación aproximada de estos, luego se procede a limpiar la pieza para que quede en condiciones perfectas ya que los resultados dependen 100% de este paso.
- b) Es necesaria una limpieza exhaustiva antes de realizar el ensayo. El ambiente debe estar propicio durante la realización del ensayo para así obtener buenos resultados.
- c) Se selecciona el tipo de método que se utilizará, ya que existen varios que dependiendo de la ubicación, funcionalidad, tamaño, entre otras características, se elige un método como mejor opción y así la toma de los resultados será más fácil. También según el método tendrá un procedimiento diferente.

- d) Después de haber seleccionado el método, se procede a la aplicación de este. Cada método maneja un procedimiento adecuado y específico.
- e) El análisis de los resultados, observar que defectos se encuentran en la pieza analizada.
- f) Hacer metrología de las discontinuidades si se desea para evaluar bajo norma si está o no entre los parámetros de aceptación o rechazo según su función.

Técnicas de limpieza.

Tabla 4: Técnicas de limpieza en líquidos penetrantes.

Limpieza con detergentes	Esta técnica se emplea para eliminar la suciedad de piezas pequeñas. Se sumergen en un tanque con agitación durante 10-15 minutos entre 75 y 95°C.
Limpieza con disolvente	Consiste en aplicar el disolvente directamente sobre la superficie a inspeccionar, frotándola con trapos o papeles, en función de la rugosidad superficial. En el caso de piezas de pequeñas dimensiones fabricadas en serie o con una morfología compleja, se sumergen en tanques con disolventes hasta que desaparece la suciedad.
Limpieza con vapor desengrasante	es una técnica que se emplea para eliminar aceites, grasas y otros contaminantes orgánicos.
Limpieza con limpiadores alcalinos	estos limpiadores contienen distintos detergentes para eliminar diferentes tipos de suciedades. Son productos que se tienen que usar siguiendo estrictamente las instrucciones de los fabricantes.
Limpieza por ultrasonidos	consiste en la agitación por ultrasonidos del baño para mejorar la acción del disolvente o el limpiador alcalino y reducir de esta forma el tiempo de limpieza.
limpieza con decapantes	esta técnica se emplea para eliminar recubrimientos, como por ejemplo pintura, de la superficie que se va a ensayar.
Limpieza por medios mecánicos	es una técnica no recomendada porque puede hacer que se cierren las discontinuidades superficiales. Aún así, se emplea en industrias de calderería y de fundición para ensayar piezas sin mecanizar, donde los elementos contaminantes no se pueden eliminar por otras técnicas.
Ataque con acido.	consiste en atacar la superficie a ensayar con una disolución ácida para eliminar cualquier resto de metal que tape las discontinuidades.

Fuente: [9]

Técnicas de aplicación del penetrante

Tabla 5: Técnicas de aplicación del penetrante

Por inmersión	consiste en sumergir las piezas de pequeño tamaño en un tanque lleno de líquido penetrante. Para facilitar la operación, las piezas se colocan en cestas de alambre.
Por pulverización	esta técnica consiste en pulverizar el líquido penetrante por medio de un chorro de aire a baja presión.
Con brocha o pincel	esta técnica se emplea cuando no se quiere cubrir con líquido penetrante una superficie mucho mayor que la que se va a ensayar. Así se reduce el consumo de penetrante y el tiempo de limpieza, en comparación con la técnica de pulverización.

Fuente: [9]

Técnicas de eliminación del exceso de penetrante

Tabla 6: Técnicas de eliminación del exceso de penetrante

Penetrantes lavables con agua	la técnica recomendada para eliminar este tipo de penetrantes consiste en proyectar el agua mediante una boquilla, para que incida sobre la pieza con un ángulo de unos 45º, una presión inferior a 280kPa y una temperatura entre 10 y 38ºC.
Penetrantes post-emulsionables	para la eliminación de este tipo de líquidos primero se aplica el emulsionante, se espera un tiempo (tiempo de emulsificación) y finalmente se elimina con agua la emulsión penetrante-emulsionante.
Penetrantes eliminables con disolvente	en este caso el exceso de penetrante se elimina frotando la superficie con trapos o papeles absorbentes, repitiendo la operación hasta que se haya eliminado la mayor parte de penetrante. Finalmente, las trazas de penetrante que queden se eliminan frotando con suavidad utilizando trapos o papeles ligeramente humedecidos en disolvente.

Fuente: [9]

Técnicas de aplicación del revelador

Tabla 7: Técnicas de aplicación del revelador

Inmersión	consiste en sumergir la pieza en un tanque lleno de revelador. Se suele emplear para reveladores acuosos.
Lecho fluido	consiste en introducir la pieza suspendida o sobre una rejilla en un tanque cerrado y en cuya parte inferior se encuentra el revelador. Una serie de toberas localizadas en la parte inferior del tanque inyectan aire a baja presión de forma que el revelador forma una nube de polvo que impregna la pieza. Es una técnica que se suele emplear para reveladores de polvo seco.
Pulverización	el pulverizado del revelador se debe realizar a una distancia de unos 15cm de la pieza para obtener una capa uniforme y fina. Se suele emplear para reveladores acuosos, húmedos no acuosos y de película líquida.

Fuente: [9]

Aplicaciones:

El campo de aplicación del ensayo no destructivo de líquidos penetrantes es muy amplio, especializado en la identificación de discontinuidades abiertas a la superficie exceptuando materiales porosos. Pueden ser metálicos como aceros inoxidables, aluminio y sus aleaciones, cobre o no metálicos como plásticos, vidrios y resinas.

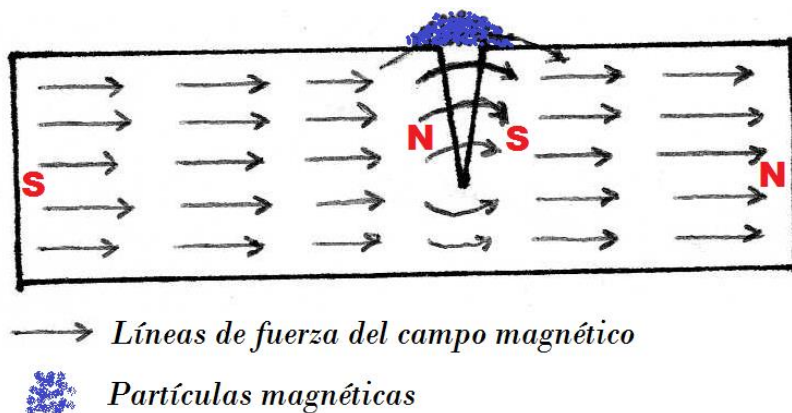
2.6.2 Partículas Magnéticas.

El ensayo de partículas magnéticas es un END que fue creado para sustituir a los líquidos penetrantes con la finalidad de encontrar las discontinuidades de una manera más rápida.

El principio de funcionamiento de este ensayo es la utilización de campos magnéticos, de tal forma que al aplicar partículas magnéticas sobre una sección de la superficie que tenga discontinuidades, se organizarán de tal forma que se puedan detectar las grietas, siempre y cuando estén perpendicularmente a las líneas de campo.

Este ensayo se realiza induciendo un campo magnético en un material ferromagnético y empolvando la superficie con partículas de hierro. Las imperfecciones superficiales o subsuperficiales distorsionan el campo magnético produciendo una indicación visual del defecto.

Ilustración 7: Líneas de flujo del campo magnético



Fuente: Autor

Ventajas de la inspección mediante partículas magnéticas

- Puede detectar discontinuidades subsuperficiales.
- Se pueden analizar un gran número de piezas similares simultáneamente.
- Las grietas finas muy pequeñas pueden ser detectadas.
- Es un método relativamente económico.
- No es necesario realizar una limpieza excesivamente rigurosa, es efectiva sobre recubrimientos finos de pintura.
- Puede aplicarse a piezas de formas complejas sin ninguna complicación.

Limitaciones de la inspección mediante partículas magnéticas:

- Defectos paralelos al campo magnético puede que no se revelen
- Únicamente aplicable a materiales ferromagnéticos.
- Alto riesgo de obtener indicaciones falsas.
- Se necesita una preparación previa de la superficie.
- Las partes ensayadas pueden requerir desmagnetización dependiendo de su uso.

Este ensayo no destructivo menciona algunas propiedades que son importantes en las partículas magnéticas estas son las siguientes:

Dominios magnéticos: Cuando una corriente pasa por el material, pequeñas regiones magnéticas dentro del material, llamados dominios magnéticos, se alinean con el campo aplicado, haciendo que la fuerza del campo magnético aumente. Si la corriente se incrementa, todos los dominios terminarán alineándose, condición que se denomina saturación. En algunos materiales, algunos dominios pueden realinearse por sí mismos. En este caso, parte del campo magnético original persistirá incluso después de que se retire la corriente, haciendo que el núcleo se comporte como un imán permanente.

En materiales ferromagnéticos el paso de corriente eléctrica causará la alineación de los dominios magnéticos y la presencia de un campo magnético residual remanente. La dirección del campo magnético depende de la dirección de la corriente.

Profundidad de la detección: La profundidad del campo magnético depende principalmente del tipo de corriente eléctrica que se use en el ensayo. Existen los siguientes tipos de corrientes:

- **Corriente directa:** Fluye en una sola dirección con un voltaje constante. Se utiliza generalmente para detectar defectos subsuperficiales.
- **Corriente alterna:** Se recomienda el uso de esta corriente para cuando se van quieren encontrar discontinuidades superficiales aplicando partículas magnéticas húmedas. Una de las ventajas es que deja poco magnetismo luego del ensayo.
- **Corriente alterna rectificada:** es un tipo de corriente que pasa por un esquema electrónico compuesto por diodos con el fin de convertirla en corriente continua.

Valor de la corriente de magnetización: La corriente de cada ensayo debe determinarse en el procedimiento correspondiente. La intensidad de la corriente eléctrica debe ser la adecuada para permitir la detección de todas las heterogeneidades superficiales y subsuperficiales relevantes. Debe tenerse en cuenta que una intensidad excesiva produce sobresaturación magnética, dando lugar a indicaciones erróneas; mientras que una intensidad baja genera campos de fuga débiles incapaces de atrapar las partículas [9].

Partículas magnéticas: Son partículas ferromagnéticas muy finas con baja retentividad, baja fuerza coercitiva y alta permeabilidad, preparadas especialmente y coloreadas para incrementar contraste y visibilidad. Las coloradas son usadas bajo luz visible y las fluorescentes bajo luz ultravioleta.

- **Partículas magnéticas secas:** Deben ser ligeras y móviles. Si son alargadas no fluirán fácilmente y no serán mantenidas por el campo de fuga. Y por el contrario si son demasiado finas pueden causar indicaciones falsas o alto contenido, enmascarando indicaciones. Las partículas que se aplican en forma de polvos secos son mezclas de diversos tamaños en ciertas proporciones. Así, mientras las más pequeñas proporcionan sensibilidad, las más grandes ayudan a localizar discontinuidades grandes.
- **Partículas magnéticas húmedas:** Deben poseer las mismas propiedades de las partículas magnéticas secas, pero debido a que están suspendidas en un aceite ligero, agua u otro vehículo, deben ser elaboradas de polvos

más finos. Las partículas se aplican en suspensión en un medio líquido, lo que permite utilizar tamaños mucho más finos. No se recomienda utilizar tamaños grandes ya que se reduce su movilidad y aumenta la tendencia a agruparse debido a la fuerza de arrastre en el líquido.

Desmagnetización: Todos los materiales ferromagnéticos sometidos a un campo magnético conservan, después de cesar la acción del campo, un cierto magnetismo, llamado remanente o residual, que puede ser perjudicial. Existen varios procedimientos para llevar a cabo la desmagnetización, cuyo fundamento se explica mediante el concepto de histéresis y todos ellos operan, de forma general, sometiendo a la pieza a un campo magnético alterno cuya intensidad va gradualmente decreciendo hasta anularse. [9].

Métodos de magnetización:

1. En función del tipo de campo magnético:

Tabla 8: Tipos de campo magnético

Magnetización longitudinal	Se denomina así al método de magnetización que produce un campo magnético en la dirección longitudinal de la pieza. Se obtiene por inducción del campo mediante bobinas o electroimanes. Esta técnica se recomienda para la detección de discontinuidades transversales.
Magnetización circular	En este caso, el flujo de corriente eléctrica que atraviesa la pieza produce un campo magnético cuyas líneas de flujo forman unas curvas cerradas alrededor de la pieza. Este tipo de magnetización se consigue tanto por inducción como por paso de corriente eléctrica a través de la pieza. Se usa para la detección de discontinuidades longitudinales.
Magnetización multidireccional	Este método consiste en aplicar dos o más campos magnéticos, uno longitudinal y otro circular, en direcciones distintas y en sucesiones rápidas de forma secuencial.

Fuente: [9]

2. En función de cómo se realiza la magnetización:

Tabla 9: Tipos de magnetización

Magnetización por conducción de corriente eléctrica:	En esta técnica la magnetización se obtiene mediante el paso de corriente a través de la longitud de la pieza a examinar. Se puede realizar mediante: Puntas de contacto (electrodos): Este técnica induce un campo magnético circular que depende de la distancia entre los electrodos y de la corriente eléctrica que circula por ellos. Se emplea para la inspección de piezas fundidas, soldaduras y en la industria siderúrgica entre otros. Técnica de contacto directo: La magnetización se efectúa por el paso de corriente de un extremo a otro de la pieza. Tiene su mayor aplicación en máquinas estacionarias
Magnetización con solenoide (técnica de la bobina):	En esta técnica la pieza se coloca en el interior de una bobina formada por un arrollamiento de hilos conductores de corriente eléctrica alterna o continua de forma que se crea un campo magnético cuyas líneas de fuerza son paralelas al eje de la pieza.
Magnetización por yugo:	La magnetización se produce por la inducción de un campo magnético generado por un electroimán en forma de "U" invertida que se apoya sobre la pieza a inspeccionar, generando un campo magnético longitudinal entre las patas del yugo.
Técnica del conductor central:	Se caracteriza por el paso de un hilo conductor por el centro de la pieza a inspeccionar. La circulación de corriente eléctrica a través del conductor permite inducir un campo magnético circular en la superficie interna y/o externa de la pieza. Es un método muy adecuado para la inspección de piezas con geometría circular.

Fuente: [9]

Procedimiento para la elaboración del ensayo de partículas magnéticas

Para el desarrollo del ensayo de partículas magnéticas el procedimiento que generalmente se utiliza debe contener los siguientes ítems.

Cabe resaltar que las discontinuidades se pueden observar cuando esta ubicadas perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo magnético.

- Identificación del material de la pieza y la técnica correspondiente para realizar el ensayo.
- Realizar la preparación de la superficie de la pieza que se va analizar, haciendo una limpieza, dejándola libre de suciedad, oxido, aceite, etc, o cualquier otro material que produzca indicaciones falsas al realizar la inspección.
- Direcciones de posicionamiento del equipo.
- Seleccionar el método de evaluación para magnetizar (contactos, yugo, bobina, etc.).
- Establecer las direcciones de magnetización necesarias para identificar las posibles discontinuidades
- Aplicar las partículas magnéticas (secas o húmedas, visibles o fluorescentes).

- g) Hacer inspección y evaluación de la junta luego de aplicar el método.
- h) Las técnicas de desmagnetización y limpieza final.

Aplicaciones para el ensayo no destructivo para el ensayo de partículas magnéticas:

El ensayo no destructivo de partículas magnéticas es una técnica que se utiliza para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos.

- **Producción y fabricación:** para inspeccionar procesos de fabricación, desde los primeros pasos del proceso de fundición hasta que se obtienen las formas finales de los materiales como perfiles, barras, tubos, etc.
- **Ensayos de fabricación:** para inspeccionar productos acabados, como mecanizado, tratamientos térmicos, soldadura.
- **Ensayos en servicio:** para inspeccionar piezas que se encuentre desempeñando su operación.

2.6.3 Ultrasonido.

El ensayo no destructivo de ultrasonido es un método que se basa en la impedancia acústica de los materiales, la cual envía a una respuesta a un monitor por medio de la interacción de una onda acústica de alta frecuencia que viaja a la velocidad de propagación del sonido, con la densidad del material.

Es una técnica con la cual se pueden encontrar discontinuidades internas y superficiales, también es muy utilizado para la medición de espesores en tuberías. El equipo con el cual se realiza este ensayo no destructivo es mediante un palpador el cual contiene un material piezoeléctrico cuya función es transmitir un haz sónico para que se propague a través de la pieza que se está analizando. Al encontrar una nueva superficie, es decir, un cambio de material, la onda se reflejara nuevamente al material piezoeléctrico.

La onda reflejada es detectada por el mismo cristal, originando una señal eléctrica que es amplificada e interpretado en forma de eco por el equipo de medida. La

posición de este eco en la pantalla del equipo es proporcional al tiempo de retorno de la señal y al espacio recorrido por la señal hasta la superficie límite [9].

En 1924 el Dr. Sokolov, desarrolló las primeras técnicas de inspección empleando ondas ultrasónicas. Los experimentos iniciales se basaron en la medición de la pérdida de la intensidad de la energía acústica al viajar a través de un material. Para tal procedimiento se requería un transductor emisor y un transductor receptor. Posteriormente durante la segunda guerra mundial, los ingenieros alemanes y soviéticos se dedicaron a desarrollar equipos de inspección ultrasónica [10].

No fue hasta sino la década de 1940 cuando el Dr. Floyd Firestone logró desarrollar el primer equipo que empleaba un mismo palpador como emisor y receptor, basando su técnica de inspección en la propiedad característica del sonido para reflejarse al alcanzar una interfase acústica [10].

Ventajas de la técnica de ultrasonido

- Una técnica que logra detectar discontinuidades subsuperficiales.
- Logra encontrar discontinuidades a gran profundidad del material, puesto que tiene un poder de penetración alto.
- La prueba entrega los resultados en tiempo real
- Permite determinar el tamaño de la heterogeneidad, su localización y su orientación.
- Buena resolución ya que permite diferenciar dos discontinuidades próximas entre sí.
- Solo es necesario colocar el palpador por un lado del material para inspeccionar.

Limitaciones de la técnica de ultrasonido

- Requiere de patrones de referencia y generalmente no proporciona un registro permanente.
- Está limitado por la geometría, espesor y acabado superficial de las piezas a inspeccionar.
- Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz del sonido.
- La interpretación de las indicaciones requiere mucha experiencia y entrenamiento por parte del operador.

- El equipo puede tener un coste elevado dependiendo del nivel de sensibilidad y sofisticación requerido.

Este ensayo no destructivo menciona algunas propiedades que son importantes en el ultrasonido, estas son las siguientes:

Naturaleza de las ondas ultrasónicas:

El haz sónico es reflejado por las superficies y se refleja cuando cruza una frontera entre dos cuerpos con características diferentes, al encontrar un obstáculo o un borde se difracta, actúa dependiendo del tipo superficie que se está analizando, si es rugosa la señal se dispersa. Dependiendo del material que se esté analizando, la amplitud, modo de vibración, frecuencia, periodo y velocidad de onda cambia.

Longitud de onda: Longitud de onda es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. Es inversamente proporcional a la frecuencia. Conociendo la longitud de onda se puede determinar el tamaño del defecto más pequeño detectable.

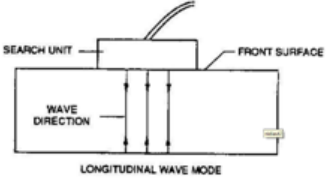
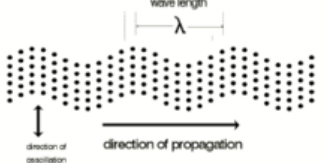
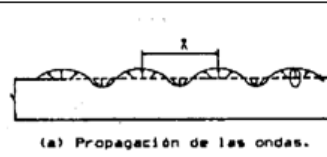
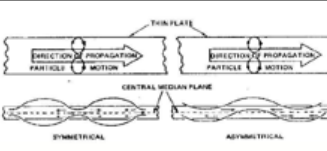
Frecuencia: La frecuencia de una onda de sonido es una medida del número de vibraciones por segundo de un punto determinado. Su magnitud está dada por el palpador.

Amplitud: Es el desplazamiento máximo de una partícula desde su posición cero o de equilibrio.

Impedancia acústica: La impedancia acústica es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica. Es el producto de la velocidad máxima de vibración por la densidad del material. La transmisión y reflexión en una interfase por parte de una onda, son gobernadas en gran parte por la impedancia acústica característica de cada material.

Tipo de onda: Las partículas que forman la red pueden ser desplazadas de su posición de equilibrio describiendo oscilaciones con trayectorias diversas, en función de la energía mecánica aplicada, originando los siguientes tipos de onda.

