

**CARACTERIZACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD DE FALTA DE FUSIÓN EN UNIONES
REALIZADAS POR PROCESOS DE SOLDADURA CON ELECTRODO REVESTIDO - SMAW, EN
TUBERIA DE ACERO AL CARBONO.**

DAVID ANTONIO ACOSTA CRUZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2016**

**CARACTERIZACIÓN DE LA DISCONTINUIDAD DE FALTA DE FUSIÓN EN UNIONES
REALIZADAS POR PROCESOS DE SOLDADURA CON ELECTRODO REVESTIDO - SMAW, EN
TUBERIA DE ACERO AL CARBONO.**

DAVID ANTONIO ACOSTA CRUZ

**Proyecto de trabajo Grado en la modalidad de problema ingenieril para optar al titulo
de Ingeniero Mecánico**

Director

ING. MECÁNICO ELVER CARVAJAL

Codirector

ING. MECÁNICO GILBERTO QUINTERO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2016**

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

PAR EVALUADOR N° 1

PAR EVALUADOR N° 2

DEDICATORIA

Como primera medida, deseo dedicarle este trabajo a DIOS, ha sido, es y será parte fundamental de mi vida y por supuesto, de la conformación de mi familia, de mis proyectos personales y laborales.

A mis padres, Alfonso Acosta Bejarano y María Aminta Cruz Páez, Gracias DIOS, porque tengo el orgullo de llamarlos padres, ellos son los pilares esenciales de mi formación académica y personal, ellos con su ejemplo y amor incondicional fortalecieron mi carácter, mi voluntad, mis valores y mis sentimientos, los mismos con los que he conformado una nueva familia.

A mi bella esposa, tú, Pao hermosa has sido siempre la fortaleza, aquella que puede más que el cansancio, para seguir el camino de la vida. Me has dado la maravillosa oportunidad de convertirme en padre, a mi futuro hijo, aún no se si es niño o niña, solo espero con ansias poder abrazarte, a la conformación de nuestra familia, por ustedes lucharé día a día por brindarles felicidad y bienestar.

A mis hermanos, quienes con regaños, abrazos, ejemplo y aliento me han animado en momentos difíciles y hemos conformado una gran familia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a DIOS, por haberme dado una familia tan maravillosa y las bendiciones que has puesto en mi camino.

A mi esposa, por todo el apoyo que recibí y el ejemplo de crecimiento que tú me has dado cada día. Agradezco el amor incondicional y la fe contundente que me has entregado durante los años que hemos estado juntos.

Agradezco toda la crianza que recibí de mis Padres, el apoyo incondicional, la fuerza que día a día ellos me han brindado. Espero estén tan orgullosos de mi como yo estoy de ellos, han sido un ejemplo de lucha y perseverancia. A mi padre que con sus palabras de aliento, siempre muy bien dirigidas y acertadas me han enseñado que ante la adversidad existe la perseverancia, que los obstáculos se vencen con conocimiento, por eso siempre hay que ir en busca de más. Mi madre, ella con su carisma y amor me ha enseñado el lado bueno y amable de la vida, de ayudar a quien lo necesita.

A mis familiares y amigos, ellos siempre tuvieron un momento y una palabra de apoyo con el que me brindaban serenidad para clarificar las cosas y emoción para acelerar las reacciones.

A mis tutores, los ingenieros Elver Carvajal y Gilberto Quintero, a quienes agradezco su guía y conocimiento, ellos encaminaron y dieron rumbo a este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	14
2	INTRODUCCIÓN.....	15
3	OBJETIVOS.....	17
3.1.	OBJETIVO GENERAL	17
3.1.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4	MARCO CONCEPTUAL.....	18
4.1.	PROCESO SMAW (SHIELDED METAL ARC WELDING)	18
4.2.	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	20
4.2.1.	Variables esenciales	21
4.2.1.1.	Proceso de soldar.....	22
4.2.1.2.	Diseño de junta	22
4.2.1.3.	Metal de aporte	22
4.2.1.4.	Metal base	22
4.2.1.5.	Precalentamiento o tratamiento térmico después de soldar.	22
4.2.1.6.	Respaldo.....	22
4.2.1.7.	Técnica de soldeo.	22
4.2.2.	Variables esenciales suplementarias.	23
4.2.2.1.	Posición de soldadura	23
4.2.2.2.	Proceso de soldeo.....	23
4.2.2.3.	Precalentamiento	23
4.2.3.	Variables no esenciales	23
4.2.3.1.	Limpieza	24
4.2.3.2.	Información adicional	24
4.2.4.	Variables que afectan la aparición de la discontinuidad de falta de fusión ..	24
4.2.4.1.	Técnica de soldeo	24
4.2.4.2.	Preparación inadecuada del material.....	25
4.2.4.3.	Diseño inadecuado de la junta	25
4.2.4.4.	Calor insuficiente	26
4.3.	DEFECTOLOGÍA	26
4.3.1.	Discontinuidad	27
4.3.1.1.	Indicación relevante	27
4.3.1.2.	Indicaciones no relevantes	27
4.3.1.3.	Indicaciones falsas	27
4.3.2.	Defecto.....	28
4.3.3.	Falta de fusión	28
4.3.3.1.	Falta de fusión en el bisel	28
4.3.3.2.	Falta de fusión en la raíz	29
4.3.3.3.	Falta de fusión entre pasadas.....	29
4.3.3.4.	Otras ubicaciones de la discontinuidad de falta de fusión	30

4.4.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	31
4.4.1.	Ultrasonido Phased Array (UTPA)	32
4.4.1.1.	Introducción al ultrasonido.....	32
4.4.1.2.	Ultrasonido industrial en la defectología (UT).....	33
4.4.1.3.	Barrido del ultrasonido phased array	35
4.4.2.	Tintas penetrantes (PT)	36
4.4.2.1.	Características físicas de los líquidos penetrantes	37
4.4.2.2.	Procedimiento	37
4.4.3.	Partículas magnéticas (MT).....	42
4.4.3.1.	Alcance.....	43
4.4.3.2.	Ventajas	43
4.4.3.3.	Limitaciones	43
4.4.3.4.	Procedimiento	44
4.4.4.	Radiografía industrial (RT).....	46
4.4.4.1.	Principios del ensayo	46
5	MARCO EXPERIMENTAL.....	49
5.1.	MATERIAL BASE	49
5.1.1.	DISEÑO DE JUNTA	50
5.1.2.	PROBETA	50
5.2.	MATERIAL DE APORTE	51
5.3.	DOCUMENTO WPS	52
5.3.1.	Encabezado del documento.....	53
5.3.2.	Diseño de la unión.....	54
5.3.3.	Posición, técnica y material base	54
5.3.4.	Electrodo y procedimiento.....	55
5.3.5.	Procedimiento de soldadura.....	56
5.4.	PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS INDUCIENDO LA DISCONTINUIDAD DE FALTA DE FUSIÓN.	56
5.4.1.	Técnica de soldeo.....	56
5.4.2.	Preparación inadecuada del material	57
5.4.3.	Diseño inadecuado de la junta.....	58
5.4.4.	Calor insuficiente	58
5.5.	PROCESO DE PREPARACIÓN Y SOLDADURA DE PROBETA	60
5.5.1.	Preparación de la probeta.....	60
5.5.2.	Proceso de soldadura.....	60
6	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y ANÁLISIS	62
6.1.	PROCEDIMIENTO ULTRASONIDO PHASE ARRAY (UTPA).....	62
6.1.1.1.	Pantalla	62
6.1.1.2.	Transductor.....	62
6.1.1.3.	Bloque calibrador.....	63
6.1.1.4.	Acoplante	63
6.1.1.5.	Elementos de limpieza	64

6.1.2.	PREPARACIÓN DEL EQUIPO	64
6.1.2.1.	Selección de vistas	64
6.1.2.2.	Selección del diseño de la junta	65
6.1.2.3.	Calibración	65
6.1.2.4.	Sensibilidad	66
6.1.2.5.	Escaneo de la probeta.	66
6.1.3.	RESULTADO DEL SCANNER	67
6.2.	ANÁLISIS ULTRASONIDO (UT PHASED ARRAY – UT PA)	67
6.2.1.	SCAN A.....	68
6.2.1.1.	Toma N°1	68
6.2.1.2.	Toma N°2	69
6.2.1.3.	Toma N°3	70
6.2.1.4.	Toma N°4	71
6.2.1.5.	Toma N°5	72
6.2.1.6.	Toma N°6	73
6.2.1.7.	Toma N°7	74
6.2.2.	SCAN D	75
6.2.2.1.	Toma N°1	75
6.2.2.2.	TOMA N°2	76
6.2.2.3.	TOMA N°3	77
6.2.2.4.	TOMA N° 4	77
6.2.2.5.	TOMA N° 5	78
6.2.2.6.	TOMA N°6	79
6.2.2.7.	TOMA N°7	79
6.2.3.	COMPARACIÓN SCAN A Y SCAN D	80
6.2.3.1.	TOMA 8	80
6.2.3.2.	TOMA 9	81
6.2.3.3.	TOMA 10	82
6.2.3.4.	TOMA 11	82
6.2.3.5.	TOMA 12	83
6.2.3.6.	TOMA 13	84
6.2.3.7.	TOMA 14	84
6.2.4.	SCAN C.....	85
6.2.4.1.	TOMA ÚNICA.....	85
6.3.	PROCEDIMIENTO TINTAS PENETRANTES (PT)	86
6.3.1.	Materiales utilizados	87
6.3.1.1.	Elementos de limpieza	87
6.3.1.2.	Tintas penetrantes	87
6.3.2.	Aplicar tintas penetrantes.....	88
6.3.2.1.	Limpieza superficial	88
6.3.2.2.	Aplicar penetrante	89
6.3.2.3.	Aplicar revelador.....	89

6.4.	ANALISIS TINTAS PENETRANTES (PT)	90
6.5.	PROCEDIMIENTO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT)	92
6.5.1.	Materiales y equipo	92
6.5.1.1.	Elementos de limpieza	92
6.5.1.2.	Yugo	92
6.5.1.3.	Partículas magnéticas secas.....	93
6.5.2.	Desmagnetización de la probeta	93
6.5.3.	Limpieza de la probeta.....	94
6.5.4.	Riego de las partículas sobre la probeta	94
6.5.5.	Magnetización de la probeta	94
6.5.5.1.	Selección de corriente	94
6.5.5.2.	Generación del campo magnético sobre la probeta	94
6.5.6.	Inspección visual	95
6.6.	ANALISIS PARTICULAS MAGNETICAS (MT)	96
6.7.	PROCEDIMIENTO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL (RT)	97
6.7.1.	Registro de imágenes.....	97
6.8.	ANALISIS RADIOGRAFÍA.....	98
7	ANÁLISIS.....	100
7.1.	DOCUMENTO WPS	100
7.2.	FALTA DE FUSIÓN	101
7.3.	PROCESO DE SOLDADURA.....	102
7.4.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	104
8	CONCLUSIONES.....	106
9	BIBLIOGRAFÍA.....	108

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1 Proceso SMAW	19
Figura 2 Proceso de fundido del metal de aporte	19
Figura 3 Convenciones del electrodo	20
Figura 4 Movimiento del electrodo	24
Figura 5 Junta a tope en V sencilla.....	25
Figura 6 Junta a tope en V diseñada	26
Figura 7 Discontinuidades en la pieza a lo largo de la vida útil	27
Figura 8 Falta de fusión en bisel.....	29
Figura 9 Falta de fusión en la raíz.....	29
Figura 10 Falta de fusión entre pasadas	30
Figura 11 Falta de fusión en juntas de esquina	30
Figura 12 Tipos de onda ultrasónica para sólidos.....	34
Figura 13 Onda longitudinal.....	34
Figura 14 Onda transversal	35
Figura 15 Transductor Phased array	35
Figura 16 Barrido de ultrasonido	36
Figura 17 Clasificación del examen con penetrantes. Tipo y método	38
Figura 18 Tintas penetrantes	38
Figura 19 Limpieza de superficie.....	39
Figura 20 Aplicación del líquido penetrante	39
Figura 21 Tiempo de penetración mínimos recomendados	40
Figura 22 Limpieza del exceso de líquido penetrante	40
Figura 23 Revelado.....	41
Figura 24 Inspección.....	41
Figura 25 Magnetización de la probeta	42
Figura 26 Campo magnético	43
Figura 27 Requerimientos del procedimiento del ensayo de partículas magnéticas.....	44
Figura 28 Inspección de la soldadura.....	46
Figura 29 Proceso radiográfico de pared sencilla	47
Figura 30 Inspección.....	48
Figura 31 Composición química del material base	49
Figura 32 Material base.....	50
Figura 33 Diseño de la junta.....	50
Figura 34 Probeta soldada	51
Figura 35 Documento WPS	53
Figura 36 Encabezado WPS	54
Figura 37 Información del diseño de la junta	54
Figura 38 Información de la técnica del proceso y material base	55
Figura 39 Información del electrodo.....	55

Figura 40 Información del procedimiento de soldadura	56
Figura 41 Técnica de soldeo	57
Figura 42 Velocidad de pases	57
Figura 43 Limpieza entre pases	57
Figura 44 Diseño de la junta	58
Figura 45 Amperajes recomendados del electrodo E6013	59
Figura 46 Amperajes recomendados del electrodo E7018	59
Figura 47 Amperajes indicados por el documento WPS	59
Figura 48 Equipo Olympus Omniscan	62
Figura 49 Transductor	63
Figura 50 Bloque calibrador	63
Figura 51 Vista de trabajo para el scan A	64
Figura 52 Vista de trabajo para el scan C	65
Figura 53 Selección junta en bisel sencillo a topa	65
Figura 54 Prueba de sensibilidad	66
Figura 55 Distancia entre el transductor y cordón de soldadura	66
Figura 56 Resultado de escáner	67
Figura 57 Toma 1 Scan A	68
Figura 58 Toma 1 scan A transversal	69
Figura 59 Toma 2 scan A	69
Figura 60 Toma 2 scan A Transversal	70
Figura 61 Toma 3 scan A	70
Figura 62 Toma 3 scan A transversal	71
Figura 63 Toma 4 scan A	71
Figura 64 Toma 4 scan A Transversal	72
Figura 65 Toma 5 scan A	72
Figura 66 Toma 5 scan A transversal	73
Figura 67 Toma 6 scan A	73
Figura 68 Toma 6 scan A Transversal	74
Figura 69 Toma 7 scan A	74
Figura 70 Toma 7 scan A transversal	75
Figura 71 Toma 1 scan D	76
Figura 72 Toma 2 scan D	76
Figura 73 Toma 3 scan D	77
Figura 74 Toma 4 scan D	78
Figura 75 Toma 5 scan D	78
Figura 76 Toma 6 scan D	79
Figura 77 Toma 7 scan D	80
Figura 78 Toma 8 scan A-D	81
Figura 79 Toma 9 scan A-D	81
Figura 80 Toma 10 scan A-D	82
Figura 81 Toma 11 scan A-D	83