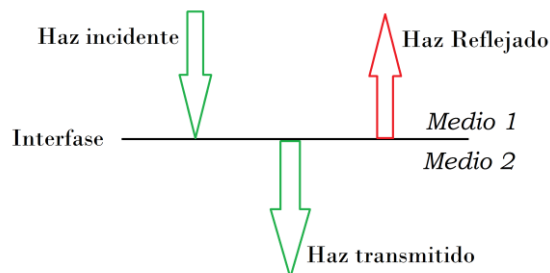
Tabla 10: Tipos de onda

Onda longitudinal	Se caracteriza porque la dirección de vibración de las partículas vibran en el mismo sentido de propagación de la onda. Se puede generar en sólidos, líquidos y gases.	
Onda transversal	Las partículas vibran en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La velocidad de las ondas transversales es aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales, sólo se transmiten en sólidos.	
Ondas superficiales	También llamada Onda de Rayleigh, se propaga solamente en la periferia plana o curva de un sólido siguiendo las irregularidades de la superficie o contorno del mismo, la oscilación de las partículas es elíptica.	
Ondas de Lamb	En el momento en que el espesor sea del mismo orden de la longitud de onda entonces se producirán las ondas de Lamb ó también llamadas Ondas de Chapa.	

Fuente: Autor

Incidencia perpendicular: Una onda incidente tiene incidencia normal, cuando la dirección de propagación es perpendicular a una interfase, es decir que su ángulo de incidencia es cero. Parte de la onda será reflejada y otra parte transmitida. La cantidad de reflexión depende de la relación de impedancia acústica de los dos medios relacionados.

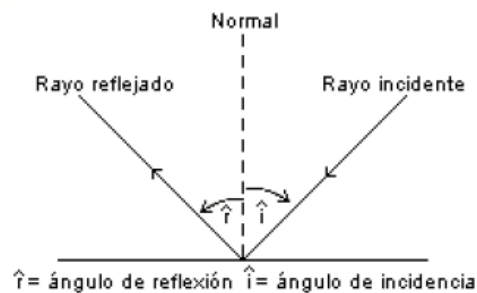
Ilustración 8: Incidencia perpendicular del haz sónico



Fuente: Autor

Incidencia angular: Es la cantidad de energía ultrasónica que es reflejada al incidir en una interfase acústica. El ángulo de onda reflejada es igual al ángulo de la onda incidente de la misma especie. Para esta incidencia se debe tener en cuenta la ley de Snell (ley de reflexión y refracción) las cuales define “*las direcciones de las ondas reflejadas y transmitidas se determinan por la ley de snell, la cual relaciona los ángulos de incidencia de acuerdo a las velocidades del primero y segundo medio.*”

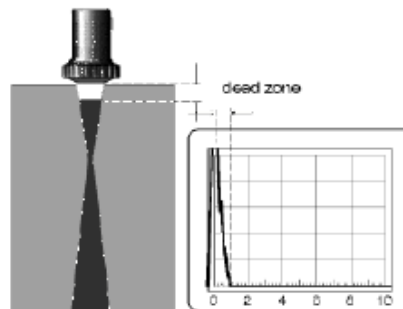
Ilustración 9: Incidencia angular del haz sónico



Fuente: [1]

Zona muerta: Es la distancia que existe entre la zapata y la superficie de la pieza que se está analizando. En esta zona no se puede identificar ninguna discontinuidad puesto que prácticamente es el área del acoplante y además el palpador no alcanza a determinar la señal que está siendo enviada. Esta zona es de gran importancia, se debe tener en cuenta ya que no se pueden analizar materiales de espesores muy delgados.

Ilustración 10: Definición grafica de zona muerta



Fuente: [1]

Palpadores: los palpadores están constituidos por un cristal piezoeléctrico insertado en una montura metálica con una parte libre protegida por una membrana de caucho o una resina especial. En la actualidad existe una gran variedad de palpadores, debido a la gran diversidad de técnicas operatorias, entre los que podemos encontrar:

Tabla 11: Tipos de palpadores utilizados para ultrasonido industrial

Palpadores de incidencia normal	El palpador emite un impulso ultrasónico que atraviesa el material reflejándose en las superficies límite y generando los ecos. Este tipo de palpadores se emplean en la inspección de piezas con superficies paralelas o para la detección de discontinuidades perpendiculares a la superficie de la pieza.
Palpadores de incidencia angular	consisten en un oscilador de ondas longitudinales aplicado a una de las caras de un prisma de plástico, tallado con un ángulo de incidencia adecuado al ángulo de refracción o de penetración que se desee para un determinado material. Se emplean para la inspección de soldaduras y cuando la discontinuidad tiene una orientación perpendicular a la superficie de la pieza.
Palpadores "Phased Array"	se trata de una tecnología especial en la que en un mismo palpador operan decenas de pequeños cristales (de 10 a 256 elementos), cada uno de ellos ligado a un circuito propio capaz de controlar el tiempo de excitación de forma independiente. El resultado es la modificación del comportamiento del conjunto de ondas sónicas emitidas por el palpador.
Palpadores de doble cristal	son palpadores constituidos por dos cristales aislados acústica y eléctricamente de forma que uno de ellos actúa como emisor y el otro como receptor, resolviendo el problema de la zona muerta que presentan los palpadores de un solo cristal. De esta forma es posible la detección de discontinuidades próximas a la superficie de inspección.
Palpadores TOFD	se trata de una tecnología en desarrollo que emplea palpadores de ondas longitudinales para medir la difracción de los indicadores o defectos, por ejemplo en una soldadura.

Fuente: [9]

Acoplantes: el acoplante es un medio que se interpone entre el palpador y la superficie de la pieza a inspeccionar para mejorar el acoplamiento acústico de forma que la onda generada y la receptora por el palpador sufran la menor pérdida de energía posible.

Los ensayos no destructivos de ultrasonido pueden realizarse según diferentes métodos o técnicas. La elección de uno u otro método dependerá de las características geométricas y estructurales de los defectos más probables, de la accesibilidad de estos, etc. Las principales técnicas o métodos son:

Tabla 12: Métodos y técnicas de ultrasonido.

Método de pulso eco:	En esta técnica es un único palpador el responsable de emitir y recibir la onda ultrasónica que se propaga a través del material, lo que permite determinar la profundidad y dimensión de la discontinuidad así como su localización en la pieza. Esta técnica de ensayo es la más utilizada en la práctica por su utilidad y sencillez de aplicación e interpretación.
Método de transparencia o de sombra:	En esta técnica se emplean dos palpadores, uno emitiendo y otro recibiendo la onda ultrasónica, por lo que es necesario que estén perfectamente alineados. Este método no permite determinar la profundidad, dimensión ni localización de la discontinuidad, siendo solamente un ensayo de control de calidad.
Ensayo de inmersión:	En este tipo de ensayos el acople acústico entre el palpador y la pieza se realiza a través de un camino previo en agua. En estos casos el eco de superficie se encuentra separado del impulso inicial una distancia que depende de este camino previo en agua que han de recorrer los impulsos.

Fuente: [9]

Ultrasonido Phase Array:

En la actualidad muchas personas relacionan el ultrasonido con el sector de la medicina para crear imágenes de los órganos internos mediante ondas de alta frecuencia. Pero no solamente se utiliza para este ámbito, en la actualidad ha ido aumentando el uso en sectores industriales enfocados en la inspección de soldadura y medición de espesores.

Los transductores convencionales de ultrasonido para ensayos no destructivos consisten en elementos que envían y reciben ondas a altas frecuencias. La técnica de ultrasonido Phase Array, cuenta con una configuración **sectorial** el cual consiste en el envío de haces que pueden ser desde 16 hasta 256, con diferentes ángulos formando de una especie de abanico a partir de un palpador. De esta forma se puede analizar en una sola pasada tuberías que contengan un gran espesor. La frecuencia más común que se utiliza para esta técnica es de 2 – 10 MHz. A diferencia de detectores de fallas convencionales, ultrasonido Phase Array consiste en barrer con un haz de sonido mediante de una gama de ángulos refractados lo largo de una trayectoria lineal.

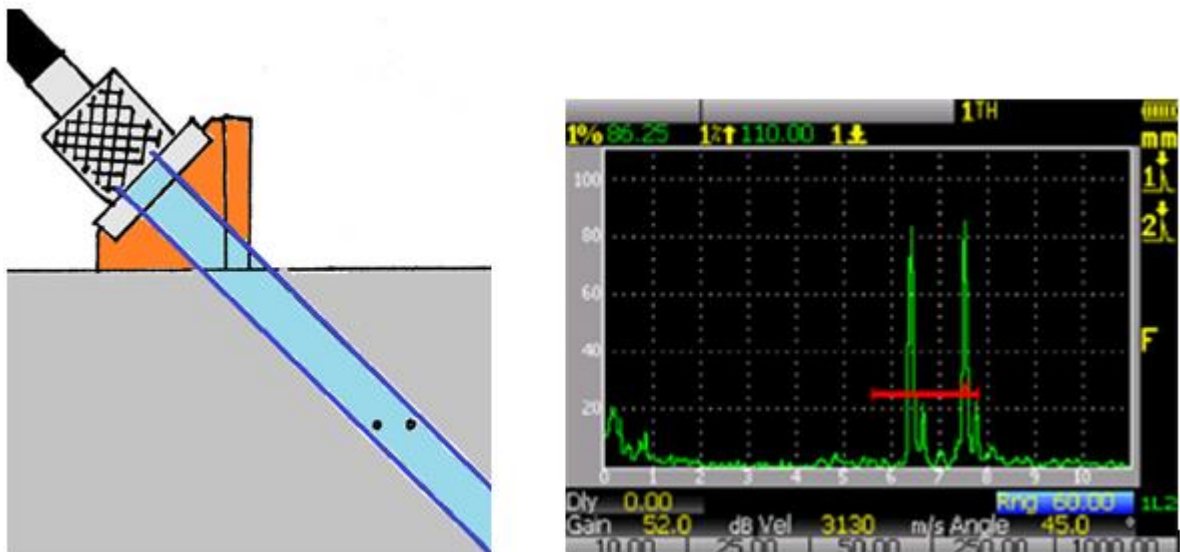
En la mayoría de aplicaciones para inspección de discontinuidades o medición de espesores, los resultados ultrasónicos se basan en el tiempo y la información de

amplitud derivada de formas de onda procesadas. Estas formas de ondas y la información extraída, se presentan cuatro formatos: A-Scan, B-Scan, C-Scan, o S-Scan.

Resultados vistos por A-Scan:

Es una presentación simple formada por el haz de sonido que muestra la amplitud de una señal ultrasónica. Representa el reflejo de alguna discontinuidad existente en la probeta, mostrando a modo de reflexión proporcionalmente a la profundidad de este. Un palpador angular genera un haz a lo largo de un recorrido angular o normalmente llamado sectorial.

Ilustración 11: Representación A-Scan por ultrasonido.

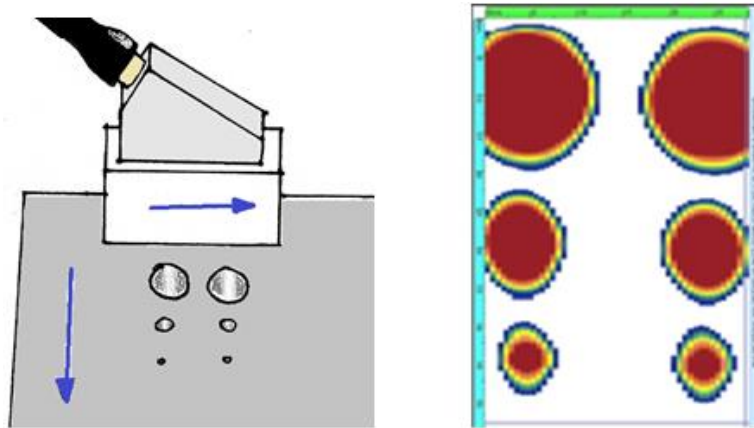


Fuente: [Autor]

Resultados vistos por C-Scan:

Es una presentación en dos dimensiones y muestran una vista superior (en planta) de la pieza de ensayo. El color representa la amplitud de la señal cerrada en cada punto en la pieza de ensayo asignada a su posición. Con en el ensayo no destructivo de ultrasonido Phase Array, la sonda se mueve a lo largo del eje, es decir, paralelamente a la junta soldada.

Ilustración 12: Representación C-Scan por ultrasonido

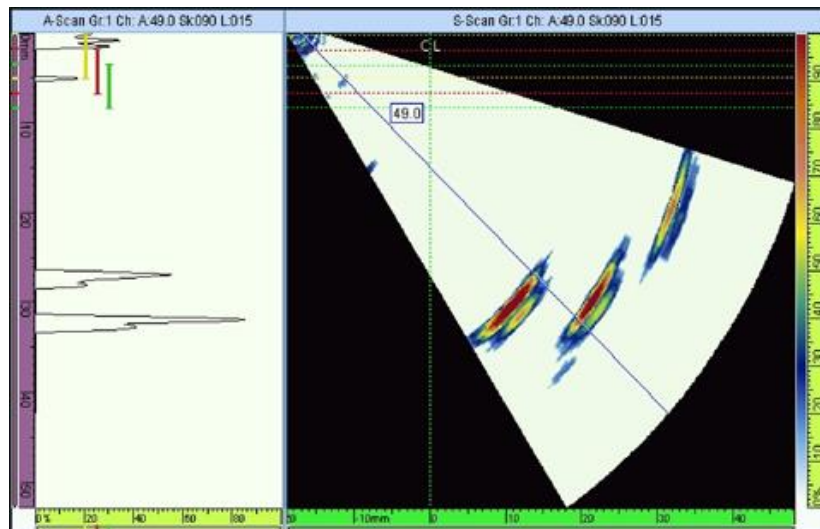


Fuente: [Autor]

Resultados vistos por S-Scan:

Es una representación de la vista de sección transversal en dos dimensiones derivada de la vista A-Scan que ha sido trazada con respecto al tiempo de retardo y el ángulo refractado. El eje horizontal corresponde a probar anchura de la pieza, y el eje vertical a la profundidad. Los barridos del haz de sonido a través de una serie de haces sónicos que generan la imagen de sección transversal se identifica aproximadamente en forma de cono.

Ilustración 13: Representación S-Scan por ultrasonido



Fuente: [Autor]

A continuación se describen las características principales que deben tener en cuenta para el procedimiento de examen por ultrasonido, esta deberá ser realizada por personal calificado.

Estado superficial: Para comenzar cualquier tipo de ensayo no destructivo se debe tener la superficie libre de materiales ajenos a la pieza que se va a analizar, para ultrasonido es muy importante ya que de esto depende el posicionamiento del palpador. También es importante dejar libre de grasas para que se pueda aplicar el acoplante y así se logre una buena interacción entre los componentes que están participando en el ensayo.

Comprobación del equipo: Para obtener un porcentaje de error muy bajo en el ensayo, es necesario ajustar la calibración del equipo de acuerdo a las características de la pieza, las cuales pueden ser espesor, diseño de la geometría de la junta, tipo de materia, etc.

Examen: Los recorridos del palpador deben solaparse, realizarse con movimientos giratorios y no superar los 150mm/s de velocidad de avance [9].

Evaluación: Se evaluarán todas las indicaciones que se encuentren por encima del nivel de evaluación (33%DAC, -10dB). En la evaluación se tendrán en cuenta amplitud máxima de eco, longitud de la indicación, tanto en la dirección longitudinal como transversal, altura de la indicación y caracterizaciones de las indicaciones, según el nivel de aceptación y por requerimiento del cliente [9].

Aplicaciones para el ensayo no destructivo de ultrasonido:

Las principales aplicaciones mediante el ensayo de ultrasonido son:

- Determinación de discontinuidades en los materiales y uniones soldadas.
- Detección de laminaciones en metal base.
- Registro de las propiedades de los materiales.
- Medición de espesores.
- Variación en los espesores.
- Se pueden analizar materiales metálicos y no metálicos.

2.6.4 Radiografía.

La radiografía es un ensayo no destructivo que se utiliza para hacer el análisis de piezas las cuales tengan discontinuidades basándose en las propiedades de los

rayos X o gamma, para atravesar materiales opacos a la luz, creando una película radiográfica de la energía radiante transmitida.

En la radiografía convencional se bombardea un objeto con un haz de Rayos X o Gamma y la porción de radiación no absorbida por el objeto se ha coincidir en la película radiográfica, de modo semejante a la manera en que la luz impresiona a la película fotográfica. Al ser revelada la película se obtiene una imagen de dos dimensiones del objeto. Las variaciones de densidad, espesor y composiciones del objeto inspeccionado causan variaciones de la intensidad de la radiación no absorbida que producirán cambios en la densidad de la película revelada.

La naturaleza de los rayos x provienen de una ampolla de vidrio resiten donde se produce un vacío cuyos extremos son cátodo y ánodo. La desaceleración sufrida por los electrones cuando chocan contra el blanco, producen un haz de radiación X.

La naturaleza de los rayos gamma se da cuando hay dos fuerzas que mantienen unidas las partículas que forma el núcleo de los átomos, cuando estas fuerza se encuentran en equilibrio se dice que el átomo es estable, si algún factor rompe el equilibrio, el átomo pasa al estado excitado. El núcleo de átomo excitado emite el exceso de energía que posee, en forma de radiación gamma, retornando en seguida a su estado estable. Por tanto, mientras los rayos x son emitidos por el frenado de los electrones, los rayos gamma son emitidos por núcleos de átomo excitados.

Ventajas:

- Se pueden analizar materiales metálicos y no metálicos.
- Detecta los defectos que se encuentran internamente.
- Se logra determinar la forma y tamaño del defecto.
- Proporciona un registro permanente del interior del material.
- Es fácil identificar los distintos tipos de discontinuidades.

Limitaciones:

- Equipos económicamente costosos.
- Se limita la inspección al material de prueba.
- Solamente se puede aplicar con la adecuada protección para prevenir problemas de salud originada por la radiación

- Requiere instalaciones especiales, como área de exposición, equipo de seguridad y un cuarto oscuro para el proceso de revelado.
- Requiere personal altamente cualificado y con experiencia.

Elementos esenciales en la aplicación del ensayo no destructivo de radiografía

- Fuente emisora de radiación:
- Pieza que va a ser analizada por el método.
- Un medio por el cual se puedan registrar los datos, es decir, una película.
- Cuarto de revelado

Procedimiento para la elaboración del ensayo de radiografía.

El procedimiento de análisis mediante radiografía exige que las superficies sometidas al examen estén libres de irregularidades, materiales extraños o recubrimientos que puedan interferir en la interpretación de las radiografías. Como fuente de radiación se puede seleccionar un emisor de rayos X de hasta 200kV o de rayos X de Ir-192. El tipo de fuente de radiación se elegirá en función de la máxima energía de radiación admisible para el mínimo espesor a analizar. Para controlar la calidad de la imagen radiográfica se utilizarán indicadores de calidad de imagen (ICI) según lo indicado en las norma UNE-EN 462-1 a 462-5. En el caso de soldaduras deberá tenerse en cuenta el espesor nominal de la pared más el refuerzo de soldadura. En el caso de soldaduras con dos espesores diferentes, se tendrá en cuenta el menor de ellos para elegir el ICI. El número de indicadores ICI que se deben utilizar en cada ensayo viene determinado por el tipo de pieza a estudiar y el de la imagen que se pretenda obtener. Si la interpretación de las radiografías se considera dudosa, debe emplearse la técnica de la doble película. En cualquier caso, el procesado de la película radiográfica deberá hacerse siguiendo las indicaciones del fabricante, pero debe comprobarse que no presentan defectos mecánicos, químicos o de proceso, que pudieran interferir en su interpretación. [9]

3 EXPERIMENTACION.

3.1 VARIABLES CRÍTICAS DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA.

Desde hace varios años la industria en el mundo se ha venido moviendo a pasos agigantados. Existen procesos de unión de materiales como la soldadura donde en la actualidad desempeña un papel muy importante para crear estructuras metálicas en diferentes ámbitos como la industria aeroespacial, naval, petroquímica, automotriz, alimenticia, etc, haciendo la unión de sus materiales normalmente con aceros de bajo carbono y aceros de alta aleación mediante diversos procesos de soldadura.

Como se especificó al iniciar este documento se va a trabajar en el proceso de soldadura conocido como SMAW (Shield Metal Arc Welding). El acero ASTM A36 es un acero de bajo carbono y ampliamente utilizado en la industria metalmeccánica. Su composición química hace que sea fácil de soldar porque es un acero de bajo carbono, por esto a nivel de industrias y estructural en general utilizan gran cantidad de acero ASTM A36, Por dichas razones se decidió utilizar en este proyecto de grado un acero que fuera de uso común en la industria.

A continuación se muestra la *ilustración 14*, en la cual se selecciona el proceso de soldadura sugerido según el tipo de acero que se va a utilizar.

Ilustración 14: Guía de selección de procesos y aportes para aceros estructurales ASTM

Acero	Límite de Fluencia mínimo (MPa)	Resist. a la Tracción (MPa)	Especificación de proceso y material de aporte según AWS
ASTMA36	250	400-550	SMAW AWS A5.1 E60XX E70XX AWS A5.5 E70XX-X SAW AWS A5.17 F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX AWS-A5.23 F7XX-EXX-XX, F7XX-ECXXX-XX
ASTMA53 Grado B	250	415 min	
ASTMA106 Grado B	240	415 min	
ASTMA131 Grado A, B, CS, D, DS, E	235	400-490	
ASTMA139 Grado B	241	414 min	
ASTMA381 Grado Y35	240	415 min	
ASTMA500 Grado A	228	310 min	
Grado B	290	400 min	
ASTMA501	250	400 min	
ASTMA516 Grado 55	205	380-515	
Grado 60	220	415-550	
ASTMA524 Grado I	240	415-586	
Grado II	205	380-550	

Fuente: [12]

Determinar las variables críticas durante el proceso de soldadura es muy importante ya que obteniéndolas, nos puede ayudar como primera instancia a inducir las discontinuidades de falta de penetración y socavado interno a nuestra junta para desarrollar los objetivos planteados al principio de este documento.

Se conocen varios defectos o discontinuidades que aparecen durante el soldeo, independientemente del tipo junta. La falta de penetración y el socavado interno son las discontinuidades foco este documento, por ende se analizarán las

variables esenciales críticas por las cuales aparece el defecto durante el proceso de soldadura. Muchas veces va asociado a una mala preparación de los componentes que se van a utilizar, también a la manipulación de los instrumentos que se requieren en el proceso de soldadura.

En la *ilustración 15* se observa como las discontinuidades son originadas principalmente en el proceso de soldadura.

Ilustración 15 : Discontinuidades que aparecen fundamentalmente en el proceso de soldadura

Discontinuidades		
Referidas al diseño		Cambio de sección Concentradores de tensiones
Originadas en el procedimiento y/o en el proceso de soldadura		Desalineado Socavado Concavidad / convexidad Falta de penetración Falta de fusión Solapado Quemado Contracción Inclusiones Películas de óxidos Cráteres
Originadas en relación con el comportamiento metalúrgico de las uniones soldadas y el proceso de soldadura	Fisuras	En caliente En frío De recalentamiento Desgarramiento laminar
	Porosidad	Localizada Uniforme Vermicular
Producidas o propagadas en servicio	Fisuras	Fatiga Crecimiento estable dúctil Corrosión Creep Fragilización por revenido

Fuente: [12]

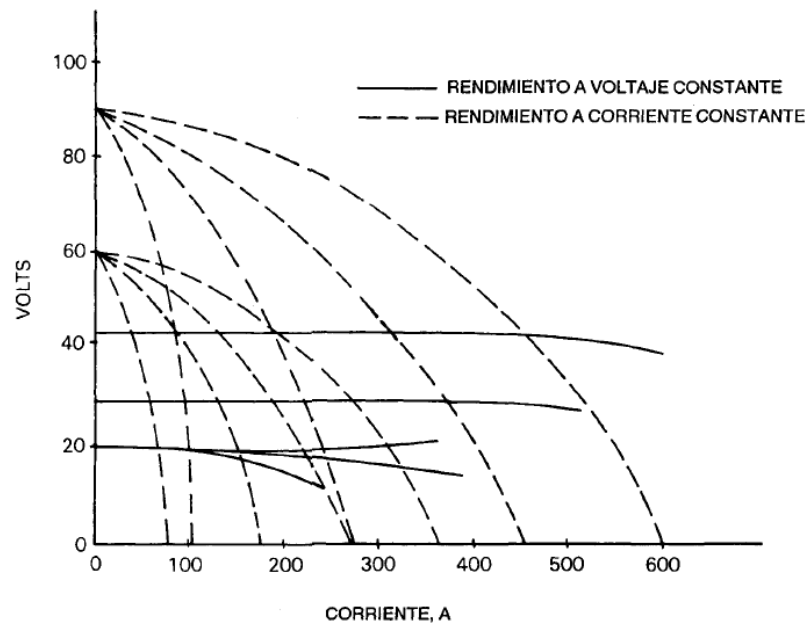
a) Características eléctricas.

- **Amperaje:** Dependiendo del amperaje que se utilice la rapidez de deposición aumentará o disminuirá. Para que durante el proceso no se generen las discontinuidades como socavados, agrietamientos, salpicaduras, es necesario utilizar el intervalo de amperaje recomendado para que el electrodo no se recaliente. Si se utiliza un amperaje elevado se

tendrá como consecuencia la descomposición del recubrimiento del electrodo, una mala protección en el arco y a su vez la aparición de algunos defectos con falta de penetración. Por lo contrario si el amperaje es muy bajo, la entrada de calor es mínima logrando que se generen socavados en el metal base de la junta.

- **Longitud de arco:** La longitud del arco es la distancia entre la punta derretida del núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura. Es importante usar un arco con la longitud apropiada para obtener una soldadura de buena calidad. Para lograrla, el soldador debe tener una buena experticia en la selección de los parámetros esenciales como amperaje, voltaje y diámetro del electrodo, así como también conocimiento de la curva volt-ampere (ver *Ilustración 16*). Esta curva indica que al seleccionar una fuente de potencia se debe escoger una en la cual halla corriente constante para que la pendiente en dicha curva sea mayor y disminuya el cambio en la longitud de arco. Entre menos oscile la longitud de arco se obtendrá una buena calidad en la soldadura.

Ilustración 16: Curva volt-ampere típica para fuentes de potencia de corriente constante y de voltaje constante



Fuente: [3]

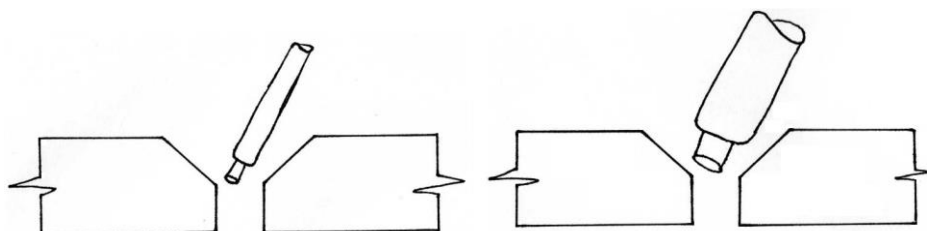
Si la longitud de arco es muy amplia puede ocurrir que el arco eléctrico se apague, el cordón será intermitente y puede existir salpicadura en la pieza.

El voltaje se debe ajustar de acuerdo al amperaje. Para establecer los valores aproximados se deben seguir las magnitudes sugeridas en los catálogos. En la ilustración observamos los valores recomendados para generar una junta soldada ideal con los electrodos seleccionados en este documento. La información detallada sobre los electrodos se encuentran posteriormente en la sección **3.2 Fabricación de la probeta a utilizar** del presente documento.

- **Velocidad de avance:** es la rapidez con que el electrodo se desplaza a lo largo de la unión, esta debe ajustarse de tal forma que el electrodo este siempre adelante del charco de soldadura generado. Debe ser acorde al proceso puesto que si se aumenta la velocidad de avance se genera un franja delgada y al hacer un ligero incremento más puede disminuir la penetración afectando la superficie de la franja que está creando y a su vez crear socavamiento en el metal base. La falta de penetración es generada debido a que el arco eléctrico permanece en el charco de soldadura concentrándose en un punto en vez de ir un poco adelante.
 - **Tipo de corriente:** al manejar una corriente continua en el arco será más fácil para encender, además de ser estable, se da el resultado de un cordón de soldadura más uniforme. Así mismo, se va a soldar una junta en “v sencillo” (*Ver ilustración 3: Diversas geometrías para juntas a tope*) y es ideal porque se utilizará un electrodo con un diámetro específico para raíz.
 - **Polaridad:** La polaridad depende básicamente de la tipo de conexión, es decir, al colocar el electrodo en el lado positivo se va a obtener una mejor penetración, condición para excelente para utilizarla en la raíz por el diseño de junta. El efecto del cambio de polaridad es la fuerza del flujo de electrones que viaja a través de equipo hacia el portaelectrodos, es decir, si se conecta el porta electrodos en el terminal negativo y la masa en el terminal positivo del equipo se dice que se está trabajando en polaridad directa, esto genera una mayor fuerza en arco y se utiliza normalmente para dar buena penetración en uniones soldadas.
- b) Tamaño del electrodo:** El diámetro electrodo es una de las variables más importantes ya que definen los requerimientos mínimos de voltaje, también dependen del tipo de junta se va soldar. Dependiendo del espesor del elemento a soldar se debe realizar previamente la configuración de una junta adecuada. El diámetro del electrodo debe ser elegido para proporcionar la correcta penetración de la junta.

Para explicar de una mejor manera la importancia que tiene el tamaño del electrodo, se crearon las siguientes ilustraciones (ver *Ilustración 17: Comparación diámetro del electrodo*) en donde se observa que es necesario manejar un electrodo de diámetro pequeño para la raíz, y en general para este tipo de bisel, con el fin de no generar otro tipo discontinuidades y hacer más fácil el trabajo para el soldador que está aplicando el cordón de soldadura.

Ilustración 17: Comparación diámetro del electrodo



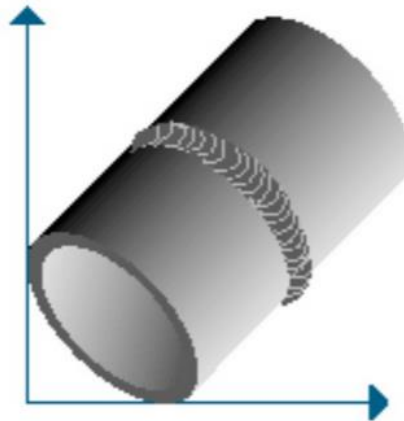
Fuente: [Autor]

- c) Tipo de junta a soldar:** A la hora de realizar el proceso de soldadura es necesario tener en cuenta el tipo de junta que se va soldar para previamente hacer una buena selección de electrodo y así establecer los parámetros de amperaje y voltaje ideales para tener un resultado de calidad.

La mayoría de juntas que unen elementos como tubería de acero poseen configuración de junta a tope y se biselan normalmente en V Sencillo. Las características de la junta seleccionada se pueden observar posteriormente en la *Ilustración 20: Dimensiones de la junta a soldar*, dicha configuración soldada simula el espesor de la línea de tubería, con una resistencia siempre superior al a metal base.

- d) Posición de soldeo:** la posición de soldeo también es crítica ya que va de la mano con las de más variables del proceso de soldadura, es decir, el electrodo, tipo de corriente, el tipo de fuente y el amperaje donde si no se seleccionan de la manera correcta se pueden generar discontinuidades no deseadas. Normalmente los códigos, especificaciones y normas definen y dan nomenclatura a las posiciones de soldeo, dichas posiciones son críticas en calificación de procedimientos de soldadura y soldadores. El cupo de prueba soldado en el presente proyecto se realizó en posición 6G que se observa en la *Ilustración 18*, dicha posición, es la más compleja dada por los códigos, especificaciones y normas.

Ilustración 18: Posición de soldeo 6G



Fuente: Autor

Las variables seleccionadas anteriormente son esenciales durante el proceso de soldadura por ende son variables críticas, las cuales si no se seleccionan los valores recomendados por catálogos se puede llegar a crear discontinuidades que afecta a la junta soldada.

Las muestras de las discontinuidades de falta de penetración y socavado interno fueron sacadas conforme a la ubicación en la probeta, pues el propósito del trabajo es mirar como afecta la dicha discontinuidad en la integridad de la unión soldada.

3.2 FABRICACIÓN DE PROBETA A UTILIZAR.

Se debe tener en cuenta que solamente se hizo la junta alrededor de media circunferencia, puesto que al ser de un diámetro de 12", ya es suficiente para poder inducir las discontinuidades de socavado interno y falta de penetración.

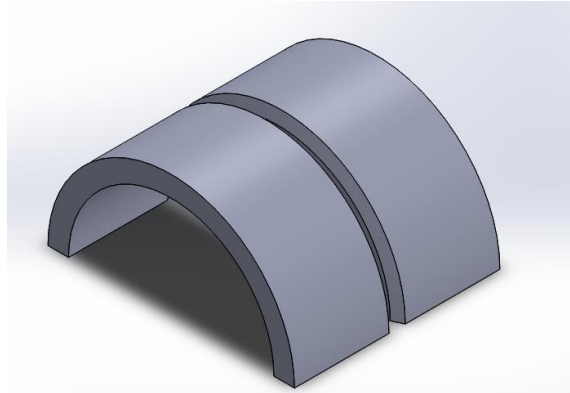
Al ser una junta a tope, el biselado más común es en V Sencilla ya que en la industria es el más utilizado para tuberías. La geometría y las dimensiones de la probeta se muestran en la *Tabla 13, Ilustraciones 19 e Ilustración 20* que se muestran a continuación.

Tabla 13: Geometría y dimensiones de probeta

Diametro tubería	Tipo de Bisel	Espesor	Material	Angulo del bisel	Abertura de raíz
12"	V Sencilla	1/2"	ASTM A36	60°	3,2 mm

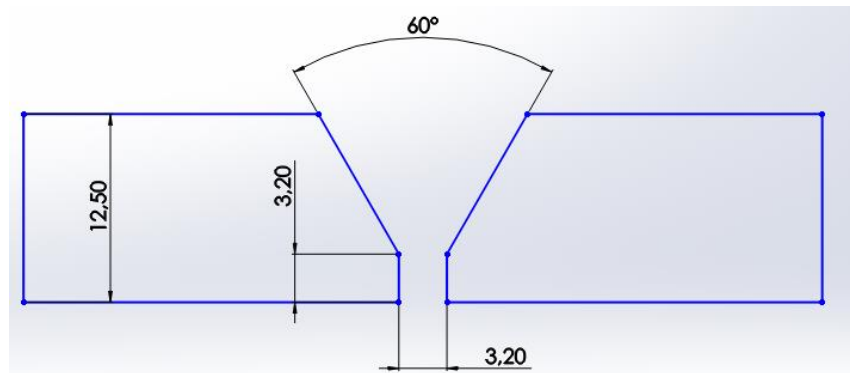
Fuente: Autor

Ilustración 19: Imagen de la probeta en 3D (Realizada en Solid Works)



Fuente: Autor

Ilustración 20: Dimensiones de la junta a soldar



Fuente: Autor

Para la elaboración de la unión de las partes, se realizó en las instalaciones de Instituto West Arco. El soldador Jhon Fajardo, trabajador de la misma empresa, soldó la junta induciendo las discontinuidades con los parámetros adecuados que se observan en las siguientes tablas (Tabla 14: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Falta de penetración y Tabla 15: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Socavado Interno.)

Los electrodos que se van a mencionar a continuación se han seleccionado principalmente por la configuración y geometría del bisel que es en V sencillo. Este tipo de bisel requiere como mínimo dos electrodos: uno para la raíz y otro para el relleno y la presentación del cordón de soldadura. Además son recomendados por el catálogo: *Electrodos para soldar aceros al carbono (AWS: A5.1)* que se encuentra en los anexos del documento como *Anexo 1*, para ser usados en aceros de bajo carbono como lo es el ASTM A36. El electrodo E6010 tiene alta penetración lo cual es ideal para crear raíces. Y el electrodo E7018 es un electrodo bajo en hidrogeno el cual posee características de resistencia y aplicación ideales para la creación del relleno y presentación.

Tabla 14: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Falta de penetración.

FALTA DE PENETRACIÓN				
Electrodos	Diametro del electrodo	Posición	Amperaje	Voltaje
E6010	3/32	6G	70 - 85	18
E7018	1/8	6G	80 - 93	19

Fuente: Autor

Tabla 15: Parámetros para el proceso de soldadura y creación de Socavado Interno.

SOCAVADO INTERNO				
Electrodos	Diametro del electrodo	Posición	Amperaje	Voltaje
E6010	3/32	6G	90 - 110	20
E7018	1/8	6G	90- 120	20

Fuente: Autor

ELECTRODO AWS E-6010

Las características principales de este electrodo son las siguientes: Es un electrodo para acero al carbono formado con hierro en polvo y revestimiento rojo el cual se puede utilizar en toda posición. Se usa en corriente continua conectándolo de manera positiva. Las aplicaciones más comunes son Tanques, tuberías de presión, estructuras de puentes y edificio, cañerías y especialmente cordón de raíz, barco, construcción naval, planchas corrientes y galvanizadas, entre otras. [13]

ELECTRODO AWS E-7018

Las características principales de este electrodo son las siguientes: Es un electrodo para acero al carbono de baja aleación, contiene hierro en polvo. Se usa en corriente continua conectándolo de manera positiva. Tiene excelentes propiedades de impacto a temperaturas bajo cero. Las aplicaciones más comunes son en aceros Cor-Ten, Mayari-R, Lukens 45 y 50, Yolo y otros aceros estructurales de baja aleación, también aceros estructurales de baja aleación A36, A515, A516, A537, construcción y reparación de buques y equipos de minería .[13]

3.2.1 WPS - ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

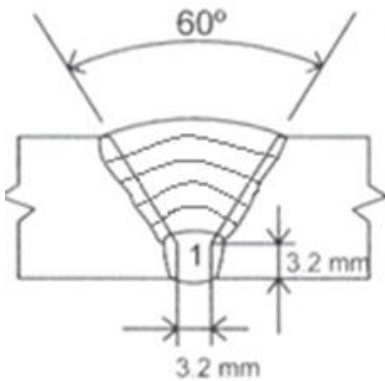
WPS (Welding Procedure Specification), su traducción al español es la Especificación del Procedimiento de Soldadura, es un documento en el cual se relacionan todas las variables esenciales y no esenciales por las cuales se desarrolla el procedimiento de soldadura, en este caso el proceso SMAW. Cada proceso de soldadura lleva sus variables, ya sean esenciales de uso mandatorio o suplementarias, variables que afectan las propiedades mecánicas de la soldadura a obtener.

“El propósito de la especificación del procedimiento de soldar WPS es determinar que el conjunto de partes soldadas propuesto para construcción sea capaz de proveer las propiedades requeridas para su aplicación destinada.” [8]. El WPS establece las propiedades del conjunto soldado, más no la experticia del soldador o del operario de soldadura. Un WPS relaciona las variables, tanto esenciales como las no esenciales y los órdenes aceptables de estas variables.

A continuación se hace una breve descripción de las variables que se deben incluir en la elaboración del WPS para el proceso de SMAW. Cabe resaltar que para cada proceso de soldadura existen sus variables esenciales respectivas.

- Diseño de juntas.
- Metal base.
- Metal de aporte.
- Posiciones.
- Precalentamiento.
- Tratamiento térmico posterior a soldadura.
- Gas
- Características eléctricas.
- Técnica.

Tabla 16: WPS - Especificación de procedimiento de soldadura.

WPS - ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.					
Nombre de la empresa	TESIS	Identificación		1	
Proceso de soldadura	SMAW				
Tipo	Manual	Revisión	1	Fecha	18/08/2014
DISEÑO DE LA JUNTA		METAL BASE			
Tipo de junta	A TOPE			MB1	MB2
Tipo de soldadura	V sencillo	Especificación de acero		ASTM A36	ASTM A36
Abertura de raíz	3.2mm	Espesor del metal		12.5mm	12.5mm
Longitud de cara de raíz	3.2mm	Diámetro		12 in	12 in
Angulo de ranura	60°	METAL DE APORTE			
Backing	N/A			ELECTRODO 1	ELECTRODO 2
Limpieza de raíz	Si, Con esmeril	Especificación AWS		A-5.1	A-5.1
POSICION		Clasificación AWS		E 6010	E 7018
Ranura	6G	TECNICA			
Tubería	Si	Aportación		Oscilante	
PRECALENTAMIENTO		Pase		Múltiple	
No se utilizó en este proceso de soldadura.		Limpieza entre pases		Si	
TRATAMIENTO TERMICO DESPUES DEL PROCESO		Método		Con esmeril	
No se utilizó en este proceso de soldadura.					
CARACTERISTICAS ELECTRICAS EN EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.					
PASE	PROCESO	CLASIFICACION	TIPO DE CORRIENTE		
1	SMAW	E 6010	DC - Electrodo en Negativo		
2	SMAW	E 7018	DC - Electrodo en Positivo		
3	SMAW	E 7018	DC - Electrodo en Positivo		
4n	SMAW	E 7018	DC - Electrodo en Positivo		
INFORMACION GRAFICA DEL PROCESO					
					
ELABORADO POR	SERGIO HURTADO	COMPAÑÍA	TESIS		
APROBADO POR	GILBERTO QUINTERO	FECHA	18/09/2014		

Fuente: Autor

3.3 UTILIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Los ensayos no destructivos que se van a utilizar en el desarrollo de este documento se seleccionaron porque son los adecuados para la documentación y son los que más se utilizan en la industria para el control de calidad en las uniones soldadas. El resto de END existentes no logra definir muy bien las discontinuidades de falta de penetración y socavado interno, por ende, no se aplicaron en este documento. El complementar un ensayo superficial con uno de tipo volumétrico da un 100% de confiabilidad el análisis que se está haciendo en el presente documento.