Figura 82 Toma 12 scan A-D.....	83
Figura 83 Toma 13 scan A-D.....	84
Figura 84 Toma 14 scan A-D.....	85
Figura 85 Scan C toma única	86
Figura 86 Scan C ampliada	86
Figura 87 Clasificación del examen con penetrantes. Tipo y método	87
Figura 88 Tintas penetrantes	88
Figura 89 Limpieza de probeta.....	88
Figura 90 Tiempos de penetración para penetrantes y revelador	89
Figura 91 Exceso de tinta en un procedimiento	89
Figura 92 Discontinuidades de falta de fusión.....	90
Figura 93 Discontinuidad revelada 1.....	91
Figura 94 Discontinuidad revelada 2.....	91
Figura 95 Yugo.....	93
Figura 96 Soplador de polvo de partículas magnéticas	93
Figura 97 Partículas magnéticas.....	94
Figura 98 Movimiento del yugo	95
Figura 99 Ángulos entre el campo magnético y cordón	95
Figura 100 Discontinuidad de falta de fusión	96
Figura 101 Inspección partículas magnéticas	96
Figura 102 Inspección ampliada.....	97
Figura 103 Radiografía de falta de fusión	98
Figura 104 Inspección radiografía	99
Figura 105 Casos de falta de fusión	101

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Datos material base.....	49
Tabla 2 Datos de probeta.....	51
Tabla 3 Especificación AWS para material de aporte	51
Tabla 4 Selección del electrodo	52
Tabla 5 Dimensión del electrodo	52
Tabla 6 Análisis de ensayos.....	104

1 RESUMEN

Este trabajo propone caracterizar la discontinuidad de falta de fusión en uniones realizadas por proceso de soldadura con electrodo revestido SMAW (shielded metal arc welding), en tubería de acero al carbón. La caracterización consiste en determinar la morfología de la discontinuidad, conocer el tamaño, figura y características visuales para que identifiquen de manera fácil y acertada la discontinuidad en cualquier tubería soldada de acero al carbón o cualquiera otra soldadura por proceso SMAW. Como primera medida, se fabricó una probeta en acero al carbón a la cual y de manera controlada, se le indujo durante el proceso de soldadura la aparición de la discontinuidad de falta de fusión, tal y como lo describía el documento WPS. Esta probeta se inspeccionó y se encontró que, efectivamente la discontinuidad aparecía en los cordones de soldadura. La caracterización se realiza a través de ensayos no destructivos tales como tintas penetrantes, partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido (Phase array), se determinó además que ensayo no destructivo cumple un mejor desempeño en la identificación de la discontinuidad de falta de fusión. Para realizar la caracterización, se cuenta con el apoyo y soporte técnico de la compañía de soldadura en Colombia **SOLDADURAS WEST ARCO**. Allí se llevaron a cabo los ensayos no destructivos además de la realización de los cordones de soldadura de la probeta; el proceso de soldadura fue realizado por un soldador calificado de la compañía, quien indujo de manera controlada la discontinuidad de falta de fusión en los cordones de soldadura, para finalmente caracterizarla a través de los ensayos no destructivos.

La caracterización de la discontinuidad se realizó contando siempre con la supervisión profesional y técnica de **SOLDADURAS WEST ARCO**.

2 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector metalmecánico que comprende las industrias petroleras, construcción, alimentos, automotriz, metalúrgicos, entre otros, han venido incrementando la utilización de los procesos de soldadura por electrodo revestido – SMAW, debido a ésta situación, la ingeniería debe hacer énfasis en atender y respaldar este proceso de soldadura en particular.

Para atender esta situación, se planteó el objetivo de investigar la discontinuidad de falta de fusión, discontinuidad que aparece en los procesos de soldadura por electrodo revestido SMAW y caracterizarla; de esta manera se establece una fundamentación, se crea un soporte técnico e ingenieril a la industria, mejorando los procesos futuros de soldadura e incrementando la calidad de las uniones soldadas, y de esta manera se genera un desarrollo apropiado a la industria.

La discontinuidad de falta de fusión es una de las más comunes que se presentan cuando se realiza un proceso de soldadura SMAW [1] y debido a la basta implementación de la tubería de acero al carbono en la industria colombiana, se seleccionó dicha discontinuidad y tubería como caso de estudio en este proyecto. La falta de fusión es la deficiencia de unión entre el metal base y el depositado; ésta se produce cuando existe un arco demasiado largo entre la pieza y el electrodo; también puede producirse al soldar con un amperaje bajo, una velocidad alta del soldador en el proceso, un mal diseño de la junta así como una inadecuada preparación del material base son causales de producir falta de fusión en las piezas soldadas. Es importante resaltar que la discontinuidad de falta de fusión genera una condición de peligro al desempeño de la función para la cual fue diseñada la pieza.

Existen diferentes herramientas y metodologías, para caracterizar las discontinuidades en la soldadura; uno de estos métodos son los **Ensayos No Destructivos (END)**, éstos ensayos detectan las discontinuidades en la unión soldada, sin tener que destruir o dejar inutilizable el material que se está analizando [2]. Además, a través de los END se reducen los costos de inspección y control de calidad de las piezas. De esta forma se ha decidido realizar la caracterización de la discontinuidad de falta de fusión con los ensayos no destructivos de ultrasonido (phase array), tintas penetrantes, radiografía industrial y partículas magnéticas, inspeccionando la raíz, la estructura interna y la superficie de la soldadura, la inspección de la raíz del cordón de soldadura se realizó con el ensayo de radiografía industrial, sin embargo el ensayo es altamente peligroso para la salud debido a la radiación, por tal motivo, se contó con el soporte técnico y elementos de estudio la empresa **GQM INGENIERÍA SAS**.

El ensayo no destructivo más influyente fue ultrasonido, por sus características de revelar discontinuidades internas en los materiales, sin embargo la inspección superficial no ha sido satisfactoria, y otros ensayos como tintas penetrantes o partículas magnéticas generan una mejor inspección.

Cabe resaltar que siempre se contó con el acompañamiento técnico de west arco, tanto para la fabricación de las probetas como para la realización de los ensayos y el análisis de resultados de los mismos. En consecuencia se generó un documento con bases técnicas fuertes que proyecta una guía de mejora para los procedimientos de soldadura con electrodo revestido SMAW.

3 OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la morfología de la discontinuidad de falta de fusión en uniones de tubería de acero al carbón realizados por procesos SMAW, mediante ensayos no destructivos especificados.

3.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la hoja de Proceso de las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS), para la generación de la discontinuidad de falta de fusión.
- Elaborar las probetas (Tubo circular al carbono) controlando las variables que producen la discontinuidad falta de fusión mediante un soldador calificado.
- Inspeccionar las discontinuidades de las uniones soldadas, mediante los ensayos no destructivos.
- Determinar la influencia de las variables del proceso sobre la discontinuidad de falta de fusión.
- Identificar el ensayo apropiado que mejor revela la discontinuidad de falta de fusión.

4 MARCO CONCEPTUAL

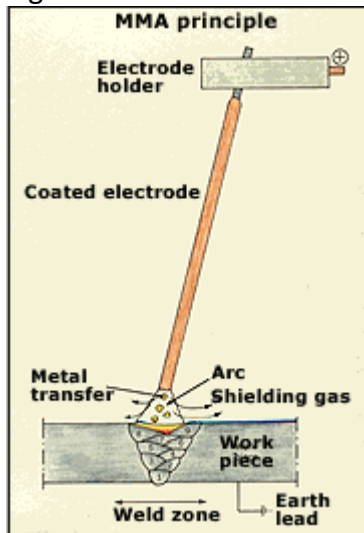
La industria colombiana en los últimos años ha tenido un auge y crecimiento acelerado. Los sectores como la construcción, por ende, la maquinaria pesada, la industria metálica y el sector transporte, cada vez más se consolidan en el mercado generando progreso económico para el país, pese a que Colombia es uno de los menores consumidores de acero en Latinoamérica, sí tiene la tasa de crecimiento más grande, pues en el periodo 1998-2008 el consumo de acero se incrementó en un 86.2%, manteniendo el consumo durante los últimos años,[20] y es que, la construcción a partir del acero, permite disminuir los tiempos en el cronograma, flexibilidad en la estructura, uniformidad de los materiales, mejor control de calidad y prefabricación en talleres con eficientes resultados[21]. De manera tal que, la ingeniería, y en especial la ingeniería mecánica debe prepararse y disponer de toda la capacidad para continuar con el desarrollo de estas economías.

En este orden de ideas, la soldadura, y el proceso SMAW específicamente como principal proceso de unión en estructuras metálicas, generó la idea del caso de estudio de éste proyecto. Cuando se realiza el proceso de soldadura SMAW, surgen discontinuidades, y una de las más comunes es la falta de fusión, de allí que se realice la caracterización de esta discontinuidad en el desarrollo del proyecto. Una de las mejores herramientas para efectuar la caracterización es la realización de ensayos no destructivos, porque a través de estos ensayos se pueden conocer y evaluar las condiciones y el estado de los materiales sin afectar las propiedades mecánicas ni la funcionabilidad de los materiales que se examinan.

4.1. PROCESO SMAW (SHIELDED METAL ARC WELDING)

También conocido como manual metal arc (MMA), el proceso SMAW, se define como el proceso de unión de dos metales mediante una fusión localizada, producida por un arco eléctrico entre el electrodo y el metal base. El proceso tiene inicio en el momento en que el electrodo toca el metal base, generando un corto circuito, y creando una corriente eléctrica entre ellos, justo después se aparta el electrodo del metal base creando un arco eléctrico; la temperatura del paso de la corriente hace que el electrodo se funda con el metal base. El proceso basa su funcionalidad en la protección; ésta se obtiene cuando el recubrimiento que tiene el electrodo se descompone durante la generación del arco eléctrico.

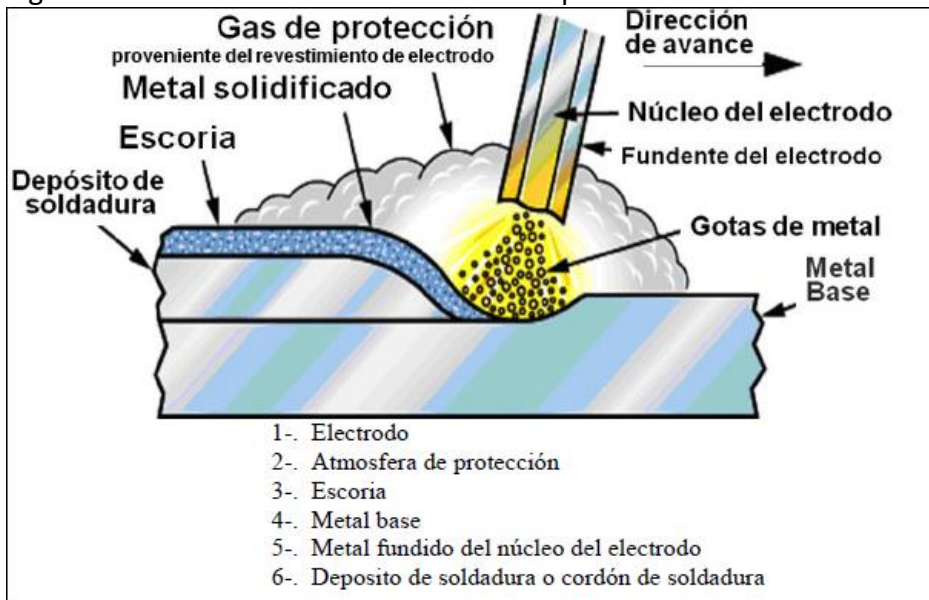
Figura 1 Proceso SMAW



Fuente: Manual de Soldadura west arco Colombia[3].

La descomposición del recubrimiento sólido del electrodo crea una barrera en forma de gas, el cual genera la protección del cordón de soldadura, mientras que el material de aporte es decir el alma del electrodo se funde y cae a manera de gotas en el material base.

Figura 2 Proceso de fundido del metal de aporte



Fuente: Soldadura al arco eléctrico SMAW. Facultad de ingeniería. Universidad Rafael Landívar. Guatemala[4].

- ELECTRODO

Contiene tanto el material de aporte llamado alma como el recubrimiento en forma de polvo aglomerado adherido al alma que funciona como protección de la soldadura. A continuación se presenta la tabla de convenciones según la AWS.

Figura 3 Convenciones del electrodo

E X X X X		
ELECTRODO		
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN MILES DE PSI		
POSICIONES DE SOLDEO		
1: PLANA, HORIZONTAL, VERTICAL, SOBRECABEZA		
2: PLANA Y HORIZONTAL		
4: PLANA, HORIZONTAL, VERTICAL DESCENDENTE		
TIPO DE REVESTIMIENTO CORRIENTE Y POLARIDAD		
DIGITO	TIPO DE REVESTIMIENTO	CORRIENTE - POLARIDAD
0	CELULOSA CON SODIO	CD (+)
1	CELULOSA CON POTASIO	CA o CD (+ o -)
2	RUTILO CON SODIO	CA o CD (-)
3	RUTILO CON POTASIO	CA o CD (-)
4	RUTILO CON POLVO DE HIERRO	CA o CD (+ o -)
5	DE BAJO HIDRÓGENO CON SODIO	CD (+)
6	DE BAJO HIDRÓGENO CON POTASIO	CA o CD (+)
7	HIERRO EN POLVO Y ÓXIDOS DE HIERRO	CA o CD (+ o -)
8	BAJO HIDRÓGENO CON POLVO DE HIERRO	CA o CD (+)

Fuente: Catálogo de productos Lincoln electric. Venezuela. [5]

Los electrodos seleccionados para el estudio de la discontinuidad de falta de fusión han sido E6013 y E7018 de la compañía west arco. Son electrodos muy comunes y utilizados en la industria, muy comerciales y recomendados para soldar todo tipo de acero al carbón.

A continuación se presentan las características técnicas del electrodo según su compañía de fabricación.

4.2. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Para poder realizar un procedimiento soldadura correcto, se deben seguir unos códigos y normas que rigen las buenas prácticas de la soldadura.

- API (Americian Petroleum Institute)
- AWS (American Welding Society)
- ASME (American Society of Mechanicals Engineers).

Estos códigos y normas establecen guías o requisitos que se deben cumplir. Señalando las variables críticas, las más importantes a tener en cuenta.