Los ensayos no destructivos que se van a utilizar son los siguientes.

Ensayos Superficiales

- ★ Líquidos penetrantes (PT).
- ★ Partículas Magnéticas (MT)

Ensayos Volumétricos

- ★ Radiografía (RT)
- ★ Ultrasonido (Phase Array) (UT).

En las siguientes imágenes se observa la junta soldada con los defectos de falta de penetración y socavado interno. Junta en la cual se harán los ensayos no destructivos. Se observa solo media circunferencia ya que tocó dividir en dos partes el tubo para practicidad y comodidad de analizar las discontinuidades ya que se encuentran netamente en la raíz de la junta soldada.

Ilustración 21: Presentación de la junta soldada.



Fuente: Autor

Ilustración 22: Presentación de la junta soldada.



Fuente: Autor

Ilustración 23: Raíz de la junta soldada.



Fuente: Autor

En la *Ilustración 24* se observa la discontinuidad de falta de penetración y en la *Ilustración 26* se muestra la discontinuidad de socavado interno antes de realizar el ensayo.

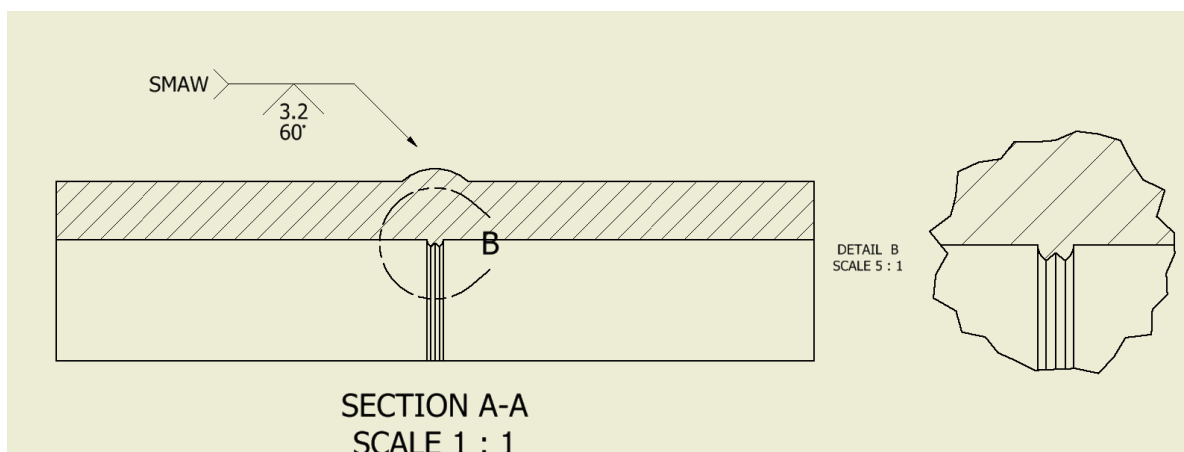
Ilustración 24 : Discontinuidad de falta de penetración inducida en la probeta.



Fuente: Autor

En la *Ilustración 25*, se observa detalladamente como está la discontinuidad de falta de penetración en el cordón de soldadura utilizado para este trabajo de grado.

Ilustración 25: Morfología de la discontinuidad de falta de penetración



Fuente: Autor

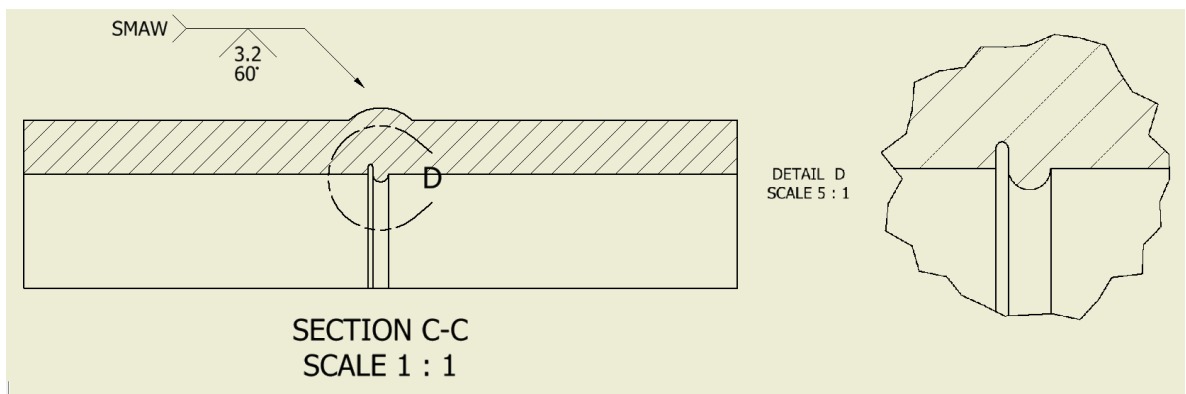
Ilustración 26: Discontinuidad de socavado interno inducido en la probeta



Fuente: Autor

En la *Ilustración 27*, se observa detalladamente como está la discontinuidad de socavado interno en el cordón de soldadura utilizado para este trabajo de grado.

Ilustración 27: Morfología de la discontinuidad de socavado interno



Fuente: Autor

La siguiente imagen (*Ilustración 28: Ubicación y longitudes aproximadas de las discontinuidades en la probeta soldada*) se hizo con el único fin de observar donde se encuentran ubicadas las discontinuidades inducidas en la probeta soldada. Para ver la definición como tal con mejor nitidez los defectos de falta de penetración y de socavado interno podemos observar las ilustraciones: *Ilustración 24*, *Ilustración 25*, *Ilustración 26* e *Ilustración 27*.

Ilustración 28: Ubicación y longitudes aproximadas de las discontinuidades en la probeta soldada

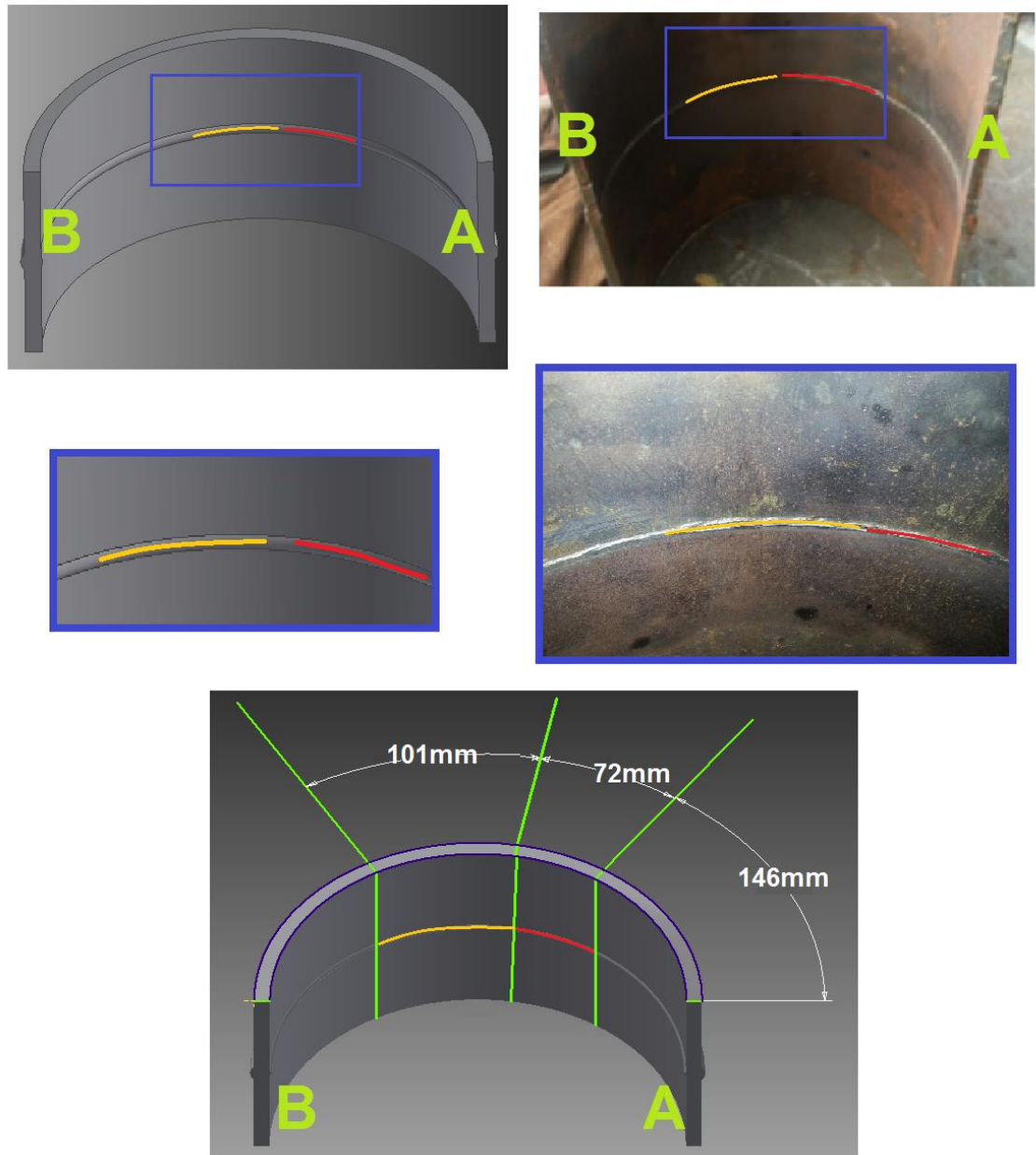


Imagen ampliada para ver la ubicación de las discontinuidades en la raíz del cordón de soldadura.

- Socavado Interno
- Falta de penetración

Fuente: Autor

3.3.1 Ensayo de Líquidos Penetrantes.

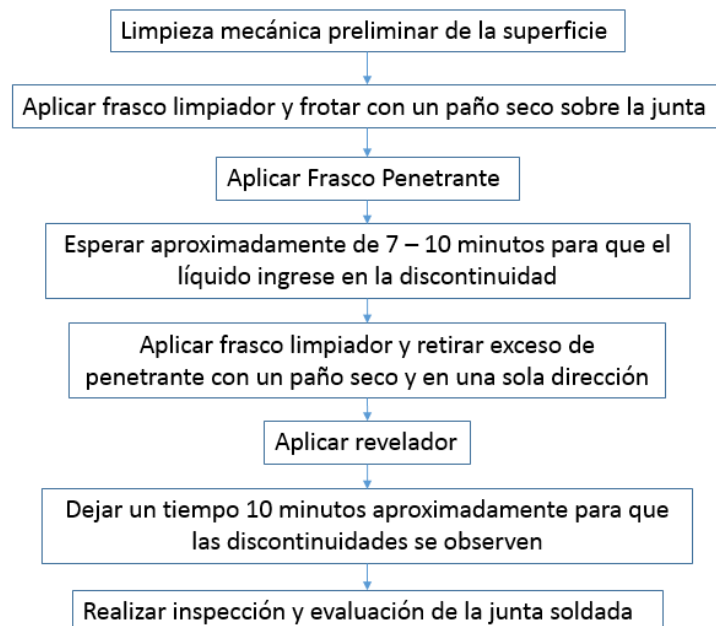
Los líquidos penetrantes, un ensayo no destructivo que ha incursionado en la industria y ha cogido mucha fuerza en los últimos años, con el que se puede determinar la defectología que se encuentre únicamente sobre la superficie del material que se va a analizar. Se realiza este ensayo para que sirva como apoyo a los demás END en la caracterización de la morfología de las discontinuidades en una junta soldada por proceso SMAW de tubería ASTM A36.

El método que se escogió para realizar el ensayo fue **Tipo II (coloreados) Método C (Removable con solvente)**. Este método es el mas común, económico y sin muchas complicaciones a la hora de desarrollarlo.

Procedimiento para el desarrollo del Ensayo no destructivo de Líquidos Penetrantes

A continuación se observa un diagrama de flujo con las etapas correspondientes del procedimiento sintetizando los pasos principales que se debe realizar con el END de líquidos penetrantes.

Diagrama de flujo 1: Procedimiento Ensayo no destructivo de Líquidos Penetrantes



Fuente: Autor

Los líquidos que se utilizaron en el procedimiento son los siguientes:

Ilustración 29: Kit de Líquidos penetrantes



Fuente: Autor

Limpieza de la superficie del material:

La preparación de la superficie se refiere a la limpieza de la pieza, específicamente en el lugar que se va analizar. La efectividad del ensayo está determinado por este paso, cuando no se logra una buena limpieza se crean indicaciones falsas originadas por procesos metalúrgicos, de fabricación, de controles de calidad, ensayos no destructivos realizados anteriormente y también por las condiciones de servicio a las que está sometida la superficie de la pieza. Al mismo tiempo los contaminantes pueden hacer que las propiedades de los líquidos penetrantes se reduzcan y así la veracidad de los resultados. Se recomienda limpiar 1 pulgada hacia los lados del cordón de soldadura.

Limpiar perfectamente la zona que se va a analizar dejándola libre de suciedad y partículas extrañas y ajenas al material. Dejar un tiempo adecuado para que se seque la superficie para proceder con el ensayo.

Se utilizó como primera instancia realizar una limpieza mecánica alrededor, en la presentación y en la raíz de la junta soldada, haciendo un mayor enfoque en la raíz ya que es nuestra área de interés.

Una vez realizada la limpieza mecánica, se procede a limpiar con un trapo utilizando el **Cleaner SKC-S de Magnaflux** mostrado en la *Ilustración 29*, se frota sobre la presentación y la raíz de la junta y al 1 pulgada alrededor del cordón como se indicó anteriormente para garantizar que las discontinuidades que estén allí superficialmente se evidencien.

Ilustración 30: Limpieza de la superficie



Fuente: Autor

Aplicación del penetrante y tiempo de penetración:

Se cubre el área de interés que se desea analizar con el líquido penetrante para detectar las discontinuidades que se no se ven por inspección visual, luego se debe dejar un tiempo prudente para permitir que el líquido penetrante se introduzca en los defectos.

Luego de aplicar el limpiador se continúa el procedimiento utilizando el penetrante **Penetrant SKL-SP2 de Magnaflux** y se rocía tanto en la presentación como en la raíz a una distancia de 20 cm para que cubra uniformemente el cordón de la junta a inspeccionar.

Ilustración 31: Aplicación de Líquidos Penetrantes



Fuente: Autor

Es obligatorio dejar un tiempo de espera de aproximadamente 7 a 10 minutos con el objetivo de que el penetrante (Penetrant SKL-SP2 de Magnaflux) ingrese a todas las discontinuidades por medio de sus propiedades como por ejemplo la capilaridad, viscosidad, etc.

Limpieza intermedia:

Esta limpieza intermedia es muy importante ya que es la remoción del exceso de penetrante, se debe evitar sacar el líquido que se encuentra dentro de las discontinuidades.

Se realiza con un trapo seco en una sola dirección para que no salga el líquido de las fallas y se hicieron las pasadas suficientes para que quitar el exceso del penetrante.

Por último se aplica Cleaner SKC-S de Magnaflux en un paño refregando el cordón en una sola dirección.

Ilustración 32: Remoción del exceso del penetrante



Fuente: Autor

Aplicación del revelador y tiempo de revelación:

Una vez esperado un tiempo se aplica el revelador que en este caso se utilizó **Developer SKD-S2 de Magnaflux**. Se aplicó tanto en la presentación como en la raíz de la junta soldada.

En las siguientes imágenes se muestra la aplicación del revelador en la presentación de la junta soldada.

Ilustración 33: Aplicación de revelador en presentación.



Fuente: Autor

Ilustración 34: Aplicación de revelador en presentación



Fuente: Autor

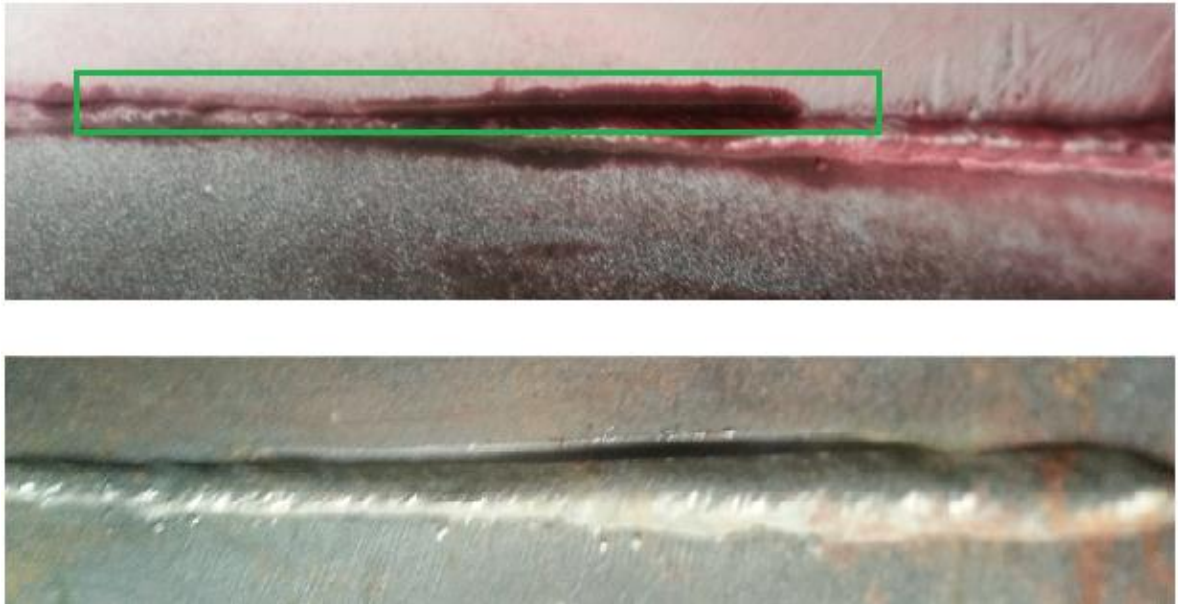
En las siguientes imágenes se ve observa la aplicación del revelador en la raíz de la junta soldada. Se observan claramente las discontinuidades inducidas.

Ilustración 35: Aplicación de revelador en la raíz (Falta de penetración)



Fuente: Autor

Ilustración 36: Aplicación de revelador en la raíz (Socavado interno)



Fuente: Autor

3.3.1.1 Inspección y evaluación por END de Líquidos Penetrantes:

El revelador ayudará a mostrar las discontinuidades de dos formas: 1) Ayudando a salir a la superficie al penetrante atrapado en la discontinuidad y 2) actuando como un medio de contraste para la vista humana, así se ve efectivamente que existe el defecto de falta de penetración y socavado interno a lo largo la raíz.

Discontinuidad de Falta de penetración

La *Ilustración 35* muestra una discontinuidad tipo “Falta De Penetración”. La cuál se originó por el deficiente depósito de metal de aporte un el bisel. Se observa el contraste mostrado entre revelador y penetrante, lo cual hace la fácil identificación de la discontinuidad para el inspector.

Discontinuidad de Socavado Interno.

La *Ilustración 36* muestra una indicación, es la discontinuidad de socavado interno y se identifica fácilmente porque el líquido penetrante se quedó en el metal base afectado por el proceso de soldadura. Se encuentra adyacente a la raíz y se generó probablemente la mala creación del arco eléctrico o una velocidad de

avance alta, haciendo una solidificación del metal de aporte con el metal base rápida.

Este es el resultado de una buena aplicación del método, siguiendo cada una de las etapas. Este ensayo no destructivo de líquidos penetrantes sirve como apoyo y es muy importante para cumplir a cabalidad con los objetivos propuestos al principio de este trabajo ya que nos muestra que realmente existe el defecto.

3.3.2 Ensayo de Partículas Magnéticas.

Las partículas magnéticas (MT) es un ensayo no destructivo que da bastante apoyo, ayuda a complementar estudios que se estén haciendo a piezas complejas y también al mismo a tiempo a determinar discontinuidades y defectos superficiales como socavados, porosidad, entre otros, además que dependiendo del método que se utilice encuentra perfectamente grietas finas que no pueden ser detectadas por ejemplo con inspección visual. Algunas discontinuidades sub-superficiales también pueden ser detectadas teniendo como límite una profundidad de 3mm desde el origen de la superficie.