Variables eléctricas: Corriente y tensión del arco eléctrico. Se considera que una modificación del 10% o 7% en la tensión, representa un cambio esencial en el proceso de soldadura. [6]

Materiales de aporte: Los cambios en los materiales generan efecto en la potencia del arco eléctrico, si existe un cambio importante en el metal de aporte, este afectará la tensión y corriente del proceso, involucrando el diámetro del electrodo utilizado y el tipo de fundente que se está implementando en el proceso, convirtiéndose en una variable crítica cuando no se selecciona bien el electrodo, sobredimensionándolo o sub dimensionándolo [7].

Dimensiones y geometría de la junta: esta variable influye altamente debido a que el flujo de calor y la distribución del mismo dependen de la cantidad de material que se está soldando. Un material delgado transfiere el calor de una manera más rápida que un material grueso. Se debe diseñar bien la junta, teniendo presente el ángulo de Bisel, el tamaño de la Cara de la raíz, la abertura de Raíz y el grado de inclinación entre placas. [7]
La calificación del procedimiento tiene en cuenta aspectos como el diseño de la junta, el material base, la posición de soldeo y material de aporte; también reúne aspectos como proceso de soldadura y sus parámetros tales como: precalentamiento, temperatura entre pases y tratamiento poscalentamiento. La calificación del personal califica tanto al soldador, como al apuntador.

Un WPS es un documento preparado y calificado por un departamento técnico, para dar instrucciones al personal que realiza e inspecciona las soldaduras, establece y parametriza las variables que intervienen en el proceso de soldadura, generando así una guía para controlarlas y lograr un cordón de soldadura deseado. [8].

El documento WPS tiene dos clases de variables:

4.2.1. Variables esenciales

Las variables esenciales de un procedimiento de soldadura son aquellas en las que un cambio con respecto a lo descrito específicamente en el código afecta las propiedades mecánicas de la soldadura obtenida y por lo tanto requiere recalificación[8].

4.2.1.1. Proceso de soldar

Éste trabajo se realizó mediante el proceso SMAW, sin embargo, existen otros procesos de soldadura tales como GMAW (soldadura de arco eléctrico con gas), GTAW (soldadura de arco de tungsteno y gas), SAW (soldadura de arco sumergido) entre otras.

4.2.1.2. Diseño de junta

Aquí tiene lugar el diseño del tipo de unión, geometría de la ranura, alto, ancho y ángulo de raíz, espesor de tubería, así como adición de un respaldo entre otros. Para la realización de la probeta tubular soldada de este proyecto, se utilizó una unión a tope, ranura en V simple, apertura y altura de raíz 1/8", ángulo a 60° para tubería de 18.26 mm y cinco pases de soldadura.

4.2.1.3. Metal de aporte

Es necesario seleccionar el material con el que se solda, para la realización de éste trabajo se seleccionaron los electrodos E6013 y E7018 para proceso SMAW.

4.2.1.4. Metal base

Indica la especificación del material a soldar, composición química, resistencia mecánica, entre otros; la ejecución del proceso de soldadura de este trabajo se realizó sobre un tubo de acero estructural ASTM A36.

4.2.1.5. Precalentamiento o tratamiento térmico después de soldar.

Si se requiere que la pieza cumpla con alguna característica mecánica, entonces se debe especificar el rango de temperatura o clase de tratamiento. Para efectos del presente trabajo, esta consideración no aplica.

4.2.1.6. Respaldo

Eliminación de respaldo en la soldadura si es requerido. Se considera una unión soldada doblemente como soldadura con respaldo. En este orden de ideas, la adición de una soldadura debe ser registrada; sin embargo no se tuvo en cuenta para la probeta de este proyecto.

4.2.1.7. Técnica de soldeo.

La habilidad del soldador influye de manera directa en la unión soldada, el perfecto manejo de las técnicas de soldeo como oscilante, circular y semicircular, entre otras, es

fundamental a la hora de conseguir una correcta soldadura. Se ha considerado la técnica de oscilación para la realización del cordón de soldadura de la probeta para este proyecto.

4.2.2. Variables esenciales suplementarias.

Las variables esenciales suplementarias de un proceso de soldadura son las que al cambiarse afectan las propiedades de tenacidad de los materiales a bajas temperaturas; éstas deben tenerse en cuenta cuando alguna sección del código o de la especificación exija prueba de impacto de los materiales[8].

4.2.2.1. Posición de soldadura

Se especifica la posición con la cual el soldador realiza el cordón de soldadura, las posiciones son 1G, 2G, 5G y 6G para soldadura en tubería según ASME sección IX. La soldadura de la probeta para realización de este trabajo, se hizo en la posición 5G, que describe al eje del tubo de forma horizontal y con la ranura a soldar de forma vertical. La soldadura se hace sin que se gire el tubo.

4.2.2.2. Proceso de soldeo

Se denomina variable no esencial cuando directamente y en el momento de realizar el proceso de soldeo, se presenta un cambio de proceso; entonces debe ser registrado.

4.2.2.3. Precalentamiento

Cuando la unión soldada debe cumplir con una característica de resistencia mecánica o tenacidad, se aplica un precalentamiento en la zona afectada por el calor para disminuir la velocidad de enfriamiento de la pieza; en el caso de la probeta utilizada para la realización de éste proyecto no aplica dicho precalentamiento.

4.2.3. Variables no esenciales

Las variables no esenciales de un proceso de soldadura son las que al cambiarse no ocasionan efectos apreciables en las soldaduras. Es un cambio en una condición de soldadura que no afecta las propiedades mecánicas de la pieza soldada. Éstas variables tienen que ser incluidas en todo WPS y se deben registrar. Las variables no esenciales se pueden cambiar, revisando el WPS, sin necesidad de recalificar el procedimiento de soldadura[8].

4.2.3.1. Limpieza

La limpieza prepara las caras y el ángulo de la junta, el método depende de la especificación del procedimiento, puede haber limpieza desde la utilización de grata y paño, hasta limpieza por maquinado, vapor, inmersión entre otras, éstos métodos dependen del metal base y de la aplicación.

4.2.3.2. Información adicional

Información adicional que se considere necesaria para obtener las soldaduras deseadas. El WPS debe definir las diferentes variables con los valores precisos o los rangos aceptables para ser utilizados al hacer las soldaduras. El WPS se identifica por un número el cual es referenciado en la soldadura de producción[8].

4.2.4. Variables que afectan la aparición de la discontinuidad de falta de fusión

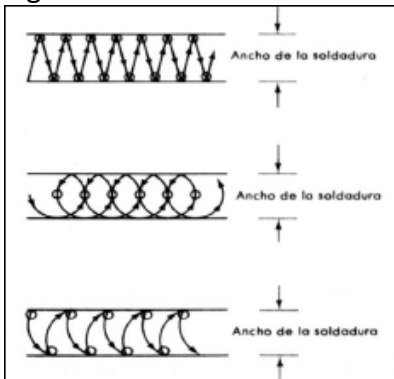
La falta de fusión se da cuando entre el metal de aporte y el metal base, o entre metales de aporte no se funden completamente las caras adyacentes, existen variables que generan esta discontinuidad :

4.2.4.1. Técnica de soldeo

Durante la realización del proceso de soldadura, el movimiento del electrodo puede ser en zigzag, circular y semicircular, todos de carácter oscilatorio; no existe un patrón que sea el mejor para todos los trabajos de soldadura, se ajusta a la técnica del soldador[9].

Se puede decir que el ángulo entre el electrodo y la pieza de trabajo debe ser tal que se aproveche la fuerza del arco para penetrar en el metal y obligarlo a que regrese al cráter de la soldadura; este ángulo oscila entre los 70° y 75°.[9]

Figura 4 Movimiento del electrodo



Fuente: Soldadura por arco eléctrico SMAW. Ing. Antonio Fabio O. M. 2010[9]

La habilidad del soldador es fundamental para generar un óptimo cordón de soldadura y como el propósito era generar una discontinuidad en la soldadura, se utilizaron dos técnicas durante la realización del proceso SMAW en la probeta.

4.2.4.2. Preparación inadecuada del material

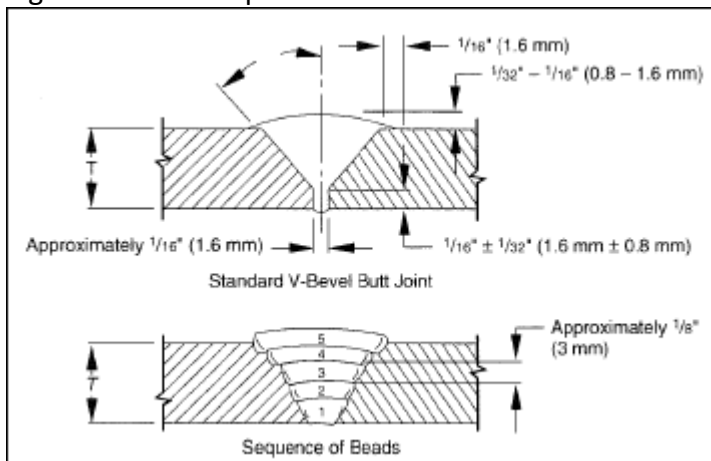
Preparar el metal base para que sea soldado es fundamental para obtener una correcta unión soldada; se debe tener en cuenta detalles como limpieza, alineación y un buen proceso de punteo; es importante resaltar la limpieza en la probeta, debido a que no solo la falta de limpieza genera la discontinuidad de falta de fusión sino que además genera otras discontinuidades y la calidad de la soldadura disminuye.

Para la realización de este trabajo, se evitó realizar una correcta limpieza entre pasadas y al iniciar la soldadura en la raíz, induciendo de esta forma la aparición de la discontinuidad de falta de fusión.

4.2.4.3. Diseño inadecuado de la junta

La especificación de la junta debe incluir un boceto de la junta que muestre el ángulo del bisel, tamaño de la cara de la raíz y de la apertura de la raíz o el espacio entre los miembros a tope[10].

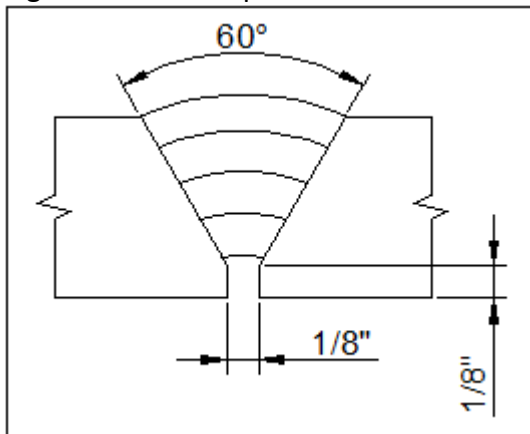
Figura 5 Junta a tope en V sencilla



Fuente: Norma API 1104

Para efectos de estudio de éste proyecto, se realizó la siguiente junta.

Figura 6 Junta a tope en V diseñada



Fuente: Autor

El diseño de la junta, de acuerdo al material y selección del electrodo ocasiona la generación de falta de fusión.[9]

4.2.4.4. Calor insuficiente

El calor de entrada durante el proceso es generalmente de gran importancia cuando se sueldan aceros tratados térmicamente, aleaciones ferrosas y no ferrosas sensibles al agrietamiento. Siempre que el calor de entrada pueda influir en las propiedades finales de la junta soldada, los detalles de su control siempre deben estar incluidos en el WPS[8].

El calor de la soldadura depende entre otras cosas, de la polaridad del electrodo según el fabricante, del arco eléctrico generado y del amperaje con el que el proceso de soldadura es realizado. Aunque la probeta que se trabajó en este proyecto no tiene requerimientos térmicos, ni antes ni después del proceso de soldadura, si tenemos como prioridad la aparición de la discontinuidad de falta de fusión, se ha realizado el proceso de soldadura para el estudio de este proyecto, con los valores mínimos de amperaje recomendados por el fabricante de los electrodos.

4.3. DEFECTOLOGÍA

El estudio de las discontinuidades y/o defectos que existen en una pieza metálica es la principal causa por la que los ensayos no destructivos tengan la importancia que tienen actualmente. Es fundamental conocer las piezas metálicas tanto en su superficie como en su interior, de esta manera la fabricación de la pieza como el mantenimiento de la misma, se realizan de una manera más confiable, y durante la vida útil de la pieza puede surgir

alguna discontinuidad, precisando que se identifique, más aún cuando ésta pueda generar fallas en el servicio de la pieza.

Figura 7 Discontinuidades en la pieza a lo largo de la vida útil

Tipos de discontinuidades					
Inherentes		De proceso			De servicio
Lingote	Fundición	Primarios		Secundarios	Tensiones Fatiga Corrosión
		Forjados	Laminados	Maquinado Amolado Tratamientos térmicos Soldadura	
Inclusiones metálicas Inclusiones gaseosas (Porosidad, sopladuras) Contracciones Segregaciones	no Solapado en frío Salpicaduras Desgarro en caliente Segregaciones Rechupes Porosidad inclusiones	Plegues Laminaciones Estallido fisuras	Cordones Laminaciones Costuras	Desgarramientos Fisuras	Fisuras

Fuente: ING. Ricardo Echeverría. DEFECTOLOGÍA [11]

Nuestra fuente de investigación se encuentra ubicada en el tipo de discontinuidades de proceso secundario, cuando a través del proceso SMAW, realizamos la soldadura.

4.3.1. Discontinuidad

Es toda indicación de falta de continuidad encontrada en la piezas, éstas pueden ser de varios tipos.

4.3.1.1. Indicación relevante

Son aquellas indicaciones provenientes de fallas suficientemente serias como para afectar la aptitud para el servicio de la pieza[12].

4.3.1.2. Indicaciones no relevantes

Son aquellas indicaciones que provienen de discontinuidades que no afectarían la aptitud para el servicio de la pieza. Estas indicaciones pueden ser la misma geometría de la pieza como por ejemplo chaveteros, orificios, tratamientos térmicos localizados, en ultrasonido transformaciones de onda debido a la geometría, etc. (indicaciones espurias), o pequeñas fallas como por ejemplo poros, fisuras y otras que presenten peligro para el buen funcionamiento de la pieza y su aptitud para el servicio[12].

4.3.1.3. Indicaciones falsas

Son aquellas indicaciones causadas por interferencias eléctricas y electrónicas, superficies muy rugosas etc [12].

4.3.2. Defecto

La discontinuidad, al ser identificada y evaluada bajo una serie de criterios y especificaciones, se llega a la conclusión de que no es aceptable, entonces será un defecto en la pieza. De lo contrario será una simple discontinuidad, es decir: cualquier defecto es una discontinuidad pero no toda discontinuidad es un defecto[12].

4.3.3. Falta de fusión

Las discontinuidades también pueden clasificarse como superficiales e internas. Una de las características fundamentales de la discontinuidad de falta de fusión es que puede aparecer tanto en la superficie como en el interior de la junta soldada.

La falta de fusión es una discontinuidad de la soldadura en la cual la fusión no ocurre entre el metal de la soldadura o las caras de la fusión o los cordones adyacentes; también ocurre cuando la fusión es menor a la especificada para una soldadura en particular[12].

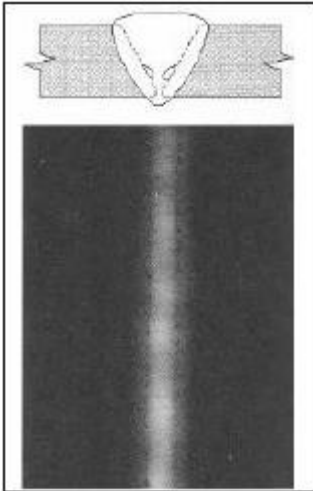
La falta de fusión se representa gráficamente como una discontinuidad filosa y alargada, generalmente es producida por mala técnica en la aplicación de la soldadura, preparación inadecuada del material base o mal diseño de la junta. Dentro de las deficiencias que causan la falta de fusión, se destacan el insuficiente aporte de calor a la soldadura, falta de acceso a todas las superficies de fusión o ambas. [7]

La discontinuidad de falta de fusión interna en una junta soldada a tope en V puede estar localizada de la siguiente manera:

4.3.3.1. Falta de fusión en el bisel

Se posa sobre la superficie inclinada del bisel, se ve como una línea oscura a los costados del centro de la soldadura y es difícil de detectar.

Figura 8 Falta de fusión en bisel

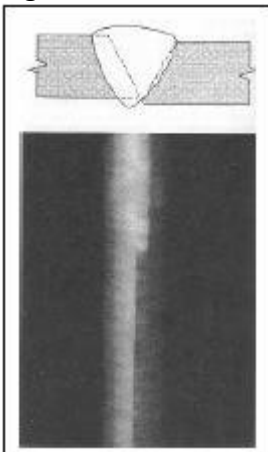


Fuente: ING. Ricardo Echeverría. DEFECTOLOGÍA [11]

4.3.3.2. Falta de fusión en la raíz

Se produce cuando falta abertura en la raíz y la temperatura no es lo bastante elevada, por una incorrecta alineación de los elementos a soldar, por fallas en la preparación, por diferencias de espesor o diámetro o por deficiente penetración del soldador al realizar la primera pasada. Radiográficamente se ve como una línea oscura y fina o intermitente con los bordes bien definidos. [8]

Figura 9 Falta de fusión en la raíz



Fuente: ING. Ricardo Echeverría. DEFECTOLOGÍA [11]

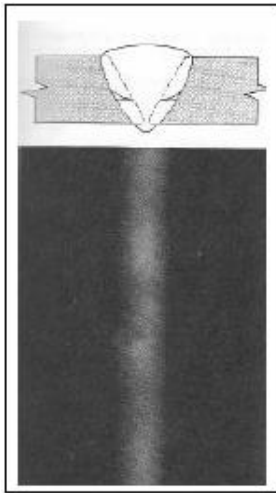
4.3.3.3. Falta de fusión entre pasadas

Se produce en las interfaces de la soldadura, donde las capas adyacentes del metal, o el metal base y el metal de soldadura no se fusionan apropiadamente. Esto ocurre

principalmente por una capa muy fina de óxido que se forma en las superficies. Por lo general, esta capa de óxido se debe a una falta de calentamiento del metal base o al depósito previo del metal de soldadura en volumen suficientemente alto que impide que cualquier capa de óxido, escoria, impureza, etc. migre a la superficie.

Otras causas pueden ser la falta de corriente suficiente o la mala ubicación del arco eléctrico dentro de los biselos, el cual, al producirse más sobre un lado, deja al otro sin fundir. Radiográficamente se observa una franja negra con densidad en disminución desde el borde hacia el centro. El lateral es recto [11].

Figura 10 Falta de fusión entre pasadas

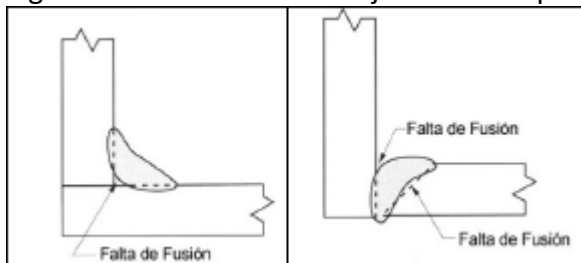


Fuente: ING. Ricardo Echeverría. DEFECTOLOGÍA [11]

4.3.3.4. Otras ubicaciones de la discontinuidad de falta de fusión

En otros tipos de juntas como lo es el caso de juntas en esquina, también es posible encontrar la discontinuidad de falta fusión.

Figura 11 Falta de fusión en juntas de esquina



Fuente: Proyecto de grado escuela politécnica nacional. Ecuador [13]

4.4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

El propósito de los ensayos es descubrir discontinuidades internas y superficiales en materiales, soldaduras o piezas de fabricación, sin modificar sus propiedades físicas, químicas o mecánicas, es decir, que la aptitud de la pieza o del material para la cual se desempeña no se altere.

Existen algunas normas y códigos para la realización de los END. De esta manera los resultados tienen un punto de comparación de acuerdo con patrones de calibración y lograr que su resultado sea verídico; algunas de estas normas o códigos de fabricación son redactadas por ASME, ASTM, AWS Y API, entre otras.

Así mismo, el personal que atiende la realización de los procedimientos de los ensayos no destructivos deben ser inspectores calificados como nivel I, II, y III por la ASNT (american society for nondestructive testing) según los requisitos de la práctica recomendada SNT-TC1A, CP-189.

El entrenamiento es el programa debidamente estructurado para proporcionar los conocimientos teóricos y desarrollar las habilidades prácticas del individuo, a fin de que realice una actividad definida de inspección. En este punto se establece de forma clara y breve el programa de entrenamiento para cada técnica y nivel. [14]

La calificación es la demostración por medio de exámenes debidamente preparados, de que un individuo posee los conocimientos teóricos y las habilidades necesarias para desarrollar correctamente una inspección no destructiva; aplicar correctamente los criterios de aceptación y en su caso elaborar un reporte de inspección y/o la interpretación de los criterios de aceptación establecidos por un documento escrito, que puede ser un código, una norma o una especificación, es deber del personal correctamente calificado. [15]

Una especificación en soldadura, es una descripción detallada de las diferentes partes de un todo, la exposición o la numeración de sus características particulares tales como tamaño requerido, calidad, desempeño esperado, definiciones y términos, obligaciones de las partes etc, hacen parte de la especificación. Un ejemplo son las especificaciones AWS A5.1 a la A5.31 para materiales de aporte de soldadura [15].

Código es un conjunto de leyes nacionales, locales, de un grupo de industrias, etc. Arreglados sistemáticamente para la facilidad de uso y referencia rápida. Ejemplo ASME sección VIII Div 1, API 1104 Y AWS D1.1 [15].

Estándar es un documento establecido para ser usado como una regla o base de comparación al medir o juzgar la capacidad, cantidad, contenido, extensión, valor relativo,

calidad etc. Un ejemplo son los estándares ASTM para varios materiales y productos como el ASTM A-36 para aceros estructurales soldables [15].

Guía es como su nombre lo indica, un documento que suministra lineamientos y guías de diversa clase. Un ejemplo es el documento AWS B1.11 – Guía para inspección visual de soldaduras [15].

En el desarrollo del presente proyecto, el personal técnico de la compañía **west arco Colombia** ha sido de fundamental ayuda, pues a través de ellos y de sus instalaciones se pudieron realizar los siguientes ensayos no destructivos para caracterizar morfológicamente la discontinuidad de falta de fusión en una soldadura realizada por proceso SMAW en una tubería de acero al carbono.

- Ultrasonido phased array – UT PA
- Tintas penetrantes – PT
- Partículas magnéticas – MT
- Radiografía industrial: se realizó con la ayuda de la empresa GQM INGENIERIA SAS

4.4.1. Ultrasonido Phased Array (UTPA)

El principio fundamental se basa en la técnica del ensayo no destructivo de ultrasonido convencional; sin embargo difiere fundamentalmente en el barrido que se le hace a la pieza a través del instrumento y la recopilación de los datos.

4.4.1.1. Introducción al ultrasonido

Los ultrasonidos son ondas acústicas cuya frecuencia está por encima del espectro audible del oído humano (aproximadamente 20kHz). Su propagación provoca en sólidos, líquidos y gases distintos fenómenos que han dado lugar a múltiples aplicaciones en diversas disciplinas científicas entre las que se destacan aplicaciones médicas (equipos de terapia ultrasónica, en sistemas Doppler para la medición del flujo sanguíneo y estructuras en movimiento, sistemas ecográficos nebulizadores para asmáticos, cirugía, odontología, biología, en comunicaciones entre otras. [16]

También se utilizan en aplicaciones industriales como en procesos de limpieza y depuración (limpiadores ultrasónicos, sistemas de soldadura para plásticos, medidores de nivel y de flujo, procesos de colada y solidificación, mecanizados, ensayos y medidas de laboratorio, etc. [16]

Además es de recalcar que su uso tiene cabida en aplicaciones relacionadas con el control de calidad de materiales estructurales:

- Detección de heterogeneidades (defectología)
- Determinación de sus propiedades (caracterización de materiales)
- Medida de espesor (metrología).

4.4.1.2. Ultrasonido industrial en la defectología (UT)

El ultrasonido industrial es un ensayo no destructivo el cual se basa en la impedancia acústica de los materiales, la que se manifiesta como el producto entre la velocidad máxima de propagación del sonido y la densidad del material [16].

Ventajas del método

- Muy buena sensibilidad de detección de discontinuidades internas.
- Puede inspeccionar piezas geoméricamente amorfas, pues en ocasiones solo es necesaria una cara de la pieza para realizar el ensayo.
- El equipo es portátil y facilita la realización del ensayo en campo.
- Tiene la posibilidad de inspeccionar volumétricamente el material, así como grandes espesores, en algunos casos hasta de un metro para materiales metálicos.
- Los resultados de la inspección son inmediatos.
- Es posible utilizar el equipo de ultrasonido tanto para la detección de discontinuidades como para medir espesores.

Desventajas

- Se pueden presentar limitaciones debido a la naturaleza de la pieza, tipo de estructura interna a inspeccionar, así como en algunos casos, la geometría de la pieza puede ser un obstáculo que impide la realización del ensayo.
- Es necesario un inspector altamente calificado para realizar los ensayos.
- La interpretación acertada de los resultados, requiere que el personal que realiza la inspección deba tener una muy buena experiencia y un alto entrenamiento.

Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o un cerámico piezoeléctrico dentro del palpador, este elemento llamado transductor tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser excitado eléctricamente, y por efecto piezoeléctrico, el transductor vibra a altas frecuencias (lo que genera las ondas ultrasónicas), estas vibraciones son transmitidas al material que se desea inspeccionar [16].

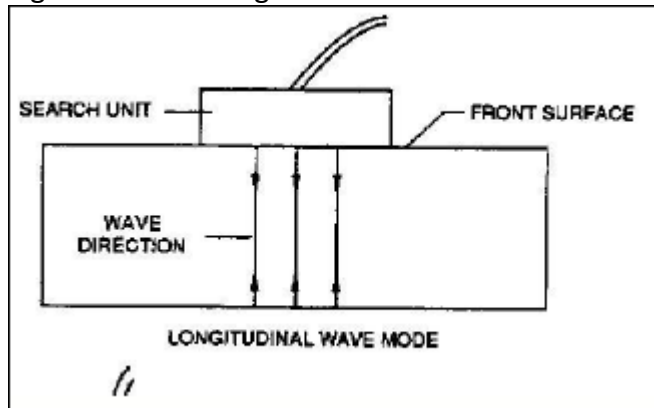
Figura 12 Tipos de onda ultrasónica para sólidos

TIPOS DE ONDA EN SÓLIDOS	VIBRACIONES DE PARTÍCULAS
Longitudinal	Paralelamente a la dirección de las ondas
Transversal	Perpendicular a la dirección de las ondas
Superficie - Rayleigh	Orbita elíptica - Modo simétrico
Onda plana - Lamb	Componente perpendicular a la superficie (onda extensional)
Onda plana - Love	Paralelamente a la cara plana. Perpendicular a la dirección de las ondas
Ondas perforadoras de Rayleigh Sezawa	Onda guiada a lo largo de la intercara Modo antisimétrico

Fuente: Autor

La 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 sólidos, líquidos y gases [17].

Figura 13 Onda longitudinal

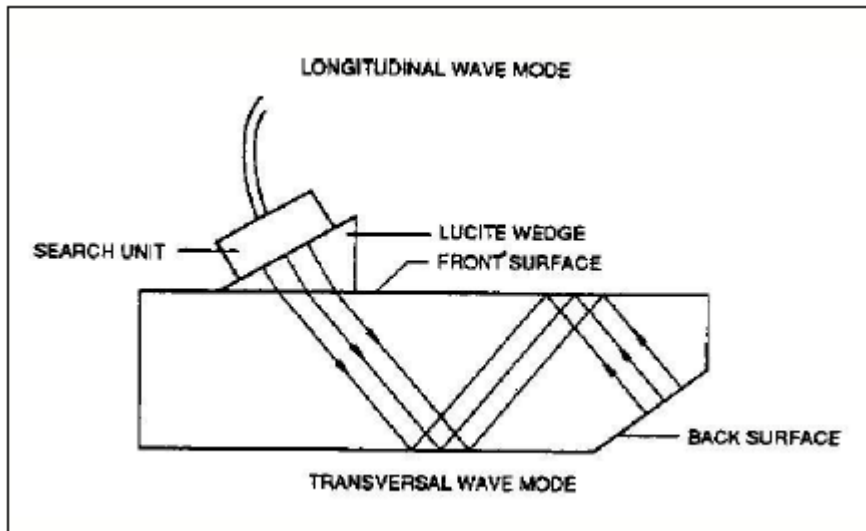


Fuente: Manual de soldadura west arco-primera edición 2012[3]

En la onda transversal las partículas vibran perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La velocidad de propagación de las ondas transversales es aproximadamente la mitad de las ondas longitudinales, y solo se transmiten en sólidos.

El haz ultrasónico, y con la ayuda de zapatas angulares, puede inspeccionar el material internamente. La onda transversal de un ultrasonido convencional, se realiza con un solo ángulo para el haz y varía dependiendo del tipo de cabezal.