Se realiza este ensayo para que sirva como apoyo a los demás END en la caracterización de la morfología de la discontinuidad de falta de penetración y socavado interno en una junta soldada por proceso SMAW de tubería ASTM A36.

La técnica que se escogió para realizar el ensayo es mediante un **Yugo Magnético Magnaflux** y partículas magnéticas secas, empleando **corriente directa**. Es el adecuado para analizar discontinuidades puntuales y al mismo tiempo se pueden hacer magnetizaciones en cualquier sentido con el fin de abarcar una mayor area y así no dejar partes sin inspeccionar.

Ilustración 37: Yugo Magnético y Bulbo

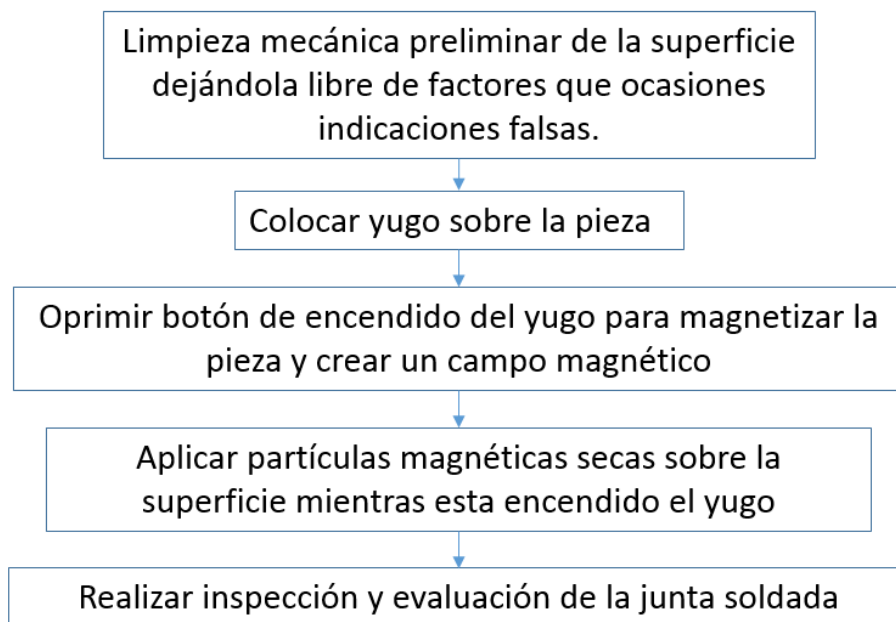


Fuente: (Autor)

Procedimiento para el desarrollo del Ensayo no destructivo de Partículas Magnéticas

A continuación se observa un diagrama de flujo con las etapas correspondientes del procedimiento sintetizando los pasos principales que se debe realizar con el ensayo no destructivo de partículas magnéticas.

Diagrama de flujo 2: Procedimiento Ensayo no destructivo de Partículas Magnéticas



Fuente: Autor

Limpieza preliminar del área que se va a inspeccionar

Tal como se ha comentado anteriormente la preparación de la superficie es un paso muy importante ya que de esta depende la efectividad del ensayo, con la finalidad que no aparezcan indicaciones falsas originadas por grasas, aceites, óxido u otros materiales ajenos a la pieza que se va a examinar.

Al utilizar ensayos no destructivos, se obtiene una ventaja muy grande. La limpieza mecánica de la superficie en este ensayo no es necesario que sea exhaustiva puesto que ya se realizó en el END de líquidos penetrantes. Sin embargo hay que retirar el exceso de líquido que haya quedado en las discontinuidades.

Ubicación del Yugo sobre la pieza y aplicación de las partículas magnéticas.

El Yugo se debe colocar sobre la superficie en posición perpendicular a la dirección de las discontinuidades, pero es recomendable magnetizar la pieza a 45° y 90° para así crear un campo magnético circular y detectar discontinuidades de gran magnitud. Para esta junta se coloca el yugo en la presentación y en la raíz.

Una vez ubicado el yugo, se oprime el interruptor en el mango del yugo para crear el campo magnético. Se seleccionó **corriente alterna** ya que es la ideal para encontrar los defectos superficiales por que proporciona una mayor sensibilidad a la hora de detectar las discontinuidades.

Mientras se mantiene activado el yugo sobre la pieza se van esparciendo las **partículas magnéticas** por medio del bulbo que se muestra en la *ilustración 37*, sobre el lugar de interés. El color de las partículas se define dependiendo el contraste que se quiera obtener con respecto a la pieza para así detectar las irregularidades de una forma más visible.

Ilustración 38: Ubicación del Yugo en la raíz del cordón de soldadura.



Fuente: Autor

Ilustración 39: Ubicación del Yugo en la presentación del cordón de soldadura.



Fuente: Autor

Ilustración 40: Falta de penetración (1) y sovacado interno (2) por END de Partículas Magnéticas



Fuente: Autor

3.3.2.1 Inspección y evaluación

Una vez aplicadas las partículas, se procede a realizar la inspección. Al explorar la junta se observa que hay retención de varias partículas en un punto, indicando que realmente existen las discontinuidades.

Discontinuidad de Falta de penetración

En la *Ilustración 40* se observa la raíz del cordón de soldadura, allí se evidencian la discontinuidad de falta de penetración identificado con el ovalo número 1. Debido a la poca claridad de la imagen, no se puede establecer muy bien la ubicación de los defectos. Para tener una mejor visión de donde se encuentra la discontinuidad se puede observar la *Ilustración 29: Ubicación y longitudes aproximadas de las discontinuidades en la probeta soldada*.

Las partículas magnéticas al hacer contraste con el metal, dejan ver la discontinuidad que se encuentra en la raíz.

Discontinuidad de Socavado Interno.

Como se muestra en la *Ilustración 40* la discontinuidad de socavado interno esta resaltada con el ovalo número 2, la indicación que aparece se identifica porque las partículas magnéticas se agruparon. Al igual que con el defecto de falta de penetración, se logra estimar que hay una irregularidad en el material, en este caso, el cordón de soldadura, pero no es muy claro el tamaño total de la discontinuidad. De la misma manera como se comentó anteriormente, para tener una mejor visión de donde se encuentra la discontinuidad se puede observar la *Ilustración 28: Ubicación y longitudes aproximadas de las discontinuidades en la probeta soldada*.

Posteriormente en la sección **3.4 Tabla de comparación discontinuidades – ensayos no destructivos**, se encuentra la *Ilustración 54: comparación grafica de las discontinuidades*, en la cual se observan los ensayos no destructivos utilizados y a su vez las discontinuidades detectadas por estos.

La aplicación de este ensayo nos ha servido para corroborar que existe la irregularidad en el cordón de soldadura, éstas, son las discontinuidades que se están analizando. Las partículas no logran generar un buen contraste con el metal y por ende se dificulta un poco determinar exactamente qué tipo de defecto es.

Como último paso del procedimiento de este ensayo no destructivo en general, se debe desmagnetizar la pieza siempre y cuando esta se encuentre en operación, de lo contrario no es obligatorio realizar esta fase. Para este caso no se desmagnetizó la pieza.

3.3.3 Ensayo de Ultrasonido Phase Array.

Para determinar la caracterización de la morfología de las discontinuidades de falta de penetración y socavado interno se tuvo que realizar una probeta mediante el proceso de soldadura SMAW, una junta soldada con un diseño de “V sencillo” como se ha indicado anteriormente. En la elaboración del ensayo se hicieron varias tomas, las necesarias para definir las discontinuidades nombradas anteriormente en la misma junta y así cumplir con los objetivos de este documento.

El equipo que se utilizó para el desarrollo del ensayo fue un **Olympus OmniScan MX** y su respectivo **Palpador 5L64 A12** y **Zapata SA12-N555**, el acoplante **Metilcelulosa**.

Se utilizó por ser un equipo Phase Array de gran versatilidad el cual maneja diferentes vistas para inspección y posee tecnología de punta.

La técnica de ultrasonido Phase Array, cuenta con una configuración **sectorial** el cual consiste en el envío haces con diferentes ángulos formando de una especie de abanico a partir de un palpador. De esta forma se puede analizar en una sola pasada tuberías que contengan un gran espesor.

Ilustración 41: Equipo Olympus OmniScan (Izquierda), Acoplante (Derecha)



Fuente: Autor

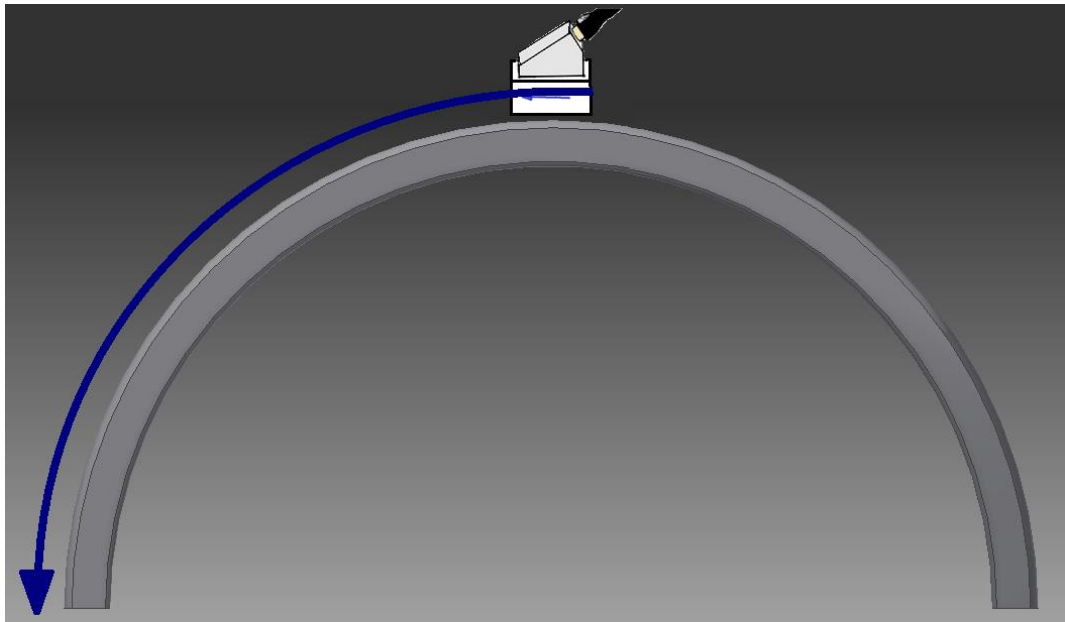
Ilustración 42: Palpador 5L64 A12 (Izquierda), Zapata SA12-N555 (Derecha)



Fuente: Autor

A continuación en la *Ilustración 43: Trayectoria del palpador y zapata sobre la probeta*, se observa el recorrido que realiza la zapata (pieza de polímero semi-transparente) para obtener los datos que se grafican en la diferentes vistas en tiempo real.

Ilustración 43: Trayectoria del palpador sobre la probeta.



Fuente: Autor

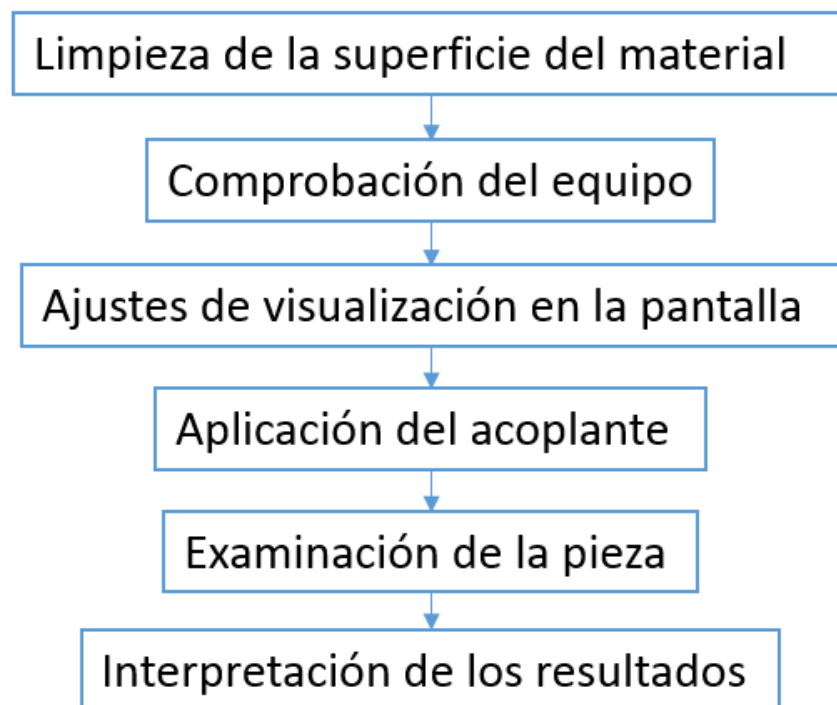
Antes de realizar la inspección, es necesario calibrar el equipo para el espesor de la tubería, para que éste arroje una información veraz.

Se tuvieron en cuenta las vistas A-Scan, S-Scan y C-Scan, las cuales se complementan unas con otras para observar y establecer el tamaño, forma y características propias de las discontinuidades de falta de penetración y socavado interno.

Procedimiento para el desarrollo del Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array

A continuación se observa un diagrama de flujo con las etapas correspondientes del procedimiento, sintetizando los pasos principales que se debe realizar con el END de Ultrasonido Phase Array.

Diagrama de flujo 3: Procedimiento Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array



Fuente: Autor

Limpieza de la superficie:

En primera instancia se debe limpiar muy bien la superficie que se va a analizar dejándola libre de cualquier material extraño, para que al momento de aplicar el acoplante en la superficie no exista ninguna dificultad. Este ensayo se puede realizar sobre superficies rugosas siempre y cuando la distancia entre el palpador y la superficie no sobrepase 0,5 mm. Esta limpieza se realizó con grata mecánica al igual que el ensayo no destructivo de Líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

Comprobación del equipo

Para una buena calibración se debe tener en cuenta como primer paso las dimensiones del bisel de la junta que esta soldada, incluyendo el espesor de la tubería donde posteriormente se evaluarán las discontinuidades que existan en la unión soldada.

Para una buena calibración del equipo y por ende una toma exacta de datos se debe conocer el espesor del material ya que es una variable importante en este proceso.

Dependiendo del tipo de junta se pueden seleccionar múltiples formas de toma de datos así como de recepción, es decir, el número del haz que se visualice en la pantalla de equipo, el rango de haces, la vistas preferenciales (A-Scan, S-Scan y C-Scan). El retado de zapata, sensibilidad, la velocidad a la que viajan los haces en una superficie curva, entre otras.

Una forma correcta de calibrar es colocando la zapata encima del bloque con el acoplante, para por medio de las visualizaciones en el equipo mirar la distancia a la que está un agujero en el bloque de calibración

Una vez realizada la calibración del equipo se procede con la realización del ensayo.

Ajustes y calibración de equipo de ultrasonido para evaluación.

Antes de realizar el ensayo no destructivo, se debe configurar el equipo, es decir, calibrarlo de tal forma que se ajuste a las características que se requiere. Estas características se configuran en el equipo y allí se selecciona como se quiere observar las discontinuidades en la pantalla.

Aplicación del acoplante

El acoplante realiza un papel importante a la hora de permitir el paso de las ondas del palpador hacia la superficie metálica. El que se utilizó fue Metilcelulosa, el cual tiene propiedades como viscosidad, humectabilidad, de fácil remoción, impedancia acústica adecuada y economía al mismo tiempo.

Examen

En esta parte se realizan los recorridos con el palpador sobre la superficie que se quiere analizar, estos recorridos generan las imágenes necesarias para determinar el estado de la soldadura y así observar si hay discontinuidades.

3.3.3.1 Interpretación y evaluación de las tomas realizadas.

En la mayoría de aplicaciones de detección discontinuidades y de medición de espesores, los resultados de la prueba por ultrasonido, se basan en el tiempo y la información de amplitud derivada de formas de onda procesados. Estas formas de onda y la información extraída de ellos y se presentan en varios formatos o vistas. Para este caso se utilizaran A-Scan, S-Scan y C-Scan.

Un A-Scan es una presentación de una onda que muestra en el tiempo la amplitud de una señal ultrasónica. Una forma de onda A-Scan representa el reflejo de una posición del haz de sonido en la probeta.

Una imagen S-Scan o sectorial representa una vista de sección transversal en dos dimensiones derivada de una serie de A-Scan que han sido trazados con respecto al tiempo de retardo y el ángulo refractado.

Un C-Scan es una presentación en dos dimensiones de datos que se muestran como una vista en planta de una pieza de ensayo, donde el color representa la amplitud de la señal en cada punto.

Se realizaron cinco tomas, las cuales fueron suficientes para obtener una caracterización de la discontinuidad de Falta de penetración. Cabe resaltar que estas tomas se grafican desde que el palpador se coloca sobre la superficie de la probeta y a una distancia muy cercana de la discontinuidad de falta de penetración. Para tener esta la distancia se puede referir a la *Ilustración 29: Ubicación y longitudes aproximadas de las discontinuidades en la probeta soldada.*

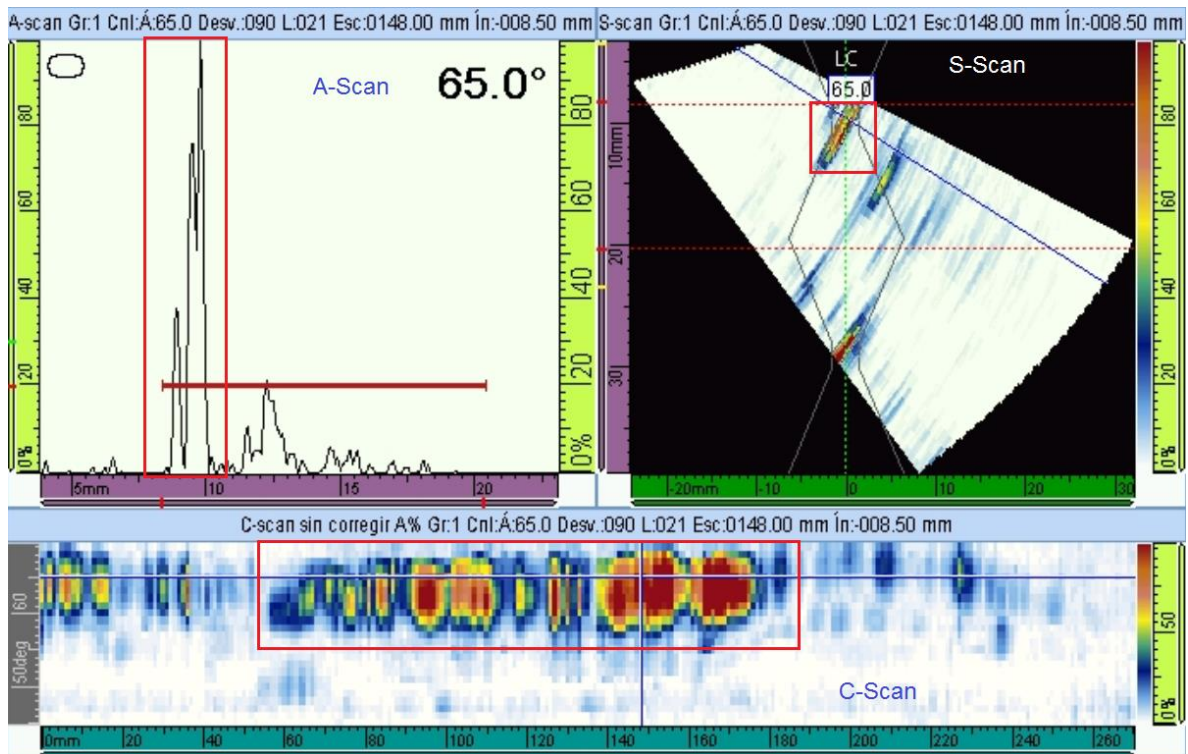
Discontinuidad de falta de penetración

Se hizo la configuración del equipo de tal manera que el defecto se observara en tres vistas A-Scan, S-Scan y C-Scan. Estas vistas se complementan una con otra y nos enseñan en tiempo real el estado de la junta soldada.

Toma 1

En la toma 1 el ángulo que da mejor información sobre el defecto hallado es el de 65° . En el **A-Scan** se observa que a una distancia de profundidad de indicación de 8,5mm existe una señal importante la cual hace referencia a tres picos con tendencia de incremento que llegan hasta un 98%, pico relevante donde señala que ese porcentaje de la energía del haz enviado fue reflejado por el defecto y el otro 10% restante no. El grafico muestra que la falta de penetración se encuentra a 12,25mm de profundidad desde la superficie donde se ubicó el palpador, lo que indica que está en la raíz. Los siguientes picos que se encuentran debajo del 20% son reflexiones que no están perpendicularmente a la superficie, es decir, los haces no llegan directamente a un ángulo de 90° al área que se analiza y por ende los picos generados llegan con poca amplitud.