Figura 14 Onda transversal



Fuente: Manual de soldadura west arco-primera edición 2012[3]

4.4.1.3. Barrido del ultrasonido phased array

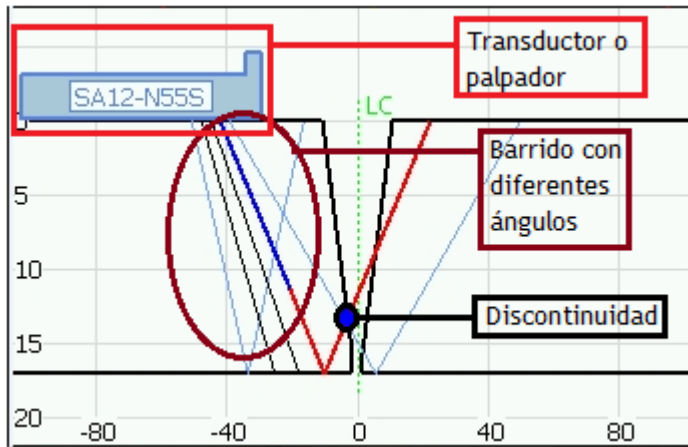
El barrido de una inspección phased array, se realiza con un cabezal que suministra haz ultrasónico a varios ángulos.

Figura 15 Transductor Phased array



Fuente: autor

Figura 16 Barrido de ultrasonido



Fuente: autor

El barrido en forma de abanico proporciona una mejor inspección sectorial, con más probabilidades de ubicar la discontinuidad si existe. Una de las grandes ventajas del ultrasonido phased array es que proporciona tamaño, ubicación y forma geométrica de la discontinuidad.

4.4.2. Tintas penetrantes (PT)

La inspección por líquidos penetrantes es un método específico para la detección de discontinuidades que se encuentran abiertas a la superficie en materiales no porosos [18].

Los líquidos penetrantes pueden ser utilizados efectivamente en el examen de materiales metálicos no porosos, ferrosos, no ferrosos y de materiales no metálicos como en cerámicas vitrificadas o completamente densificadas, ciertos plásticos no porosos y vidrio [18].

Una de las discontinuidades que pueden ser encontradas a través de este ensayo es la falta de fusión, porque la falta de fusión también puede presentarse en la superficie de la junta soldada.

El ensayo se realiza en una superficie limpia, sin impurezas ni escoria producida por la soldadura, lo constituyen 3 fluidos principales que pueden estar en distintas presentaciones:

- Limpiador
- Penetrante
- Revelador

Se resalta que el ensayo, como es de inspección visible, sólo se utiliza hacia discontinuidades abiertas a la superficie; éstas serán inspeccionadas por un inspector calificado.

4.4.2.1. Características físicas de los líquidos penetrantes

En general el principio de la técnica por líquidos penetrantes se basa en la capilaridad, mas no en la gravedad. La fuerza intermolecular de cohesión del penetrante es menor que la adhesión de éste y el material [18].

- Tensión superficial: Es la forma de cohesión de las moléculas de la superficie que se resiste a que ésta sea rota.
- Capilaridad: Capacidad de un líquido que depende de la cohesión y de la tensión superficial para subir o bajar por un conducto estrecho.
- Cohesión: Capacidad de generar fuerza intermolecular de atracción entre partículas adyacentes de un mismo cuerpo.
- Adhesión: Interacción de las superficies de distintos cuerpos.
- Mojabilidad o poder de humectación: Propiedad de un líquido de expandirse adhiriéndose a la superficie de un sólido.
- Viscosidad: Es la resistencia de un fluido a fluir. El penetrante debe poseer suficiente fluidez para internarse en las discontinuidades y rapidez para salir de ellos cuando sea requerido.
- Volatilidad: Propiedad físico-química de los líquidos de pasar al estado gaseoso fácilmente.

4.4.2.2. Procedimiento

En principio el líquido penetrante es aplicado en la superficie de prueba a inspeccionar; éste penetra en las discontinuidades, luego el exceso de penetrante es eliminado. La superficie es secada y el revelador es aplicado. El revelador funciona como absorbente del penetrante que ha quedado atrapado en las discontinuidades y como superficie de contraste. El tinte en el penetrante puede ser visible o fluorescente (visible bajo el uso de la luz negra) [18].

Figura 17 Clasificación del examen con penetrantes. Tipo y método

Tipo I	
Fluorescente	
Método A	Lavable con agua (ASTM E-1200)
" B	Postemulsificable lipofílico (ASTM E-1208)
" C	Removible con solvente (ASTM E-1219)
" D	Postemulsificable hidrofílico (ASTM E-1210)
TIPO II	
Coloreados	
Método A	Lavables con agua (ASTM E-1418)
" C	Removibles con solvente (ASTM E-1220)

Fuente: NORMA ASTM E165-94[18]

El ensayo de líquidos penetrantes realizado para este proyecto fue de tipo coloreado, tipo II, método A removible con agua.

Figura 18 Tintas penetrantes



Fuente: autor

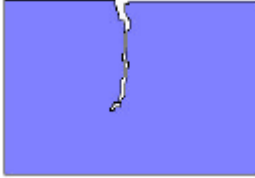
- Preparación de la superficie [18].

En general, los resultados pueden ser obtenidos para una superficie realizada por proceso de soldadura, rolado, fundido o de forjado. Antes de la inspección por tintas penetrantes, la superficie a ser inspeccionada y todas las áreas adyacentes aproximada de 1" deben estar secas y libres de cualquier material que afecte la inspección.

Pueden ser usados agentes típicos de limpieza como detergentes, solventes orgánicos, soluciones decapantes y removedores de pintura. Los solventes usados como limpiadores

deben incluir requerimientos de T-625. El método de limpieza es una parte importante en el proceso de inspección.

Figura 19 Limpieza de superficie



Fuente: Líquidos penetrantes Ing. Ricardo Echavarría [28].

- Secado después de la inspección [18].

Después de la limpieza, el secado de las superficies a inspeccionar deber ser realizado por evaporación normal o por aire caliente. Un mínimo de tiempo debe ser establecido para asegurar que la solución limpiadora se ha evaporado antes de la aplicación del penetrante.

- Aplicación del penetrante

El penetrante puede ser aplicado por cualquier medio aplicable, por ejemplo: inmersión, brocha o aspersión. Si el penetrante es aplicado por aspersión con aire comprimido, el uso de filtros es obligatorio para evitar contaminación con agua o grasa.

Figura 20 Aplicación del líquido penetrante



Fuente: Líquidos penetrantes Ing. Ricardo Echavarría [28]

- Remoción del exceso de penetrante

Después del tiempo de penetración debe ser removido el exceso de penetrante, tomando en cuenta no remover penetrante de las discontinuidades.

Figura 21 Tiempo de penetración mínimos recomendados

TABLE T-672 MINIMUM DWELL TIMES			
Material	Form	Type of Discontinuity	Dwell Times [Note (1)] (minutes)
			Penetrant
Aluminum, magnesium, steel, brass and bronze, titanium and high-temperature alloys	Castings and welds	Cold shuts, porosity, lack of fusion, cracks (all forms)	5
	Wrought materials — extrusions, forgings, plate	Laps, cracks	10
Carbide-tipped tools	Brazed or welded	Lack of fusion, porosity, cracks	5
Plastic	All forms	Cracks	5
Glass	All forms	Cracks	5
Ceramic	All forms	Cracks	5

Fuente: Norma ASTM E165-94[18]

Figura 22 Limpieza del exceso de líquido penetrante



Fuente: Líquidos penetrantes Ing. Ricardo Echavarría [28]

- Penetrantes removibles con solvente[18]

El exceso de penetrante removible con solvente debe ser removido por absorción con un trapo o papel absorbente, repitiendo la operación hasta que la mayoría de los residuos finales sean removidos con un trapo ligeramente humedecido con solvente. Para minimizar la remoción del penetrante en las discontinuidades debe tenerse cuidado de no usar removedor en exceso. El uso del removedor sobre la pieza de manera directa es prohibido.

- Penetrantes visibles [18]

Con penetrantes visibles, el revelador forma una capa razonablemente uniforme y blanca. Las discontinuidades en la superficie son indicadas por el sangrado del penetrante, el cual normalmente es de un rojo intenso sobre el fondo blanco del revelador. Una coloración ligeramente rosa de las indicaciones puede indicar un limpiado en exceso. Una limpieza inadecuada puede dejar un fondo grueso de capa reveladora o penetrante que hace difícil la interpretación, una adecuada iluminación es requerida para dar sensibilidad durante la inspección y evaluación de las indicaciones.

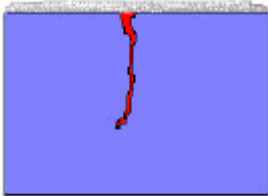
- Secado después de la remoción del penetrante[18]

Para removibles con solvente, las superficies pueden ser secadas por evaporación normal, con un trapo seco o aire forzado.

- Revelado[18]

El revelador debe ser aplicado tan pronto como sea posible. Una aplicación insuficiente del revelador puede no hacer visible las discontinuidades, inversamente una aplicación excesiva del revelador puede enmascarar las discontinuidades.

Figura 23 Revelado



Fuente: Líquidos penetrantes Ing. Ricardo Echavarría [28]

Con penetrantes visibles solo debe ser usado el revelador húmedo. Con penetrantes fluorescentes puede ser usado el revelador húmedo o seco.

- Revelador húmedo

Antes de la aplicación del revelador húmedo, tipo suspensión a la superficie de prueba, el revelador debe ser fuertemente agitado para asegurar la adecuada dispersión de las partículas suspendidas.

Figura 24 Inspección



Fuente: autor

- interpretación

El tamaño verdadero y tipo de discontinuidad son difíciles de evaluar si el penetrante se expande excesivamente en el revelador. La inspección depende principalmente de la destreza del inspector, su experiencia para diferenciar las falsas discontinuidades que se presentan a raíz de la geometría de la pieza o de una aspersión errónea del revelador o del líquido penetrante.

4.4.3. Partículas magnéticas (MT)

El método de inspección por partículas magnéticas se utiliza para detectar defectos y discontinuidades en la superficie y sub-superficie de materiales ferromagnéticos. La sensibilidad es mayor en la superficie de la discontinuidad y disminuye aumentando la profundidad de las discontinuidades [14].

El ensayo consiste básicamente en magnetizar la pieza a inspeccionar, rociando antes partículas magnéticas (polvo fino de limaduras de hierro) para evaluar las indicaciones producidas por la agrupación de las partículas en ciertos puntos.

Para la magnetización se pueden utilizar un banco estacionario, un yugo electromagnético, electrodos o un equipo portátil de bobina flexible entre otros. Se utilizan los diferentes tipos de corrientes, alterna o directa.

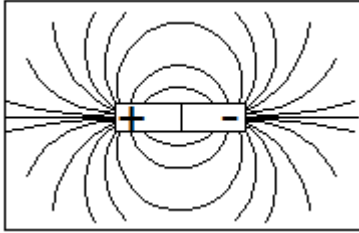
Figura 25 Magnetización de la probeta



Fuente: autor

El campo magnético generado hace que las partículas se acomoden para pasar de un polo a otro dentro del campo magnético, resaltando las discontinuidades.

Figura 26 Campo magnético



Fuente: Autor

4.4.3.1. Alcance

El material a inspeccionar debe ser ferromagnético, es utilizado para inspeccionar soldaduras, forjas y fundiciones, detecta discontinuidades a la superficie y cercanas a la superficie de no más de 3 mm de profundidad. Los equipos de inspección pueden ser portátiles y el resultado es instantáneo; además no genera un alto peligro para el inspector [16].

4.4.3.2. Ventajas

Las piezas complejas pueden ser inspeccionadas efectivamente en gran número; las grietas muy finas y pequeñas son detectadas con facilidad. Discontinuidades ligeramente internas pueden ser también detectadas por el ensayo. El costo de la inspección es considerablemente bajo; además no se requiere que el personal sea altamente calificado para ejecutar la inspección.

4.4.3.3. Limitaciones

Únicamente aplicable en materiales ferromagnéticos. Las corrientes que se manejan en ocasiones pueden ser altas cuando se inspeccionan piezas grandes y las partes magnetizadas requieren desmagnetización dependiendo del uso.

Las discontinuidades que requieran penetración pueden no ser detectados, así mismo las discontinuidades que se encuentren paralelas al campo magnético pueden no ser detectadas. Cuando existen altas corrientes las piezas pueden presentar quemaduras, también se corre el riesgo que se presenten falsas indicaciones.

Las grietas anchas y con poca profundidad son difíciles de encontrar y, dependiendo de la geometría de la pieza, en ocasiones las discontinuidades cercanas a la superficie son también difíciles de visualizar.

4.4.3.4. Procedimiento

Para el desarrollo del ensayo de partículas magnéticas se ha seleccionado la técnica del yugo con partículas secas, debido a su facilidad de realización y adaptación a la probeta.

Figura 27 Requerimientos del procedimiento del ensayo de partículas magnéticas

TABLE T-721
REQUIREMENTS OF A MAGNETIC PARTICLE EXAMINATION PROCEDURE

Requirement	Essential Variable	Nonessential Variable
Magnetizing technique	X	...
Magnetizing current type or amperage outside range specified by this Article or as previously qualified	X	...
Surface preparation	X	...
Magnetic particles (fluorescent/visible, color, particle size, wet/dry)	X	...
Method of particle application	X	...
Method of excess particle removal	X	...
Minimum light intensity	X	...
Existing coatings, greater than the thickness demonstrated	X	...
Nonmagnetic surface contrast enhancement, when utilized	X	...
Performance demonstration, when required	X	...
Examination part surface temperature outside of the temperature range recommended by the manufacturer of the particles or as previously qualified	X	...
Shape or size of the examination object	...	X
Equipment of the same type	...	X
Temperature (within those specified by manufacturer or as previously qualified)	...	X
Demagnetizing technique	...	X
Post-examination cleaning technique	...	X
Personnel qualification requirements	...	X

Fuente: Norma ASME sección V artículo 7 [14]

- Preparación de la superficie

Des-magnetización: El material a inspeccionar se desmagnetiza y de esta manera se garantiza que debido a condiciones de trabajo anteriores se haya generado un campo magnético residual que pueda interferir, en el proceso del ensayo. [14]

Limpieza de la superficie: Todas las superficies a inspeccionar deben estar limpias y secas. La expresión “limpia” quiere decir que la superficie se encuentre libre de aceite, grasa, suciedad, arena, óxido, cascarilla suelta u otro material extraño, el cual pueda interferir con el ensayo. [14]

Revestimientos: El ensayo de partículas magnéticas no es realizado con recubrimientos existentes que podrían impedir la detección de discontinuidades superficiales en el material ferro magnético. A demás no se realizará en las siguientes condiciones:

Que tales recubrimientos normalmente incluyen pintura o cromo de la placa mayor que 0,003 pulgadas (0,08 mm) de espesor y recubrimientos ferro magnéticos tal como níquel electro chapado sea mayor de 0,001 pulgadas (0,03 mm) de espesor. Si los recubrimientos son superiores a estos límites durante el examen, se debe demostrar que

el mínimo de discontinuidades rechazables se pueden detectar a través del espesor máximo del recubrimiento aplicado. [14]

- Tipo de magnetización

Magnetización Indirecta: Utiliza bobinas preformadas, cables encauchetados, yugos y accesorios de flujo de campo o un conductor central para producir un campo magnético de adecuada fuerza y dirección para magnetizar la pieza bajo prueba. (Campo magnético Longitudinal) [14]

- Tipo de corriente

Corriente Alterna: La corriente de magnetización de corriente alterna se aplica para ser utilizado sólo para la detección de defectos abiertos a la superficie. [14]

Corriente Directa: Aumenta la posibilidad de visualizar las discontinuidades abiertas a la superficie.

Corriente alterna rectificada de onda completa: corriente con la mayor penetración, debe ser utilizado para la inspección de defectos por debajo de la superficie y aplicado con partículas magnéticas húmedas. [14]

Corriente alterna rectificada de media onda: tiene ventajas para el método con partículas secas debido a que crea un campo electromagnético unidireccional pulsante que aumenta la movilidad de las partículas. [14]

- Aplicación de partículas secas

Cuando se aplica el medio de ensayo de partículas secas, no se debe magnetizar el material a inspeccionar antes de la aplicación de las partículas magnéticas secas. [14]

Las Partículas secas se aplicarán con sopladores de polvo o agitadores con aire comprimido de tal manera que el revestimiento causado por la aplicación de dichas partículas sea uniforme, cubriendo la mayor parte de del área cuando se instalen en la superficie del material a inspeccionar. [14]

El tiempo suficiente para la formación del campo magnético y la identificación de las indicaciones será instantáneo. [14]

- Magnetización de la pieza

Se procede a ubicar el yugo en posición; levemente se realizan movimientos en semicírculos con el yugo; cada movimiento se realiza en dirección contraria al anterior movimiento; esto con el ánimo de expandir el ángulo de dirección de las partículas secas y promover una mayor sensibilidad en la inspección. [14]

- Inspección

Se procede a inspeccionar las discontinuidades que aparecen en el cordón de soldadura

Figura 28 Inspección de la soldadura



Fuente: autor

- Desmagnetización

Se requiere de la desmagnetización debido a que puede interferir con otros procesos como maquinado y pulido e interferir en equipos electrónicos o la realización de un nuevo cordón de soldadura.

4.4.4. Radiografía industrial (RT)

La radiografía industrial es un ensayo no destructivo volumétrico. A través de este ensayo se obtiene información sobre la macro estructura interna del material examinado. Una de las principales ventajas es la detección de discontinuidades internas, con el registro de la información, se determina la forma y el tamaño del defecto o discontinuidad con un alto grado de detección de discontinuidades.

Las desventajas de la prueba radican en la limitada inspección al material de prueba, con equipos sumamente costosos y personal altamente entrenado y calificado, además con una eficiente protección radiológica. La salud humana puede verse comprometida si no se realiza el ensayo con un alto nivel de eficiencia en la protección durante el ensayo.

4.4.4.1. Principios del ensayo

La radiografía basa su funcionamiento en la proyección de los rayos x y rayos gamma hacia la pieza de inspección con un respaldo en la parte posterior de la pieza de placas radiográficas.

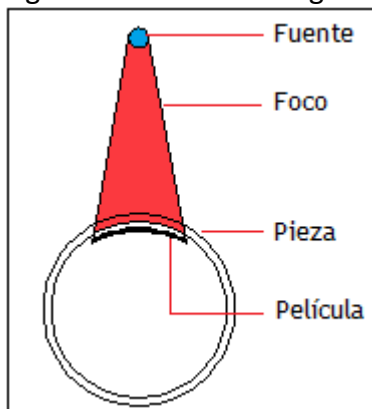
Los rayos x son generados por la desaceleración producida en el frenado de electrones que chocan contra un blanco, de tal forma que se produce la emisión de radiación. Los rayos gamma se producen por la excitación de átomos que se encuentran en equilibrio, este exceso de energía se manifiesta como radiación y regresa de nuevo a su estado estable.

La placa radiográfica no es más que la imagen fotográfica de la proyección de los rayos sobre la pieza; la diferencia de espesor genera una sombra sobre la película proyectada.

- Materiales y equipos
 - a) Caja de control
 - b) Contenedor
 - c) Manguera
 - d) Fuente de rayos
 - e) Película

El foco de los rayos es ubicado sobre la pieza a inspeccionar de tal forma que cubije el área deseada; la película se fija en la cara posterior de la pared que se quiere inspeccionar.

Figura 29 Proceso radiográfico de pared sencilla



Fuente: Autor

El proceso de inspección de la placa se realiza a partir del registro de la sombra radiográfica proyectada sobre la película.

Figura 30 Inspección



Fuente: Material de estudio de GQM Ingeniería sas

La distinción de los colores revela la discontinuidad, apreciable en el centro, la discontinuidad se ubica en la raíz, de forma alargada y angosta. Es importante aclarar que la experiencia del técnico durante el ensayo proyecta una buena imagen o por el contrario distorsiona la imagen.

5 MARCO EXPERIMENTAL

La caracterización de la discontinuidad de falta de fusión en este proyecto, basó su análisis en la probeta a la que le fue inducida la discontinuidad nombrada durante el proceso de soldadura SMAW. Soldaduras West Arco S.A.S. fue pieza fundamental para la correcta realización de la probeta pues personal capacitado y certificado de esta empresa realizó el proceso de soldadura basado en la hoja de proceso WPS.

5.1. MATERIAL BASE

Uno de los aceros más comunes en la industria colombiana es el acero A36, según el estándar ASTM se considera como un acero al carbón como lo señala la figura 31 y fue seleccionado para analizar la morfología de la discontinuidad de falta de fusión.

Figura 31 Composición química del material base

COMPOSICIÓN QUÍMICA						
Calidad	Norma	C	Mn	Si	P	S
Comercial	ASTM A 1011 SAE 1006	0.08 max	0.45 max		0.030 max	0.035 max
	ASTM A 1011 SAE 1008	0.10 max	0.50 max		0.030 max	0.035 max
Estructural	ASTMA 36	0.26 max	0.80 - 1.20	0.40 max	0.040 max	0.050 max

Fuente: Tabla de propiedades acero ASTM A36 ACESCO.

La probeta que se utilizó en el desarrollo de este proyecto tuvo las siguientes características:

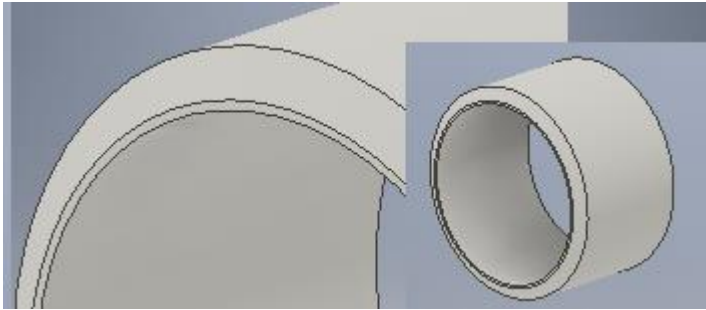
Tabla 1 Datos material base

MATERIAL BASE			
Diámetro exterior	Espesor	Acero	Longitud
Ø [in]	Ø [in]	ASTM	[in]
10	0.718	A 36	6

Fuente: Autor

Se mecanizaron dos piezas del material base con el diseño de la junta así como lo señala la figura 32.

Figura 32 Material base

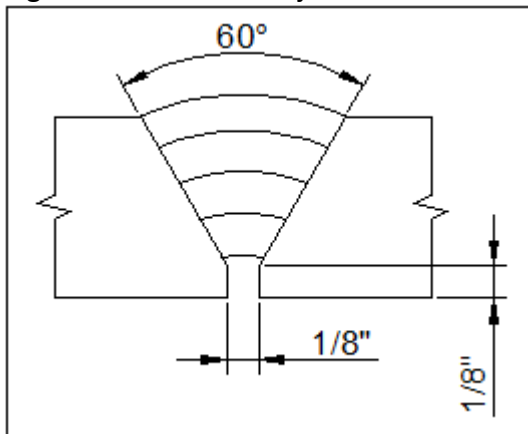


Fuente: Autor

5.1.1. DISEÑO DE JUNTA

El diseño de la junta se basó en la norma API 1104. Esta norma estandariza el uso de las cotas como se señala en la figura 33.

Figura 33 Diseño de la junta



Fuente: Autor

5.1.2. PROBETA

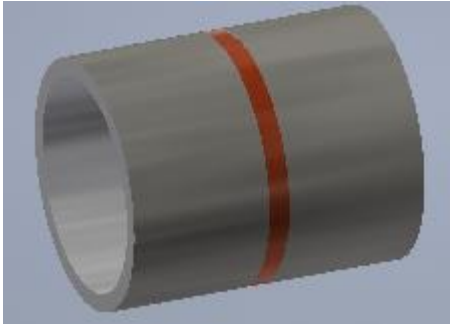
La probeta se realizó con 5 cordones de soldadura, uniendo de forma permanente las dos piezas del material base conformando la probeta utilizada para la caracterización de la discontinuidad de falta de fusión, la tabla 2 señala los datos de la probeta y la figura 34 ilustra la probeta terminada.

Tabla 2 Datos de probeta

PROBETA			
Diámetro exterior	Espesor	Acero	Longitud
Ø [in]	Ø [in]	ASTM	[in]
10	0.718	A 36	12

Fuente: autor

Figura 34 Probeta soldada



Fuente: Autor

5.2. MATERIAL DE APORTE

Debido a que el material base fue un acero ASTM A36, acero al carbono y de acuerdo al catálogo de soldadura de west arco, los materiales de aporte fueron los electrodos E6013 y E7018. De esta manera se cumplió con la especificación AWS A.5.1 que establece el material de aporte para acero al carbón como se ilustra en la tabla 3.

Tabla 3 Especificación AWS para material de aporte

AWS ³	
A3.0	<i>Welding, Terms and Definitions</i>
A5.1	<i>Covered Carbon Steel Arc Welding Electrodes</i>
A5.2	<i>Iron and Steel Oxyfuel Gas Welding Rods</i>
A5.5	<i>Low Alloy Steel Covered Arc Welding Electrodes</i>
A5.17	<i>Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding</i>
A5.18	<i>Carbon Steel Filler Metals for Gas Shielded Arc Welding</i>
A5.20	<i>Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding</i>
A5.28	<i>Low Alloy Steel Filler Metals for Gas Shielded Arc Welding</i>
A5.29	<i>Low Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding</i>

Fuente: NORMA API 1104

Los electrodos E6013 Y E7018 además de cumplir con la especificación AWS A.5.1 también superan el valor mínimo del límite de fluencia y la resistencia a la tracción del material base, así queda ilustrado en la tabla 5.

Tabla 4 Selección del electrodo

Material/ Electrodo	Observaciones	Límite de fluencia [ksi]	de Resistencia a la tracción [ksi]
ASTM A36	Acero al carbón	36 min	58 - 80
E6013	Especificación AWS A.5.1.	48 - 65	60 - 74
E7018	Especificación AWS A.5.1.	62 - 72	72 - 84

Fuente: autor

Por último, la dimensión del electrodo en ambos casos fue de 3.2x350mm(1/8") como se describe en la tabla 5.

Tabla 5 Dimensión del electrodo

MATERIAL DE APORTE			
Electrodo	Espesor [mm]	Espesor [in]	Long. [mm]
E6013	3,2	1/8	350
E7018	3,2	1/8	350

Fuente: Autor

5.3. DOCUMENTO WPS

Es la especificación del proceso de soldadura, (WPS por sus siglas en inglés, Welding Procedures Specifications). Allí se establecen las variables del proceso de soldadura tales como material base, material aporte, proceso, junta, posición, entre otras. Este documento preparado y calificado es la guía de instrucciones que se debe llevar durante todo el proceso de soldadura. El documento queda representado en la figura 35.

Figura 35 Documento WPS

WPS		Especificaciones del Proceso de Soldadura						
Nombre de la Empresa:	USTA	Identificación No:	0-0001					
Proceso de Soldadura:	SMAW	Revisado por:	Ing. Gilberto Quintero					
TIPO DE PROCESO:	MANUAL	FECHA:	septiembre de 2013					
Soldador:	Jhon	Autorizado por:	Ing. Gilberto Quintero					
DISEÑO DE UNIÓN		Geometría de Junta						
Estandar según:	API 1104							
Tipo de Unión:	A Tope							
Tipo de ranura:	Ranura en V (Simple)							
Alto de Raíz:	1/8"							
Abertura de Raíz:	1/8"							
Ángulo de Ranura:	60°							
Espeor de Tubería:	18,26 mm	Material de Soporte: NO						
Soporte:	NO	Método:						
Limpiar en la Raíz:	SI	POSICIÓN						
Ranura:	5G	Filete:	----					
Placa:	----	Tubería:	SI					
TÉCNICA		Aportación:	Circular (95%), zigzag (5%) (Pase					
		Corriente:	Múltiple) DC (DCEP)					
METALES BASE		Limpieza entre Pases:	Deficiente					
		Método de Limpieza:	Grata mecánica					
		PRECALENTAMIENTO						
Grupo:	I	Tª de Prealentamiento:						
Especificación del Acero:	ASTMA36	No aplica						
Espeor de Tubería:	18,26 mm	Tª de Interpase:						
Diámetro (Tubería):	250 mm	No aplica						
		POST-CALENTAMIENTO						
		Temperatura:						
		No Aplica						
		Tiempo:						
		No Aplica						
METAL DE APORTE		PROTECCIÓN						
Especificación AWS:	A 5.1	Fuente:	Revestimiento					
Calificación AWS:	E 6011 y E 7018	Gas:	No Aplica					
Marca:	West Arco	Velocidad de Flujo:	No Aplica					
Diámetro Electrodo:	1/8" (3,2 mm)	Tamaño de Boquilla:	No Aplica					
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA								
Pase	Proceso	Progresión	Metales de Aporte Corriente				Velocidad de Avance (mm/min)	Detalles y Secuencia De la junta
			Clase	Diámetro (in)	Tipo y Ampere	Volaje (V)		
1	SMAW	Ascenden.	E 6013	1/8	DCEP 80	17	80	
2	SMAW	Descenden.	E 6013	1/8	DCEP 80	18	85	
3	SMAW	Ascenden.	E 7018	1/8	DCEP 95	18	95	
4	SMAW	Descenden.	E 7018	1/8	DCEP 100	19	105	
5	SMAW	Ascenden.	E 7018	1/8	DCEP 110	19	110	
ELABORADO POR: David Antonio Acosta Cruz								

Fuente: autor

El documento WPS fue la guía sobre la cual el soldador calificado soldó la probeta, tomó los siguientes datos como referencia.