Ilustración 44: Toma 1 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)



Fuente: Autor

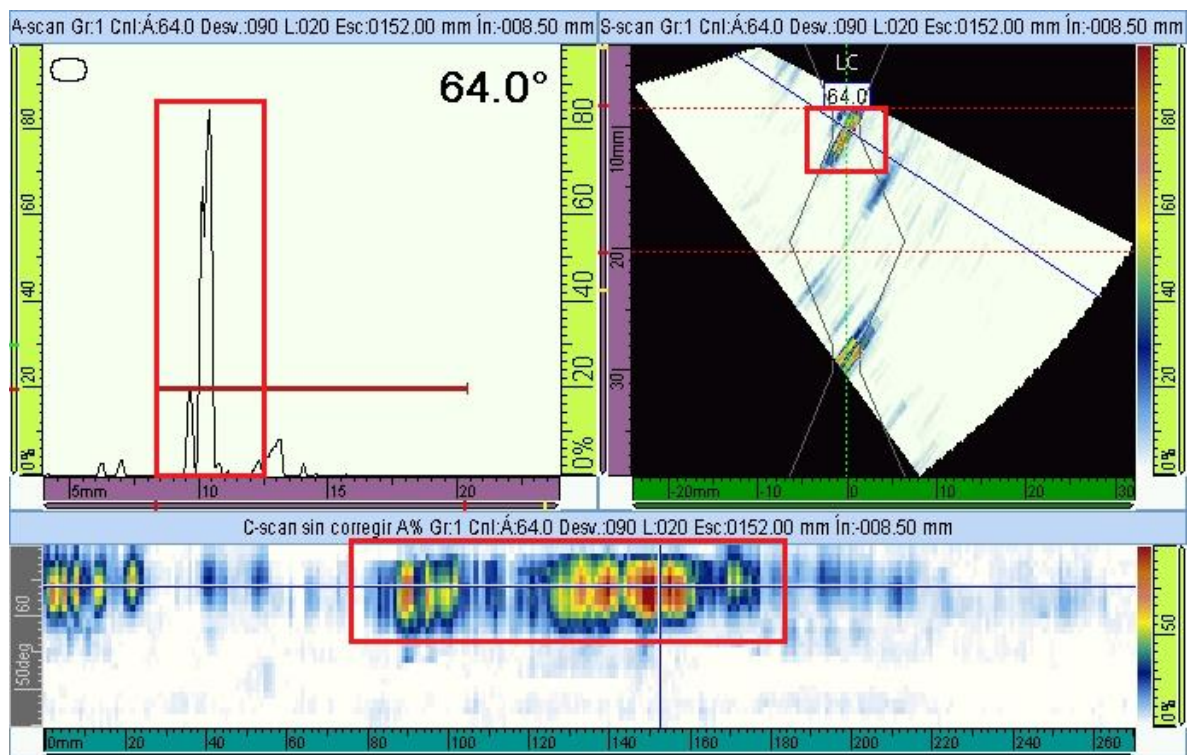
Por medio del **S-Scan** se observa aproximadamente donde se encuentra el defecto. De acuerdo a la tonalidad de los colores hay un cambio de incidencia acústica en la raíz, es decir, un espacio vacío que corresponde al defecto de falta de penetración que genera casi un 100% en la escala de color lo que indica un color rojo dando un resultado de una amplitud considerable y que hay tener en cuenta.

Y por último en la **C-Scan** observamos que a partir de que se empiezan a registrar los datos hay una falta de penetración desde los 60mm hasta 176mm logrando una longitud de 116mm y al mismo tiempo se ilustran los colores mostrando la criticidad del defecto. En 140m hasta 176mm se observa que el volumen del defecto es más grande con respecto al volumen que se grafica de 60mm a 80mm.

También estos picos graficados están directamente relacionados con la manipulación del instrumento a la hora de realizar en ensayo.

Toma 2:

Ilustración 45: Toma 2 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)



Fuente: Autor

En **A-Scan** observamos que se encuentra un primer pico a una distancia de profundidad de indicación de 9,5mm y de la misma forma que en la toma anterior

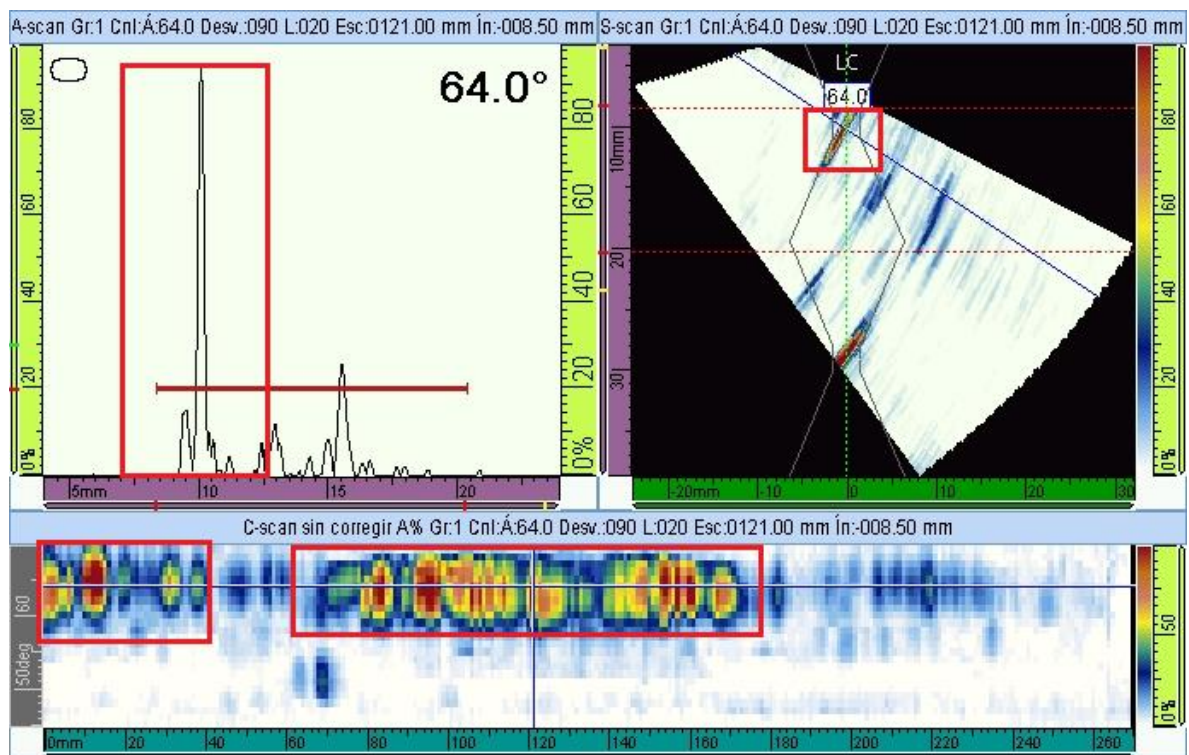
se trata de crear tres picos con su tendencia al incremento creando un pico de gran importancia que llega a un 85% de haz reflejado por el defecto y un 15% restante no se logró reflejar y a su vez se ubica a una profundidad de 10,625mm desde el origen, es decir, la superficie donde se coloca la zapata.

Comparando la toma 1 con la toma 2 nos damos cuenta que el pico de la toma 1 fue más alto con respecto al de la toma 2 porque se encontraba más próximo a la raíz, como lo indican sus correspondientes profundidades. Al observar la vista **S-Scan** de igual forma que en la toma 1 el defecto de falta de penetración con su caracterización de colores en la raíz donde generalmente se ubica este defecto.

En el **C-Scan** se observa que a partir de que se empiezan a registrar los datos hay una falta de penetración desde los 80mm hasta 105mm luego existe una pausa y continua el desde los 125mm hasta 180mm logrando con una longitud de 60mm y al mismo tiempo se ilustran los colores mostrando la criticidad del defecto. A diferencia de la primera toma, se ve que es menos critico por los colores que se grafican.

Toma 3:

Ilustración 46: Toma 3 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)



Fuente: Autor

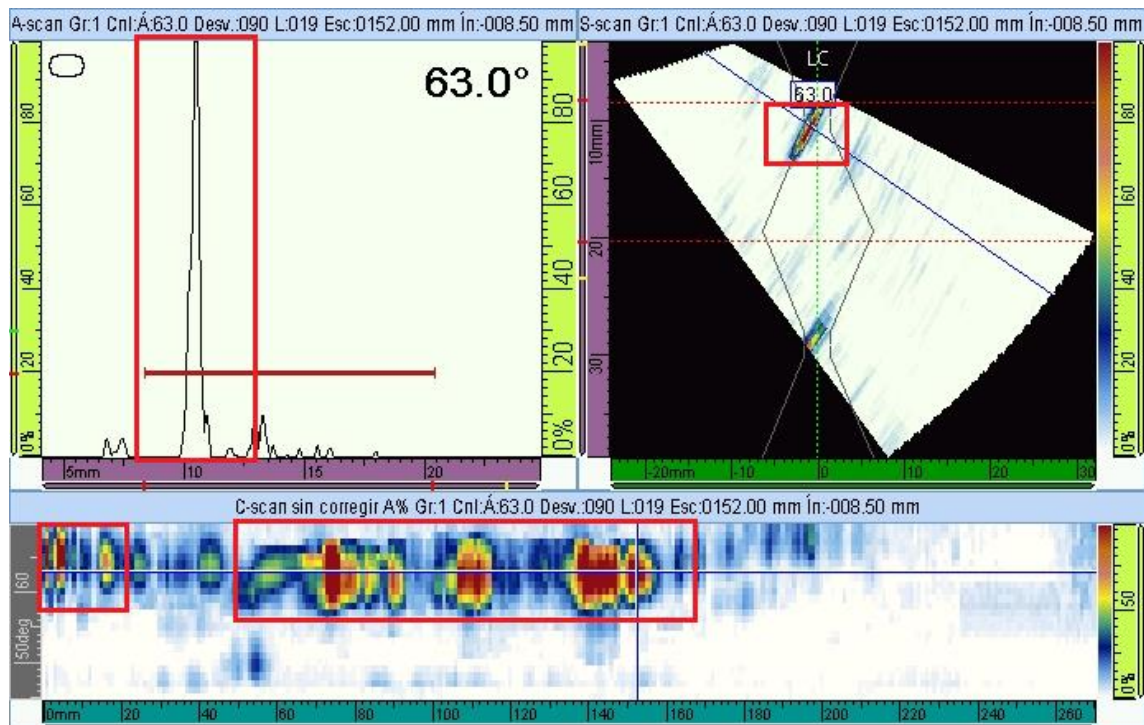
En el **A-Scan** vemos que de igual manera como sucedió en la toma 1 y toma 2 no se crea directamente un pico sino que va en pequeños incrementos pero con la particularidad de que primero se crea uno que va hasta el 14% aproximadamente, baja un poco y sube rápidamente llegando hasta un 94% de haz reflejado por el defecto luego de una distancia de 9mm de profundidad de indicación. La profundidad a la que se encuentra esta indicación es de 11,75mm y el de la misma forma que en la toma 2 se analizó el haz que se encontraba en el ángulo 64° .

En el **S-Scan** se observa que la ubicación del defecto es en la raíz (parte superior del gráfico), según la barra que se encuentra al lado izquierdo del gráfico, la tonalidad de los colores que tiene el defecto corresponde a una indicación relevante y por ende se tiene que considerar.

En el **C-Scan** se observa que a partir de que se empiezan a registrar los datos hay una falta de penetración desde los 80mm hasta 174mm logrando 96mm de longitud, al mismo tiempo se ilustran los colores mostrando la criticidad del defecto. La parte donde mayor volumen se ve es en el fragmento que va de 90mm a 98mm.

Toma 4:

Ilustración 47: Toma 4 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)



Fuente: Autor

En el **A-Scan** para la toma 4 se observa perfectamente en el haz que se encuentra en el ángulo 63° , sin irregularidades que va un poco más del 98% del haz reflejado por el defecto, esto indica que la profundidad a la que se encuentra es casi sobre la raíz, la profundidad a la que se encuentra es 12,25mm de la superficie del material analizado. También se observa que hay unos pequeños picos que aparecen y que están por debajo del 10% de haz reflejado que como se comentó anteriormente son reflexiones que aparecen porque la incidencia de haz ultrasónico no llega a perpendicularmente que son influidas por causas de manipulación. A diferencia de las tomas anteriores este se genera una distancia longitud de raíz de 10mm.

En el **S-Scan** se mira aproximadamente donde se encuentra el defecto sabiendo que la parte de superior del grafico es la raíz. En esta toma se aprecia más el color rojo lo cual nos da entender que es una indicación relevante, es decir, el defecto de falta de penetración se ubica allí.

En el **C-Scan** se observa que desde los 50mm hasta 156mm aparece el defecto, existen fragmentos de coloraciones donde aparece en rojo, allí se ven tres volúmenes uno de 70mm a 78mm, un segundo de 108mm a 118mm y el ultimo de 134mm al final, se interpretan como discontinuidades por la coloración que tienen.

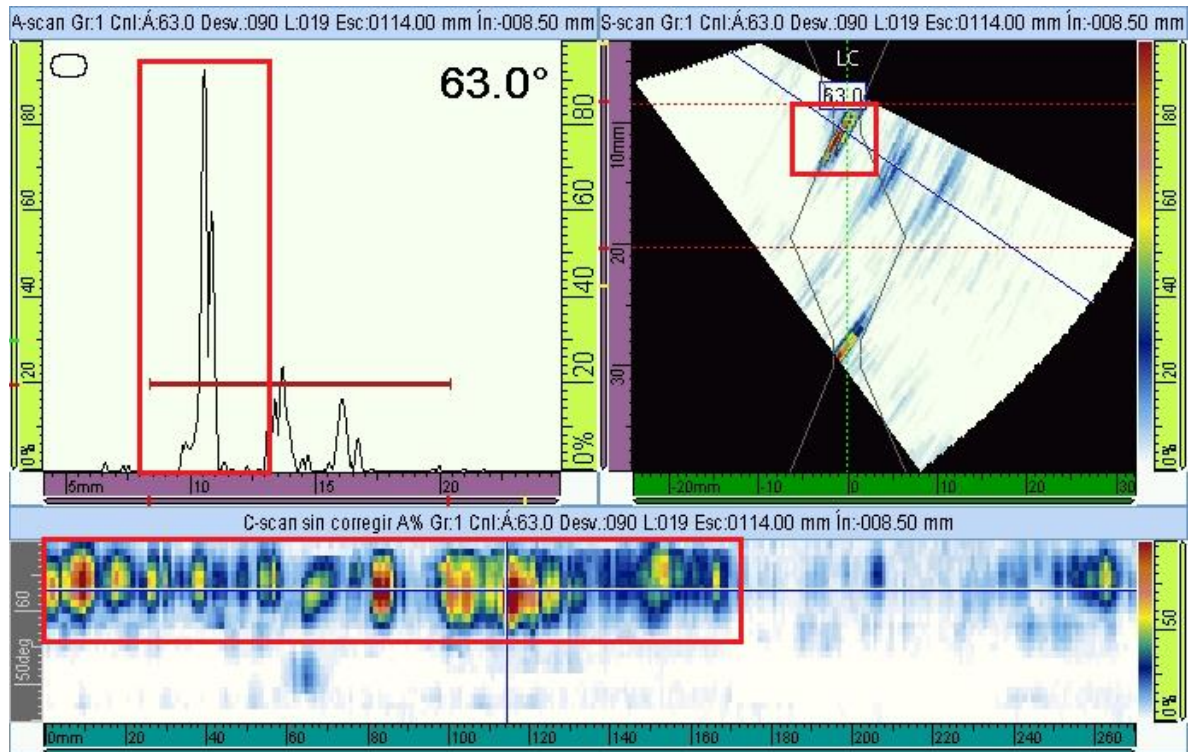
Toma 5:

En la **A-Scan** se observa que también al igual que en la toma 4 el haz que mejor registro el defecto es el ángulo 63° , mostrando que a 9,5mm de profundidad de indicación aparece un pico con las pequeñas escalas que hicieron las demás tomas pero con una diferencia, al alcanzar un 85,5% de energía reflejada el defecto, se presenta una caída hasta el 60%. Este gran pico que se formó logró una profundidad desde la superficie de 10,68765mm. Los siguientes picos adyacentes que se encuentran a una distancia de 12,5mm y 15,3mm respectivamente son generados por la geometría de la soldadura y al mismo puedo por la manipulación del instrumento cuando se hizo el examen.

En el **S-Scan** se observa de igual forma que en las anteriores el defecto de falta de penetración con su caracterización de colores se ubica en la raíz donde generalmente se encuentra este defecto, además de que se muestra roja en algunas partes lo que indica que existe una amplitud de discontinuidad considerable.

En el **C-Scan** observamos que a partir de que se empiezan a registrar los datos hay una falta de penetración significativa desde los 100mm hasta 130mm y al mismo tiempo se ilustran los colores mostrando la criticidad del defecto. A diferencia de las tomas, se ve que es muy poco el defecto.

Ilustración 48: Toma 5 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Falta de penetración)



Fuente: Autor

Socavado Interno

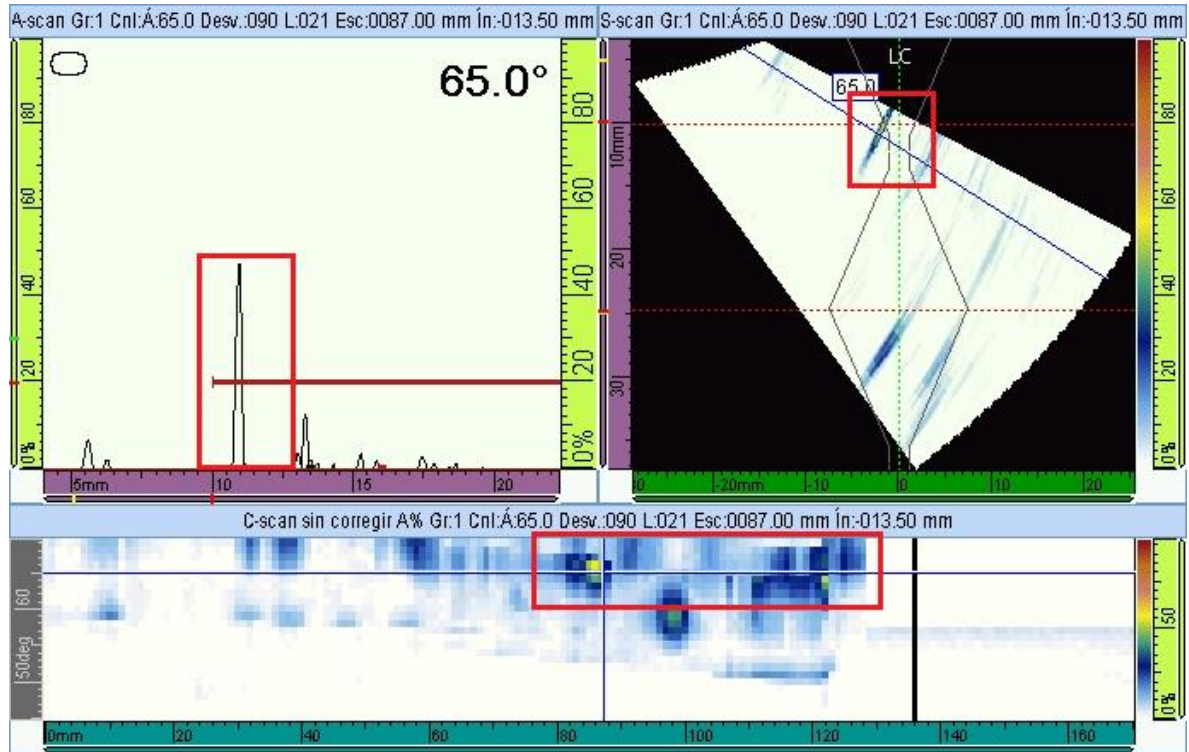
Toma 1

En la vista **A-Scan** el ángulo que da mejor información sobre el defecto hallado es el de 65°. Se observa que a una distancia de profundidad de indicación de 11mm existe una señal importante la cual hace referencia a un pico que llega hasta un 45%, lo cual indica que ese porcentaje de la energía del haz enviado fue reflejado por el defecto y el otro 55% restante no. Los picos que se encuentran debajo del 20% son reflexiones que no están perpendicularmente a la superficie, es decir, los haces no llegan directamente a un ángulo de 90° al área que se analiza y por ende los picos generados llegan con poca amplitud.