5.3.1. Encabezado del documento

Se enmarcó la información inicial como: el nombre de la empresa, consecutivo del documento, proceso de soldadura y tipo de proceso que se realizó, nombre del soldador y del ingeniero que realizó la probeta y quien autorizó. Como información relevante, se describió el proceso de soldadura SMAW, que es el proceso de base de estudio del documento, figura 36.

Figura 36 Encabezado WPS

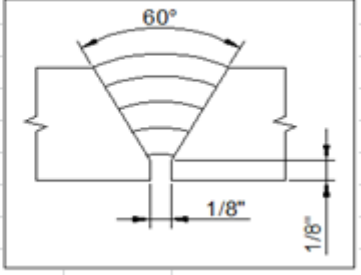
 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
WPS	Especificaciones del Proceso de Soldadura.		
Nombre de la Empresa:	<u>USTA</u>	Identificación No:	<u>0-0001</u>
Proceso de Soldadura:	<u>SMAW</u>	Revisado por:	<u>Ing. Gilberto Quintero</u>
TIPO DE PROCESO:	<u>MANUAL</u>	FECHA:	<u>septiembre de 2013</u>
Soldador:	<u>Jhon</u>	Autorizado por:	<u>Ing. Gilberto Quintero</u>
DISEÑO DE UNIÓN		<u>Geometría de Junta</u>	

Fuente: Autor

5.3.2. Diseño de la unión.

Aquí se enmarcaron los detalles de la unión soldada, haciendo referencia al estándar API 1104, estándar al que estuvo sujeto la junta para su diseño de unión tubular. Fue señalado el tipo de unión, tipo y ángulo de ranura, ancho de raíz, alto de raíz, espesor de tubería. De igual forma se dibujó un esquema de la junta con detalles acotados. Los valores de la dimensión de la junta fueron creados para infundir la discontinuidad de falta de fusión en la probeta, figura 37.

Figura 37 Información del diseño de la junta

DISEÑO DE UNIÓN		<u>Geometría de Junta</u>
Estandar según:	<u>API 1104</u>	
Tipo de Unión:	<u>A Tope</u>	
Tipo de ranura:	<u>Ranura en V (Simple)</u>	
Alto de Raíz:	<u>1/8"</u>	
Abertura de Raíz:	<u>1/8"</u>	
Ángulo de Ranura:	<u>60°</u>	
Espesor de Tubería:	<u>18,26 mm</u>	
Soporte:	<u>NO</u> Material de Soporte: <u>NO</u>	
Limpieza en la Raíz:	<u>Si</u> Método: _____	

Fuente: Autor

5.3.3. Posición, técnica y material base

Se definió la posición de soldeo para la realización del proceso, seleccionándose la posición 5G. Esta posición como primera medida hace referencia a un material base tubular; en segundo lugar, el material base se ubicó de forma horizontal y siempre en reposo, de tal forma que es el soldador, quien mediante la técnica de soldeo oscilante aportó el material del electrodo de forma ascendente o descendente a la probeta. La técnica de soldeo se realizó con corriente directa y electrodo positivo (DCEP), de tal forma que la corriente fluye desde el material base hacia el electrodo.

Para la probeta no se realizó precalentamiento ni post calentamiento, estas variables no aplicaron durante el proceso. El material base de estudio del proyecto fue tubería de acero al carbón ASTM A36, que es la referencia de acero estructural al carbón. También se aprobó que hubiera una limpieza entre pases con grata metálica, como quedo registrado en la figura 38.

Figura 38 Información de la técnica del proceso y material base

POSICIÓN		TÉCNICA	
Ranura: <u>5G</u>	Filete: <u>----</u>	Aportación:	<u>Circular (95%), zigzag(5%)</u>
			<u>(Pase Múltiple)</u>
Placa: <u>----</u>	Tubería: <u>SI</u>	Corriente:	<u>DC (DCEP)</u>
		Limpieza entre Pases:	<u>Deficiente</u>
METALES BASE		Método de Limpieza:	<u>Grata mecánica</u>
	Metal Base No.1	Metal Base No.2	PRECALENTAMIENTO
Grupo:	<u>I</u>	<u>I</u>	T° de Precalentamiento:
Especificación del Acero:	<u>ASTM A36</u>	<u>ASTM A36</u>	<u>No aplica</u>
			T° de Interpase: <u>No aplica</u>
Espesor de Tubería:	<u>18,26 mm</u>	<u>18,26 mm</u>	POST- CALENTAMIENTO
Diámetro (Tubería):	<u>250 mm</u>	<u>250 mm</u>	Temperatura: <u>No Aplica</u>
			Tiempo: <u>No Aplica</u>

Fuente: Autor

5.3.4. Electrodo y procedimiento

Se estableció la especificación AWS A5.1 la que corresponde a un electrodo para soldar acero al carbón, dos clasificaciones de electrodo, E6013 que es un electrodo típico en la industria colombiana por su versatilidad en aplicaciones como carrocerías, muebles metálicos, ductos de aire acondicionado así como tanques y estructuras. Electrodo E7018, que también es utilizado para estructuras, tuberías, tanques a presión entre otros y además registra un mejor desempeño y acabado.

El diámetro del electrodo es de 1/8 de pulgada, seleccionado así debido al diseño de la junta cuya abertura de raíz es de 1/8 de pulgada y la altura de la raíz de igual longitud, figura 39.

Figura 39 Información del electrodo

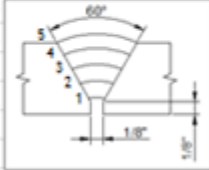
METAL DE APORTE		PROTECCIÓN	
Especificación AWS:	<u>A 5.1</u>	Fundente:	<u>Revestimiento</u>
Calificación AWS:	<u>E6011 y E7018</u>	Gas:	<u>No Aplica</u>
Marca:	<u>West Arco</u>	Velocidad deFlujo:	<u>No Aplica</u>
Diámetro Electrôdo:	<u>1/8"(3.2 mm)</u>	Tamaño de Boquilla:	<u>No Aplica</u>

Fuente: Autor

5.3.5. Procedimiento de soldadura

El procedimiento de la soldadura se realizó en 5 pasadas, cada una contigua en dirección opuesta y asignándole a cada pasada un valor de voltaje y amperaje, figura 40.

Figura 40 Información del procedimiento de soldadura

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA									
Pase	Proceso	Progresión	Metales de Aporte		Corriente			Velocidad de Avance (mm/min)	Detalles y Secuencia De la junta
			Clase	Diámetro (in)	Tipo y Polaridad	Amperaje (A)	Voltaje (V)		
1	SMAW	Ascendente	E 6013	1/8	DCEP	80	17	80	
2	SMAW	Descendente	E 6013	1/8	DCEP	80	18	85	
3	SMAW	Ascendente	E 7018	1/8	DCEP	95	18	95	
4	SMAW	Descendente	E 7018	1/8	DCEP	100	19	105	
5	SMAW	Ascendente	E 7018	1/8	DCEP	110	19	110	
ELABORADO POR: <u>David Antonio Acosta Cruz</u>									

Fuente: Autor

5.4. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS INDUCIENDO LA DISCONTINUIDAD DE FALTA DE FUSIÓN.

Las variables que generan falta de fusión en la unión soldada se describieron apropiadamente utilizando criterios técnicos especificados en el documento WPS, y fueron trabajados durante el proceso de soldadura para que, de esta manera, se garantizara la presencia de la discontinuidad de falta de fusión en la unión.

Las variables que se describieron y se trabajaron durante el proceso de soldadura fueron las siguientes:

5.4.1. Técnica de soldeo

La técnica de soldeo durante el proceso de una buena soldadura se realiza de una forma oscilante, siempre describiendo un mismo patrón, ya sea circular, semicircular o en zigzag; lo importante es realizar la técnica durante el proceso con el mismo patrón. Durante la realización de la probeta para este proyecto, se aplicaron dos técnicas de soldeo diferentes con el fin de inducir la aparición de la discontinuidad de falta de fusión.

Figura 41 Técnica de soldeo

TÉCNICA	
Aportación:	Circular (95%), zigzag(5%) (Pase Múltiple)
Corriente:	DC (DCEP)

Fuente: autor

El documento WPS señaló al soldador que utilizara dos técnicas diferentes en cada cordón de soldadura; el porcentaje para cada cordón de soldadura tuvo un único fin, y es que al menos se cambiara en una (1) oscilación, la técnica de soldeo durante el proceso.

Así mismo, el documento WPS establece que la velocidad utilizada en cada pase no era constante.

Figura 42 Velocidad de pases

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA				
Pase	Proceso	Progresión de Avance	Velocidad (mm/min)	Detalles y Secuencia De la junta
1	SMAW	Ascender	80	
2	SMAW	Descender	85	
3	SMAW	Ascender	95	
4	SMAW	Descender	105	
5	SMAW	Ascender	110	

Fuente: autor

De esta manera se indujo la aparición de la discontinuidad de falta de fusión durante el proceso de soldadura a través de una inadecuada técnica de soldeo.

5.4.2. Preparación inadecuada del material

Para realizar un buen proceso de soldadura también se debe hacer una buena limpieza, antes, durante e incluso después de finalizado el proceso. Aunque para la limpieza se utilizó grata metálica, no se realizó el procedimiento de limpieza correcto, se realizó de una manera deficiente como se describe en el documento WPS.

Figura 43 Limpieza entre pases

Limpieza entre Pases:	Deficiente
Método de Limpieza:	Grata mecánica

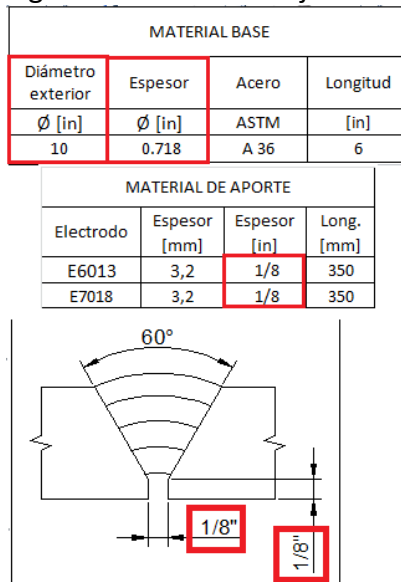
Fuente: autor

La deficiencia de la limpieza se realizó con el único objetivo de inducir la discontinuidad de la falta de fusión durante el proceso de soldadura.

5.4.3. Diseño inadecuado de la junta

Para diseñar la junta se tuvo en cuenta tanto el espesor del material base como del material de aporte, así como el diámetro exterior del material base. De acuerdo a lo anterior se estableció una distancia relativamente larga de raíz y una altura considerable de la misma.

Figura 44 Diseño de la junta



Fuente: Autor

El espesor del material base es alto, aproximadamente de 18.26mm. Debido a esto se diseñó una raíz grande; sin embargo el diámetro del electrodo es del mismo tamaño, pero con el recubrimiento del electrodo, éste queda de mayor tamaño; se consideró así para inducir la aparición de la discontinuidad de falta de fusión durante el proceso de soldadura.

5.4.4. Calor insuficiente

El calor insuficiente es otra de las variables que afecta la realización de un buen proceso de soldadura, dando lugar a que aparezca la discontinuidad de falta de fusión en el cordón de soldadura. Por esta razón, el documento WPS indicó que el proceso de soldadura se llevara a cabo con un amperaje bajo, según recomendaciones de west arco para los electrodos E6013 Y E7018.

Figura 45 Amperajes recomendados del electrodo E6013

DIMENSIÓN	AMPERAJES RECOMENDADOS
2.4 X 300 mm (3/32")	50 - 90 A
3.2 X 350 mm (1/8")	80 - 120 A
4.0 X 350 mm (5/32")	110 - 160 A
4.8 X 450 mm (3/16")	130 - 210 A
6.4 X 450 mm (1/4")	200 - 300 A

Fuente: Catálogo west arco Colombia

Figura 46 Amperajes recomendados del electrodo E7018

DIMENSIÓN	AMPERAJES RECOMENDADOS
2.4 X 300 mm (3/32")	70 - 100 A
3.2 X 350 mm (1/8")	100 - 145 A
3.2 X 450 mm (1/8")	135 - 195 A
4.0 X 350 mm (5/32")	135 - 200 A
4.0 X 450 mm (5/32")	170 - 270 A
4.8 X 350 mm (3/16")	170 - 270 A
4.8 X 450 mm (3/16")	240 - 400 A

Fuente: Catálogo west arco Colombia

Figura 47 Amperajes indicados por el documento WPS

Metales de Aporte		Corriente	
Clase	Diámetro (in)	Tipo y Polaridad	Amperaje (A)
E 6013	1/8	DCEP	80
E 6013	1/8	DCEP	80
E 7018	1/8	DCEP	95
E 7018	1/8	DCEP	100
E 7018	1/8	DCEP	110

Fuente: Autor

El documento WPS le indicó al soldador realizar el proceso de soldadura con el amperaje mínimo o bajo de cada electrodo. Para el E6013, el amperaje trabajado fue de 80A; para el electrodo E7018, el amperaje de trabajo se realizó en un rango de 15A, tomando como inicio 95A y finalizando en 110A, aún considerados bajos puesto que el máximo amperaje recomendado es de 145A.

El calor insuficiente puede ser generado de otras maneras como lo son: soldar con un arco eléctrico inestable e invertir la polaridad de los electrodos, sin embargo, el arco eléctrico deficiente depende, entre otras cosas de lograr una óptima distancia entre el electrodo y la pieza base, pero no es posible controlarla desde el documento WPS y dependemos de la destreza del soldador; por tal motivo no fue tomada en cuenta para la realización de las probetas. La polaridad de los electrodos, DCEP (corriente directa y electrodo positivo) no se cambió porque es causante directa de otras discontinuidades que impiden la clara visualización de la morfología de falta de fusión, distorsionando la geometría y el entorno de la misma. Este caso ocurre cuando se solda con la polaridad invertida del electrodo

E7018; para el caso del electrodo E6013, no influye si se solda con el electrodo positivo o negativo.

En el caso de corriente directa o continua, los dos electrodos pueden ser utilizados en cualquiera de las dos corrientes, y por tal motivo no se tuvo en cuenta para la realización de las probetas.

De esta manera se controlaron las variables determinantes para la aparición de falta de fusión en el proceso de soldadura, técnica de soldeo, preparación inadecuada del material, diseño inadecuado de la junta y calor insuficiente durante el proceso. Lo que esperábamos encontrar integrando todos los factores que propician la falta de fusión y que finalmente se dio, como quedó demostrado en los análisis de los ensayos no destructivos, fue de que se produjera la discontinuidad de falta de fusión al menos una vez, en los sectores de la soldadura, raíz, pases de relleno y superficie.