En el **S-Scan** se observa la amplitud de la discontinuidad de acuerdo a la paleta de colores que maneja equipo, en este caso dicha amplitud llega a un 45%. Las

tres vistas que han sido seleccionadas A-Scan, S-Scan y C-Scan se complementan entre sí, cada una mostrando indicaciones que definen la discontinuidad.

Ilustración 49: Toma 1 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno)



Fuente: Autor

En el **C-Scan**, en la parte superior se encuentra la raíz de la junta. Se observa que a partir de aproximadamente 75mm por parte del palpador una varianza de la geometría de la raíz y también de la tonalidad del color, lo cual indica el socavado.

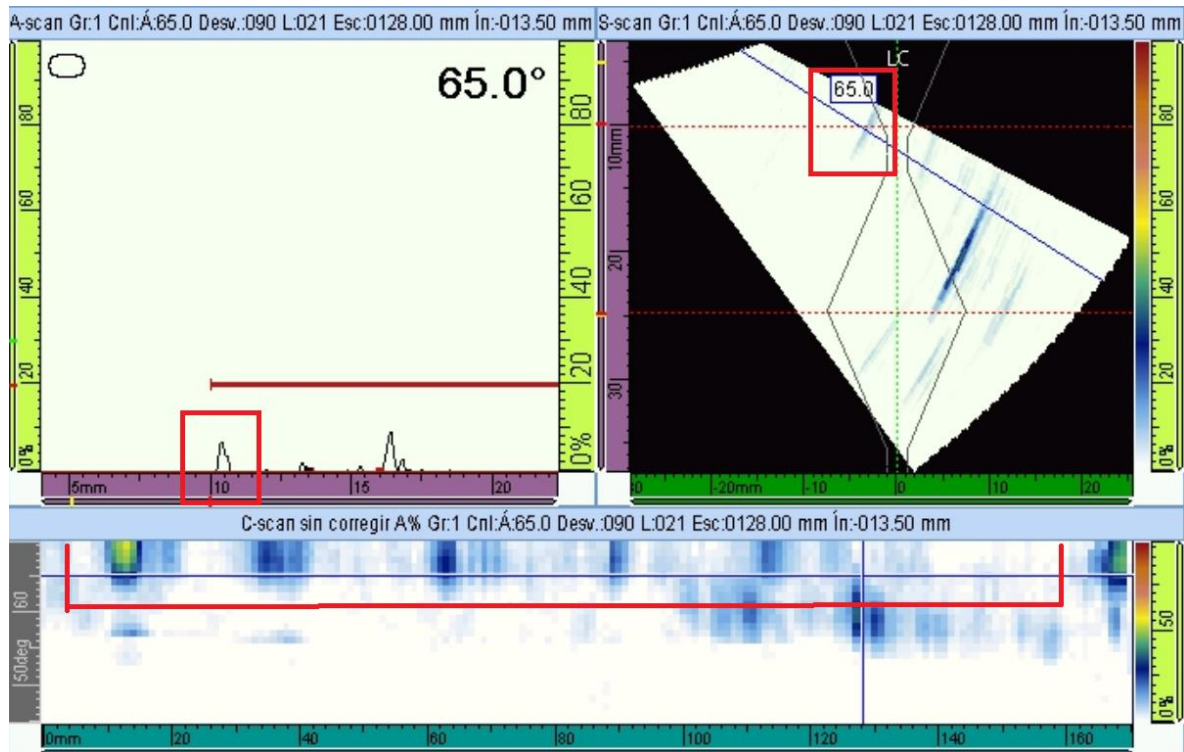
Toma 2

En esta toma hay una diferencia con respecto a la toma 1. En el **A-Scan** se grafica un pico que no es muy alto llega a un 8% aproximadamente de energía del haz reflejado por el defecto luego de una distancia de 10mm de profundidad de indicación. Se analizó el haz que se encontraba en el ángulo 64°.

En el **S-Scan** se observa que la ubicación del defecto es en la raíz (parte superior del gráfico), según la barra que se encuentra al lado izquierdo del gráfico, la tonalidad de los colores que tiene el defecto corresponde a una indicación relevante y por ende se tiene que considerar.

En el **C-Scan** como se había indicado anteriormente la raíz está en la parte superior. Allí se observan varias geometrías con una tonalidad suave en la escala de colores que colora el equipo con el porcentaje nombrado en la A-Scan.

Ilustración 50: Toma 2 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno)



Fuente: Autor

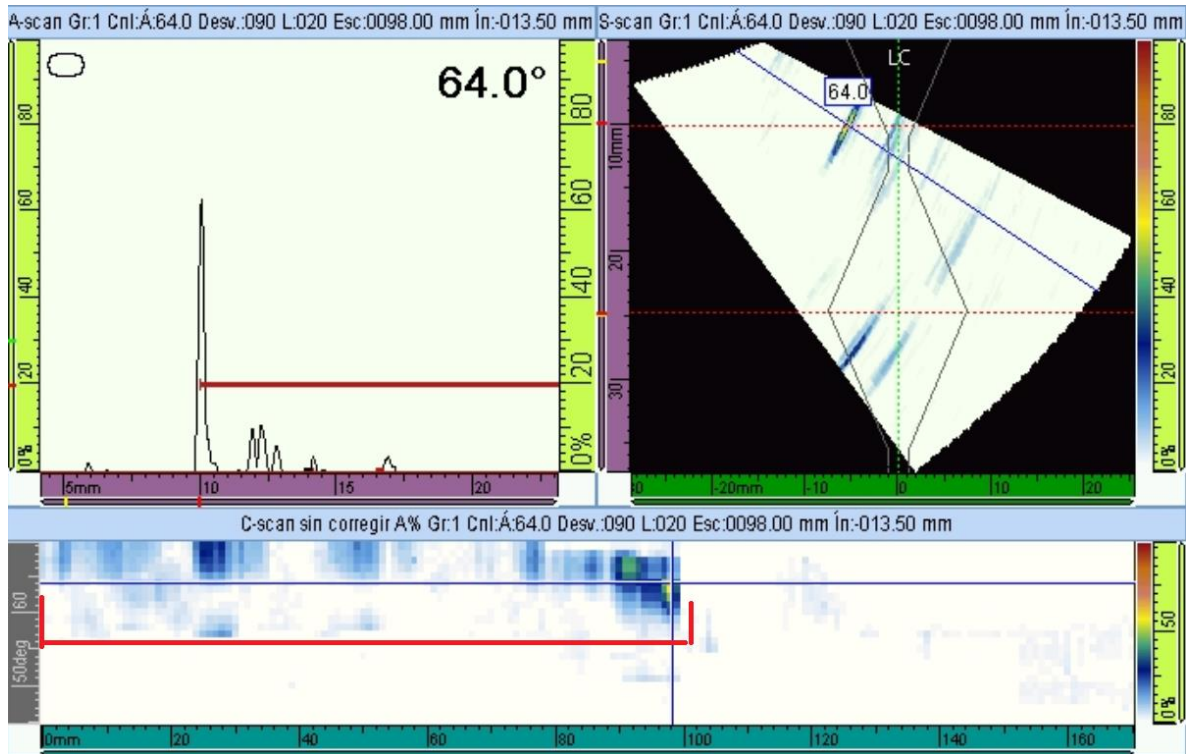
Toma 3

En **A-Scan** observamos que se encuentra un primer pico a una distancia de profundidad de indicación de 9,5m que en la demás tomas para estas vista, se crea un pico con un porcentaje 65% de energía del haz reflejado por el defecto y un 35% restante no se logró reflejar. Esta toma es muy similar a la toma 1, la única diferencia es que esta se analizó en el haz del ángulo de 64° referencian un pico con un mayor porcentaje.

Al observar la vista **S-Scan** de igual forma que en la toma 1 y la toma 2 el defecto de socavado interno da la caracterización de colores en la raíz donde generalmente se ubica este defecto.

En el **C-Scan** se observa que a partir de que se empiezan a registrar los datos hay una socavación desde 0mm hasta 10mm aproximadamente. En esta longitud se observan geometrías que caracterizan la discontinuidad.

Ilustración 51: Toma 3 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno)



Fuente: Autor

Toma 4

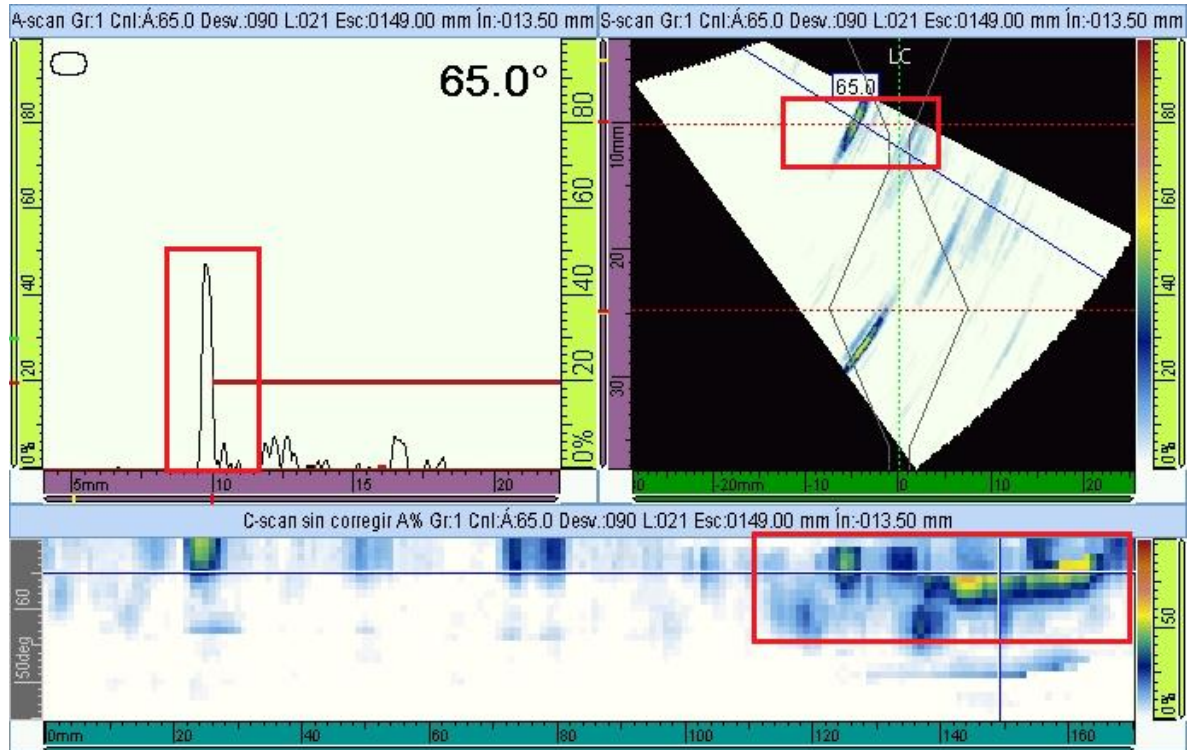
En la vista **A-Scan** el ángulo que da mejor información sobre el defecto hallado es el de 65°. Se observa que a una distancia de profundidad de indicación de 9mm existe una señal importante la cual hace referencia a un pico que llega hasta un 48%, lo cual indica que ese porcentaje de la energía del haz enviado fue reflejado por el defecto y el otro 52% restante no. Los picos que se encuentran debajo del 20% son reflexiones que no están perpendicularmente a la superficie, es decir, los haces no llegan directamente a un ángulo de 90° al área que se analiza y por ende los picos generados llegan con poca amplitud.

En el **S-Scan** se observa la amplitud de la discontinuidad de acuerdo a la paleta de colores que maneja equipo, en este caso dicha amplitud llega a un 45%. Además se observa la ubicación de la discontinuidad. Las tres vistas que han sido seleccionadas A-Scan, S-Scan y C-Scan se complementan entre sí, cada una mostrando indicaciones que definen la discontinuidad.

En el **C-Scan**, en la parte superior se encuentra la raíz de la junta. Se observa que aproximadamente a lo largo de toda la sección analizada por parte del palpador

existen geometrías de la raíz y también una tonalidad del color más fuerte a partir de 140mm, lo que indica la discontinuidad de socavado.

Ilustración 52: Toma 4 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno)



Fuente: Autor

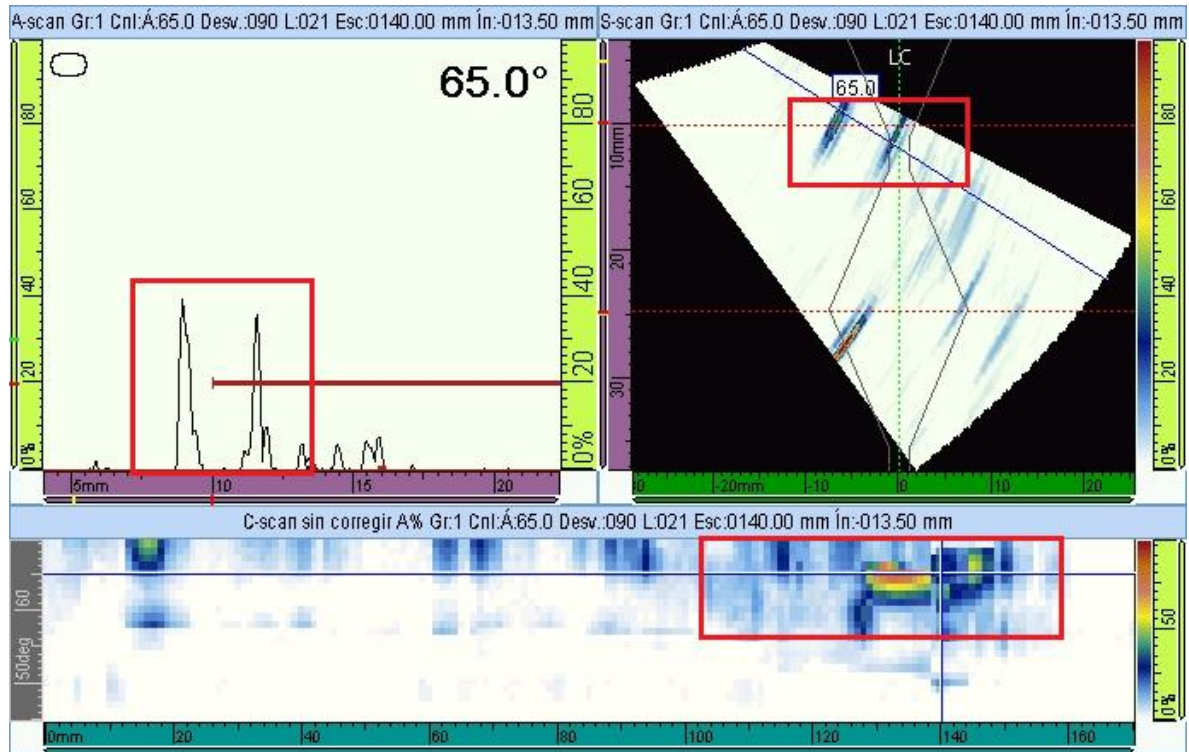
Toma 5

En la vista **A-Scan** el ángulo que da mejor información sobre el defecto hallado es el de 65°. Se observa que a una distancia de profundidad de indicación de 6mm existe una señal importante la cual hace referencia a un pico que llega hasta un 40%, lo cual indica que ese porcentaje de la energía del haz enviado fue reflejado por el defecto y el otro 60% restante no. Seguido a esto, se grafica nuevamente un pico que llega a un 38%. Los picos que se encuentran debajo del 20% son reflexiones que no están perpendicularmente a la superficie, es decir, los haces no llegan directamente a un ángulo de 90° al área que se analiza y por ende los picos generados llegan con poca amplitud.

En el **S-Scan** se observa la amplitud de la discontinuidad de acuerdo a la paleta de colores que maneja equipo, en este caso dicha amplitud llega a un 40% y 38%.

Las tres vistas que han sido seleccionadas A-Scan, S-Scan y C-Scan se complementan entre sí, cada una mostrando indicaciones que definen la discontinuidad.

Ilustración 53: Toma 5 Ensayo no destructivo de Ultrasonido Phase Array (Socavado Interno)



Fuente: Autor

En el **C-Scan**, en la parte superior se encuentra la raíz de la junta. Se observa que a lo largo esta por parte del palpador hay una varianza de la geometría de la raíz y también de la tonalidad del color, lo cual indica el socavado. Esta tonalidad aumenta en el recorrido de 100mm a 160mm.

3.3.3.2 Características principales de las discontinuidades por medio Ultrasonido Phase Array.

En la siguiente tabla se observan los valores numéricos obtenidos por el ensayo. Para las vistas de A-Scan y C-Scan se logró establecer un rango para cada toma y a su vez para cada discontinuidad. En el S-Scan no se obtuvieron valores ya que se observa una imagen con la ubicación aproximada de la discontinuidad donde se grafica en dos dimensiones la sección transversal de la probeta de análisis.

Tabla 17: Valores obtenidos del Ensayo no destructivo de Ultrasonido

Discontinuidad	Toma	A-SCAN				C-SCAN:
		Profundidad desde donde empieza la indicación	Porcentaje de energía			Distancia de discontinuidad
FALTA DE PENETRACION	1	8.5mm	38%	66%	98%	56mm - 180mm
	2	9.5mm	18%	65%	85%	80mm - 178mm
	3	9mm	15%	-	84%	66m - 174mm
	4	10mm	-	-	100%	50mm - 158mm
	5	9.5mm	7%	58%	92%	20mm - 170mm
SOCAVADO INTERNO	1	10.5mm	47%			82mm - 128mm
	2	10mm	9%			0mm - 180mm
	3	9.5mm	64%			20mm - 99mm
	4	9.5mm	47%			116mm - 164mm
	5	8.5mm	38%			114mm - 150mm

Fuente: Autor

Al interpretar la “Tabla 15: Valores obtenidos del Ensayo no destructivo de Ultrasonido” se crean las siguientes conclusiones. Cabe resaltar que para cada discontinuidad se logró obtener muy buena información extraída de las tomas realizadas.

FALTA DE PENETRACIÓN

- ✓ La discontinuidad oscila a una profundidad entre 8,5 y 10 mm y amplitud de pantalla entre 30% y 50%
- ✓ En la falta de penetración hay tres porcentajes que corresponden a una característica propia de la discontinuidad. Estos porcentajes van en incremento que se evidencian en el A-Scan.
- ✓ La mayoría de haces analizados se encuentran en los ángulos 63°, 64° y 65° porque son los que mejor detectaron la discontinuidad
- ✓ Luego del primer pico que se genera por la discontinuidad, aparecen amplitudes que son creadas por que no hay una perpendicularidad entre el haz y la superficie analizada, es decir, los haces no llegan directamente a un ángulo de 90° sobre el área que se analiza y por ende los picos generados llegan con poca amplitud.

- ✓ Los gráficos siempre se encontrarán por lo general con una amplitud de más de 84% de energía absorbida ya que la discontinuidad posee un área de gran magnitud ilustrado en la A-Scan.
- ✓ Al observar la vista C-Scan, las indicaciones aparecieron en la parte superior de esta, indicando que allí se encuentra la raíz de la junta soldada.
- ✓ El rango de longitud del defecto para esta probeta desde 20mm hasta 180mm aproximadamente. Este valor cambia de acuerdo a la aplicación del ensayo.

SOCAVADO INTERNO.

- ✓ La profundidad a la que se encuentran las indicaciones se encuentran en rango de 8,5mm a 10.5mm. Esto varía de acuerdo a la configuración inicial de la vistas.
- ✓ En el socavado interno se grafica solo un pico el cual está en un rango aproximado de 38 % y 60% de energía absorbida.
- ✓ La mayoría de haces analizados se encuentran en los ángulos 63°, 64° y 65° porque son los que mejor detectaron la discontinuidad
- ✓ En la toma 2 no se observan muy bien las características esenciales de la discontinuidad, por ende es muy importante llevar una buena manipulación de equipo durante el desarrollo del ensayo para obtener resultados veraces.
- ✓ El defecto siempre se grafica en la parte superior de la C-Scan puesto que allí se encuentra la discontinuidad, esto quiere decir que es la raíz de la junta soldada.
- ✓ El rango de longitud del defecto para esta probeta desde 0mm hasta 180mm aproximadamente. Este valor cambia de acuerdo a la aplicación del ensayo.

3.3.4 Ensayo de Radiografía.

Procedimiento para el desarrollo del Ensayo no destructivo de Radiografía.

El ensayo de radiografía industrial estudia la teoría de la aplicación de radiaciones x y gama fundamentalmente cuando se relación en la obtención de la placa radiográfica, entendiéndose como tal, la imagen fotográfica producida por un haz de cualquiera de esta radiaciones ionizantes y que tiene como finalidad basándose en las propiedades de las mismas de atravesar los materiales opacos a la luz y de ser absorbida en mayor o menor proporción según la naturaleza y espesor de los materiales, obtener una imagen lo más nítida y fiel en las proyecciones de los defectos que puedan existir en el objeto examinado.

Es un ensayo no destructivo que únicamente se puede realizar por expertos calificados, los cuales tienen los implementos necesarios que garantizan la integridad y seguridad a la persona que está realizando el ensayo. Dado los riesgos que conllevan los rayos gamma, se opta por recomendación del comité de ingenieros especialistas en ensayos no destructivos no realizar dicho ensayo.

3.4 TABLA DE COMPARACIÓN DISCONTINUIDADES – ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Al realizar los ensayos no destructivos concluimos con la siguiente tabla, la cual nos muestra que tipo de ensayo es más eficiente para analizar las discontinuidades planteadas en los objetivos de este proyecto.

Los valores obtenidos por la tabla se establecieron para generar una escala de 1 a 5 donde se observa la nitidez y al mismo tiempo por la facilidad de interpretación de las discontinuidades de socavado interno y falta de penetración, donde el número 1 significa poca nitidez y definición del ensayo y el número 5 traduce gran definición y facilidad de interpretación de las indicaciones que se presentan en la probeta inspeccionada por los ensayos no destructivos.

Tabla 18: Tabla de comparación Discontinuidades Vs Ensayos no destructivos

Discontinuidades vs Ensayo No destructivos			
	Líquidos Penetrantes	Partículas Magnéticas	Ultrasonido Phase Array
Socavado Interno	5	2	4
Falta de Penetración	5	3	5

Fuente: Autor

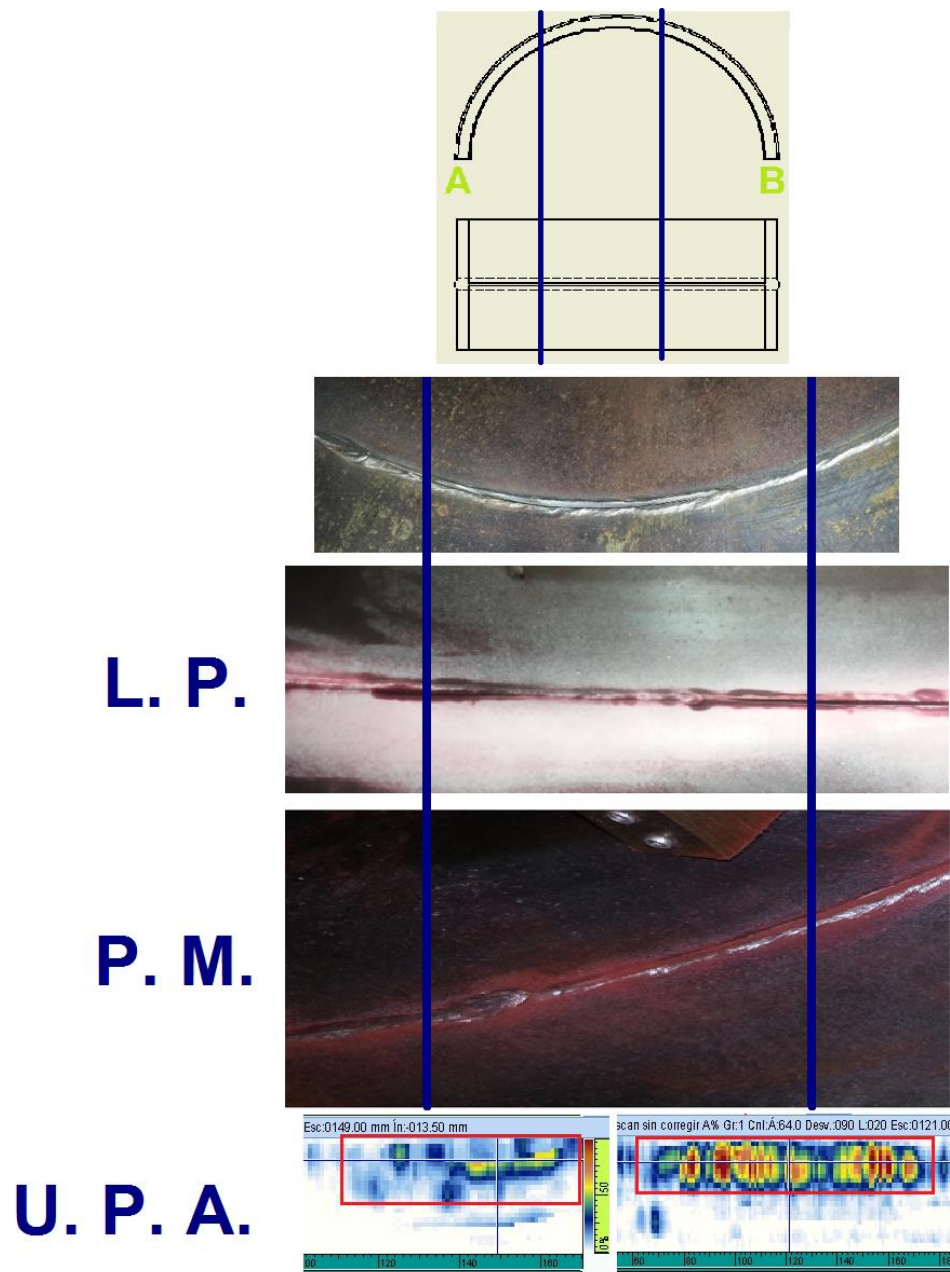
Los líquidos penetrantes tienen propiedades que permiten realizar una inspección solamente superficial. Para los resultados obtenidos por este END se corrobora que las discontinuidades de socavado interno y falta de penetración (discontinuidades superficiales) se lograron identificar completamente.

Las partículas magnéticas lograron identificar las dos discontinuidades, sin embargo para el defecto de socavado interno no se alcanzó a definir de la misma forma como si lo fue para la falta de penetración donde si se observa claramente la discontinuidad.

Ultrasonido Phase Array es un ensayo que identifica discontinuidades volumétricas, en este caso, también se logró determinar las discontinuidades de socavado interno y falta de penetración puesto que están a cierta distancia de la

superficie donde se coloca el palpador, la distancia es el total del espesor de la tubería y es donde se encuentra la raíz. Si se estuviera analizando un defecto a pocos milímetros de la superficie, no se lograría analizar muy bien ya que el paso del haz sónico al cambiar de material genera un pico alto, es decir, la zona muerta, esto interferiría con la lectura de una posible discontinuidad en esta zona.

Ilustración 54: Comparación grafica de las discontinuidades.



Fuente: Autor

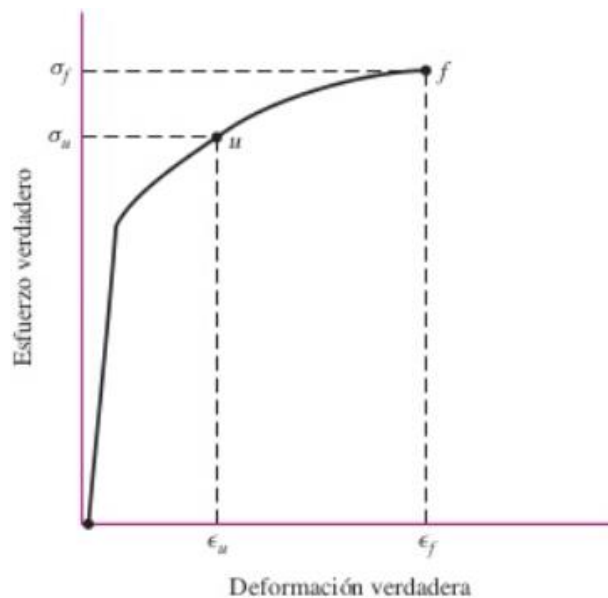
Las siglas de definen: L.P (Líquidos penetrantes), P.M (Partículas Magnéticas), U.P.A. (Ultrasonido Phase Array). Se creó la *Ilustración 54* con la única intención de mostrar cada uno de los ensayos no destructivos aplicados, allí se evidencia las discontinuidades con los métodos aplicados.

3.5 ENSAYO DESTRUCTIVO

El ensayo destructivo se realizó con la finalidad de determinar y comparar mediante pruebas a tensión, el efecto de las discontinuidades de falta de penetración y socavado interno en la unión soldada.

Se hace una prueba de tensión, para determinar la resistencia de un material bajo esfuerzo de tracción, es decir, carga que se aplica de forma normal o perpendicular al plano. Al realizar este ensayo, se crea una gráfica (ver *Ilustración 55: Grafica esfuerzo – deformación*), en esta se muestran diagramas típicos de esfuerzos de materiales dúctiles y frágiles.

Ilustración 55: Grafica esfuerzo - deformación

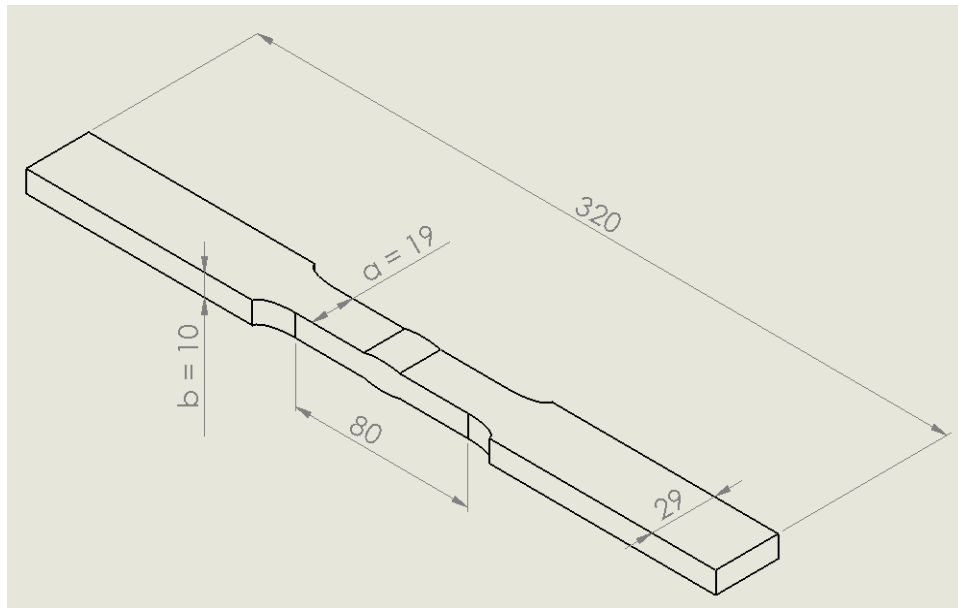


Fuente: [16]

Se utilizaron tres probetas en las cuales se muestra el efecto que tienen las discontinuidades en una junta está soldada. Para realizar el ensayo destructivo se

utilizó la Máquina Universal de pruebas destructivas que se encuentra en la Universidad Santo Tomas. De igual forma en la siguiente ilustración (ver *Ilustración 57*) se muestran las dimensiones de las probetas. Estas tuvieron que ser acondicionadas y maquinadas de tal forma que se lograra inducir la rotura en un área en específico.

Ilustración 56: Dimensiones de las probetas para ensayo de tracción



Fuente: Autor

Ilustración 57: Máquina Universal de pruebas destructivas



Fuente: Autor

Luego de realizar el ensayo de tracción se obtuvieron los siguientes valores para cada una de las probetas:

Tabla 19: Resultados pruebas de tensión en la maquina universal.

	a (mm)	b (mm)	Area (m ²)	Limite de fluencia (Kgf)	Carga Máxima (Kgf)	Esfuerzo de fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)
Probeta sin discontinuidades	19	10	0,00019	8445	9465	44	50
Probeta Falta de Penetración	19	10	0,00019	8000	9070	42	48
Probeta Socavado Interno	19	10	0,00019	5435	6160	29	32

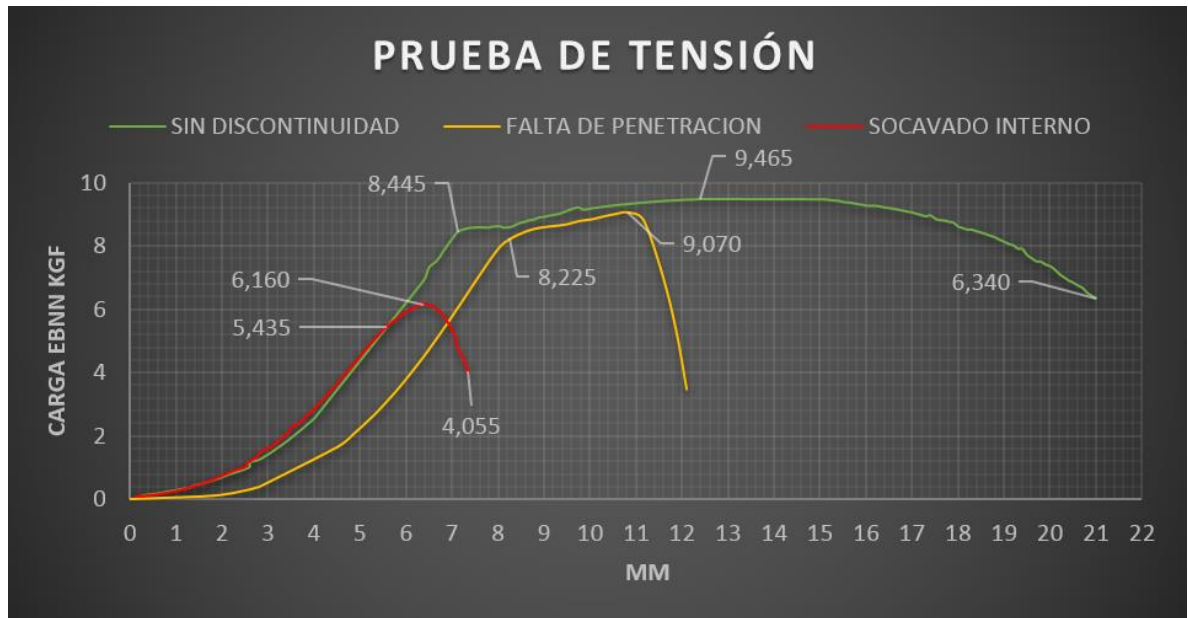
Fuente: Autor

Con los resultados de los ensayos realizados, se obtuvo la siguiente grafica “*Ilustración 58*”, la cual nos muestran una simulación del comportamiento del componente soldado con su respectiva discontinuidad cuando se le aplica una carga a tensión.

Al hacer una comparación entre las probetas con discontinuidades y la que no tenía ninguna, se observa claramente que la zona plástica del componente, se afecta de una forma considerable. Los valores correspondientes de 8000 Kgf para falta de penetración y 5435 Kgf para socavado interno, llegan al límite elástico propio de la probeta con discontinuidad, es decir, alcanza un punto en el que al aplicar más carga el material tomará una deformación permanente cuando se quite la carga. Al hacer contraste con la probeta sin discontinuidad, nos damos cuenta que una irregularidad en el material afecta directamente el comportamiento de este.

Para el esfuerzo último a tensión, una vez en la zona plástica de la gráfica esfuerzo-deformación, los valores son muy diferentes para cada una de las probetas, 9465 Kgf para la probeta sin discontinuidad, 9070 Kgf para falta de penetración y 6160 Kgf para el socavado interno.

Ilustración 58: Prueba de tensión de probeta.



Fuente: Autor

Como ocurre naturalmente con los aceros de bajo contenido de carbono como lo es el ASTM A36, se produce un alargamiento de las probetas luego de haber aplicado el ensayo de tensión.

Sin duda cualquier tipo de discontinuidad o irregularidad en un componente ya sea una estructura sólida o una junta soldada, va a generar una deficiencia en sus propiedades mecánicas, es decir, no cumpliría con las características de diseño necesarias para garantizar que no halla fallas del conjunto en el que está el componente mientras esta en el desarrollo de su función.

Ilustración 59: Probetas de ensayo a tracción finalizado. 1) Probeta sin discontinuidad, 2) Probeta con Fala de penetración, 3) Probeta con socavado interno.



Fuente: Autor

Es importante recalcar que las probetas que tenían las discontinuidades de falta de penetración y socavado interno fallaron por el defecto direccionándose hacia el metal base

3.6 REDACCIÓN ARTÍCULO.

El siguiente es un artículo que se crea con la intención de mostrar de una forma resumida pero completa, para el desarrollo de los objetivos específicos en este documento. Se encuentra en los anexos del documento como *Anexo 2*.

4 CONCLUSIONES.

- 1.** Los ensayos no destructivos, son técnicas utilizadas en el control calidad de diferentes equipos y elementos. Diferentes planes de integridad consisten en determinar, desgaste de material y aptitud para el servicio por medio de ensayos como ultrasonido, radiografía, tintas penetrantes, etc. Pues dichas técnicas dan gran porcentaje de fiabilidad.
- 2.** Existen diferente tipo de discontinuidades en uniones soldadas. Unas más perjudiciales que otras, características como la longitud, ancho y profundidad se pueden determinar mediante diferentes ensayos no destructivos y mirar la criticidad de las continuidades.
- 3.** Un proceso de soldadura lleva variables esenciales las cuales deben ser ajustadas de acuerdo a ingeniería y recomendaciones de fabricantes de consumibles, con ellos se logra el menor número de discontinuidades en el proceso de soldeo.
- 4.** Existen ensayos no destructivos superficiales y volumétricos, lo ideal para garantizar la integridad de unión soldada mediante dichos ensayos es combinarlos, por ejemplo, se puede utilizar tintas penetrantes para determinar la condición superficial de la unión y complementar con ultrasonido para inspeccionar el volumen.
- 5.** Día a día en la industria metalmecánica y petroquímica, códigos de fabricación y evaluación como AWS D1.1, ASME IX, API 1104, incorporan en su conjunto de leyes los ensayos no destructivos como requisito para el control calidad de la fabricación.

5 RECOMENDACIONES.

Al lograr el objetivo planteado al inicio de este documento y basándose en los resultados obtenidos se recomienda utilizar el ensayo de ultrasonido industrial ya que es un ensayo no destructivo fácil y rápido de aplicar. Al mismo tiempo se logra tener los resultados en tiempo real, es decir, no hay que esperar tiempos prolongados para observar las indicaciones halladas sobre la estructura que se está analizando, además al interpretar las posibles discontinuidades, se logra de una manera más sencilla y con características puntuales. Esto no quiere decir que sustituya los demás END, todos se complementan al tener propiedades específicas que faciliten la interpretación de las discontinuidades que se encuentre en material, o estructura que se vaya a analizar.

6 LISTA DE REFERENCIAS

- [1]** Manual de Fundamentos de Soldadura WEST ARCO. (2014)
- [2]** Normative ASTM A36, Standard Specification for Carbon Structural Steel (2012).
- [3]** American Welding Society, Manual de Soldadura. Volumen 1. Octava Edicion. (2013).
- [4]** American Welding Society. Tecnología de inspección de soldadura. Módulo IV. Geometría de juntas soldadas. (2013).
- [5]** American Welding Society. Tecnología de inspección de soldadura. Módulo IX. Discontinuidades del metal base y soldadura. (2013).
- [6]** OERLIKON. SOLDEXA, Manual de soldadura & catálogo de productos. (2012).
- [7]** Miguel Eyheralde, Inspección Especializada de Mecánica General junto al Coordinador Técnico de soldadura UTU CETP. Inspección de soldadura. (2012).
- [8]** Normative ASME SECCION IX. Procedimiento para calificación de soldaduras. (2012).
- [9]** Aimen. Observatorio Tecnológico de Soldadura. [En línea]. (2014). [Citado 28-10-2014]. Disponible en internet:
(http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=category§ionid=5&id=13&Itemid=31)
- [10]** Perera G. Daniel, Universidad Tecnología de Tabasco, Manual de introducción al ultrasonido industrial. (2010).
- [11]** Ingeniero Ricardo Echavarría. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Defectología, Laboratorio de Ensayos no Destructivos. (2002).
- [12]** Eduardo Asta. Fundación latinoamericana de soldadura, Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico. (2006).
- [13]** G Díaz Vargas, Inspección y control de calidad en la aplicación de soldadura de elementos estructurales. (2009).

- [14]** Sáenz J. y Ramírez S. Diseño y Calificación de un WPS, PQR y WPQ de soldadura según norma API 1104 para la estación de recolección campo escuela colorado. (2010).
- [15].** GQM ingeniería S.A.S. Fichas de estudio por el ensayo no destructivo de Radiografía Industrial. (2014).
- [16]** G. Budinas y J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Ed 9. (2012)