5.5. PROCESO DE PREPARACIÓN Y SOLDADURA DE PROBETA

La probeta se realizó según especificaciones de diseño y procedimiento documentados durante el capítulo quinto.

5.5.1. Preparación de la probeta

El material de acero ASTM A36 fue comprado en la ciudad de Bogotá, en las bodegas del barrio Ricaurte bajo las siguientes especificaciones:

Diámetro exterior de 10", espesor de 0.718" longitud de 12", tal y como designa el diseño de la probeta.

En un taller industrial, ubicado en el mismo barrio Ricaurte, fue llevado el material y a través de un torno, fue mecanizado para realizar el bisel en un extremo del material con el tamaño especificado en la figura 33.

5.5.2. Proceso de soldadura

Una vez realizado el mecanizado del material, éste fue llevado a las instalaciones de la planta de west arco Colombia, ubicada en Bogotá sobre la avenida 68 con calle 5°. Fue puesto en las áreas de soldadura predisuestas por la empresa, alojadas sobre el extremo posterior de las oficinas y laboratorios de la planta, donde se realizó el proceso de

soldadura. Allí, en los bancos de soldadura y con la ayuda de prensas mecánicas y una matriz se realizó el proceso de punteo de las piezas del material base.

El punteo, que también se genera por proceso SMAW, es el proceso de unir parcialmente dos piezas del material base a través de puntos de soldadura, no cordones de soldadura, se dice parcial porque no condicionan que sea una unión permanente, y pueden deshacerse dichos puntos a través de una fuerza mecánica, los puntos de soldadura se realizan con un alto amperaje, en este proyecto se realizó con un amperaje de 175A. Los puntos de soldadura son generados en la probeta aproximadamente cada 20 cm en todo el perímetro de la base del bisel.

Para el proceso de punteo no se requiere que se realice limpieza con grata metálica debido al buen acabado que se tiene después del mecanizado.

La prensa y la matriz se utilizan para garantizar que el bisel tenga una apertura de raíz de acuerdo al diseño de la junta.

El proceso de soldadura, se llevó a cabo en los bancos de soldadura de la planta west arco, se utilizó de nuevo la prensa mecánica para sostener la probeta que ya estaba unida a través de los puntos de soldadura y realizar los cordones de soldadura.

La probeta se sostuvo de manera horizontal, tal y como lo menciona el wps, y los cordones de soldadura se realizaron de manera ascendente y descendente según lo describe el documento wps para finalmente, crear la probeta con unión permanente como grafica la imagen 34.

El proceso de soldadura, según el wps, exige que se realice una limpieza deficiente después de cada pasada, esto se logra al utilizar solo 2 de las 3 diferentes gratas que en este proceso, podían utilizarse para eliminar toda la escoria resultante de la realización del cordón anterior.

Así mismo, el documento wps, manifiesta que la velocidad se incremente de forma progresiva, para esto se utilizó una marca de debía cumplir en un tiempo medido con cronómetro y esta se iba cambiando al pasar al siguiente cordón de soldadura.

Se debe aclarar que todo el procedimiento se realizó con la ayuda de un soldador calificado y experimentado de la empresa west arco, y fue a través de su gran labor y las instalaciones de west arco, que fue posible la realización del procedimiento de soldadura de la probeta.

6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y ANÁLISIS

La base para caracterizar la discontinuidad de falta de fusión fueron: los ensayos no destructivos de ultrasonido, tintas penetrantes, partículas magnéticas y radiografía. A través de estos ensayos, pudimos conocer y comparar su morfología en los distintos sectores de la soldadura, raíz, bisel y superficie. Los ensayos se realizaron con los procedimientos descritos a continuación.

6.1. PROCEDIMIENTO ULTRASONIDO PHASE ARRAY (UTPA)

Es uno de los ensayos más técnicos y que exige mayor conocimiento. El equipo utilizado es propiedad de west arco y sólo pudo ser manejado por una persona calificada y certificada, además de ser empleado de la empresa propietaria del equipo. El ensayo de ultrasonido es volumétrico, alto poder de penetración que permite encontrar discontinuidades de gran tamaño así como de pequeños tamaños. Una de las grandes ventajas de haber realizado el ensayo de ultrasonido es que la gráfica entregada por el ensayo, revela la naturaleza de la discontinuidad: longitud, espesor, ubicación y orientación.

6.1.1. EQUIPO BASICO

6.1.1.1. Pantalla

En la pantalla está integrado el generador de señales electrónicas, dispositivo electrónico para ampliar las señales provenientes del palpador y la pantalla graficadora de las señales electrónicas.

Figura 48 Equipo Olympus Omniscan



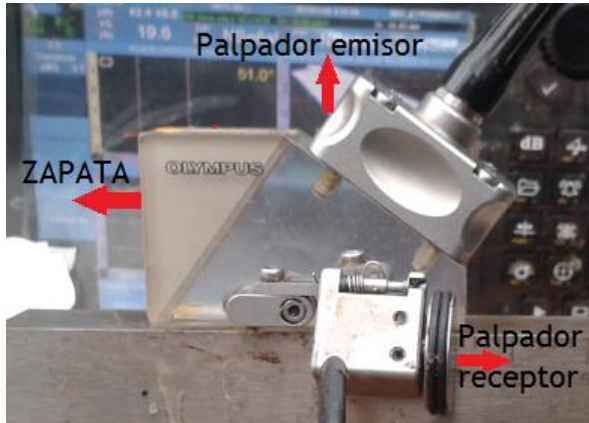
Fuente: Autor

6.1.1.2. Transductor

Para la realización del ensayo phase array, se ha utilizado un palpador integrado, es decir, un solo palpador donde se incluyen el emisor y receptor de ondas, así como la zapata que

inclinó la emisión de las ondas a 45° con el fin de dirigir las ondas hacia la soldadura y abarcar mejor la zona de inspección.

Figura 49 Transductor



Fuente: Autor

6.1.1.3. Bloque calibrador

El bloque calibrador calibra tiempos de las señales, ángulos proyectados, tamaños de discontinuidades y ubicación de las mismas.

Figura 50 Bloque calibrador



Fuente: Autor

6.1.1.4. Acoplante

Se aplicó en la zona de la probeta donde fue ubicada la zapata; esto con el fin de evitar la inclusión de burbujas de aire entre la zapata y el material de inspección que puedan provocar una mala lectura de las discontinuidades. Se utilizó una mezcla de metil celulosa y agua.

6.1.1.5. Elementos de limpieza

La grata metálica y el trapo, elementos de limpieza que se utilizaron durante el ensayo, aseguran la correcta adhesión del palpador a la probeta.

6.1.2. PREPARACIÓN DEL EQUIPO

Con el sistema de registro Encoder, se realiza un proceso de ajuste y calibración del equipo a partir del diseño de la junta, y bloque de calibración.

6.1.2.1. Selección de vistas

Una vez encendido el equipo, se seleccionaron las vistas de análisis. En el caso de este proyecto fueron seleccionadas las vistas A, C y D o S.

- Vista A

La vista A proporcionó una vista transversal de la junta, el scan de la vista A graficó la intensidad de la energía revotada al encontrar la discontinuidad con el mejor ángulo de ataque.

Figura 51 Vista de trabajo para el scan A



Fuente: Autor

- Vista S

Esta vista, al igual que la vista A, generó una gráfica a partir del perfil frontal de la junta pero la vista S generó una gráfica con la energía reflejada del haz de energía a diferentes ángulos.

- Vista C

Proporcionó la vista superior del cordón de soldadura.

Figura 52 Vista de trabajo para el scan C



Fuente; autor

6.1.2.2. Selección del diseño de la junta

Ajustar al diseño de la junta de la probeta, que en este caso fue de bisel sencillo a tope.

Figura 53 Selección junta en bisel sencillo a tope



Fuente: Autor

6.1.2.3. Calibración

Con la ayuda del bloque de calibración, se realizó:

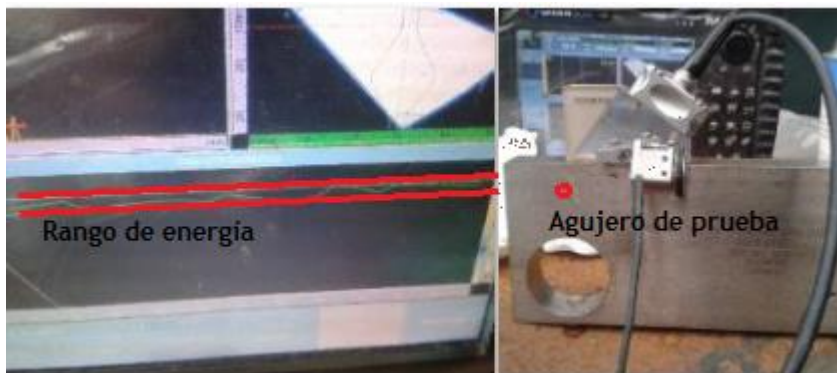
- Ajuste del análisis sensorial o rango de ángulos, es decir, la selección y calibración de los ángulos de proyección que forman el barrido sectorial.
- Retardo de señal generado por la zapata.
- Sincronización de la proyección del haz a distintos ángulos.

6.1.2.4. Sensibilidad

De acuerdo a la geometría de la junta, y con el equipo calibrado, se ajustaron las variables finales del equipo, la sensibilidad debe ser aprobada por una prueba realizada con el bloque de calibración, en donde tres variables son evaluadas simultáneamente sobre un rango de energía revotada.

- DA: profundidad
- PA: Desplazamiento
- SA: recorrido del haz

Figura 54 Prueba de sensibilidad

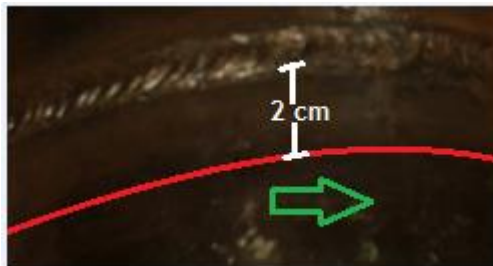


Fuente: Autor

6.1.2.5. Escaneo de la probeta.

El ensayo consistió en ubicar el transductor o palpador a 2 centímetros del cordón de soldadura y se realizó el barrido a lo largo de la longitud del cordón de soldadura.

Figura 55 Distancia entre el transductor y cordón de soldadura

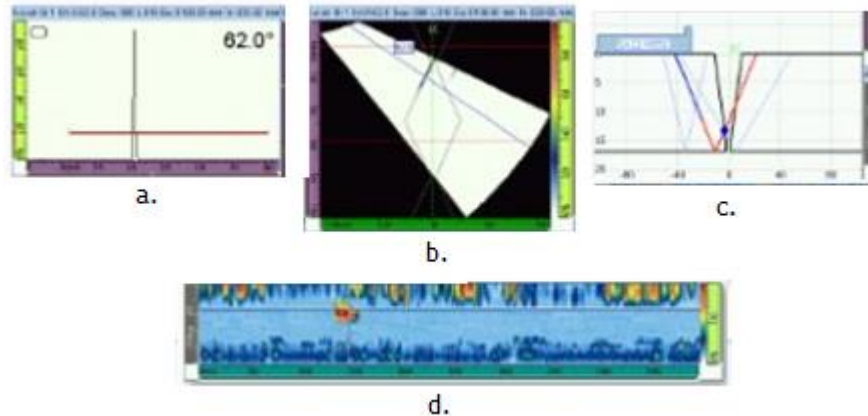


Fuente: Autor

6.1.3. RESULTADO DEL SCANER

El equipo omniscan de Olympus, genera las imágenes correspondientes al escaneo realizado.

Figura 56 Resultado de escáner



Fuente: Autor

La figura 56 muestra las imágenes generadas por el equipo, éstas fueron analizadas y son la prueba de la caracterización de la discontinuidad de falta de fusión. La imagen a es la gráfica del haz reflejado al encontrar la discontinuidad, se muestra tan abrupta y aguda por ser una discontinuidad filosa y pequeña. La imagen b. muestra la sección transversal del bisel, allí se grafica la criticidad de la intensidad del haz así como al abanico que forman todos los haz de energía a diferentes ángulos. La imagen c muestra la discontinuidad encontrada y ubicada sobre el bisel, esta discontinuidad se encuentra después del rebote del haz de energía. La imagen d. muestra la discontinuidad desde la vista superior, allí podemos conocer la longitud total de la misma.

6.2. ANALISIS ULTRASONIDO (UT PHASED ARRAY – UT PA)

Las características morfológicas generadas por la discontinuidad de falta de fusión en tubería de acero al carbono soldadas mediante proceso SMAW, fueron realizadas a través de los scanners de las vistas A, D ó S Y por último mediante la vista C, mostrando por cada toma las diferentes formas de ver y evaluar la zona del material que se está inspeccionando. Estas características se representan a continuación.

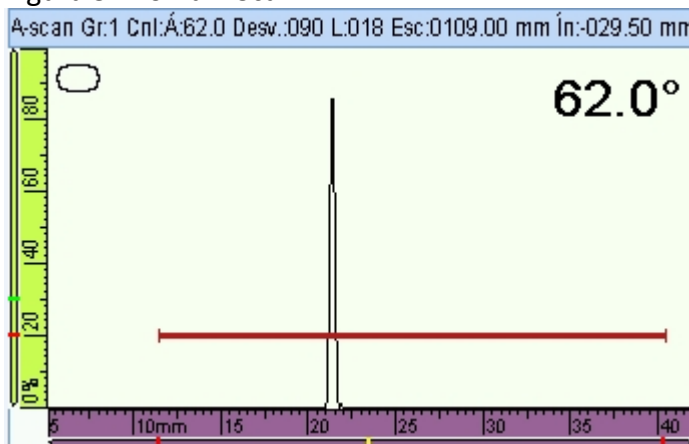
6.2.1. SCAN A

Este tipo de vista en particular refleja la cantidad de energía que produce la interrupción del haz ultrasónico al encontrar la discontinuidad en la soldadura, proporcionando una característica fundamental de la falta de fusión, la aparición de un pico considerable y muy relevante en la morfología de la vista.

6.2.1.1. Toma N°1

La toma 1 figura 57 ilustra un pico muy agudo de energía reflejada, por arriba de un 80%, esta energía crece y decrece en una distancia muy corta, indicando que el espesor de la discontinuidad es poco más de un milímetro. El ángulo que mejor obtuvo la ilustración para esta toma fue de 62°, es decir que de todos los haz de energía emitidos a diferentes ángulos para crear el barrido total de la sección inspeccionada, el que mejor obtuvo la cantidad de energía emitida fue el ángulo a 62°.

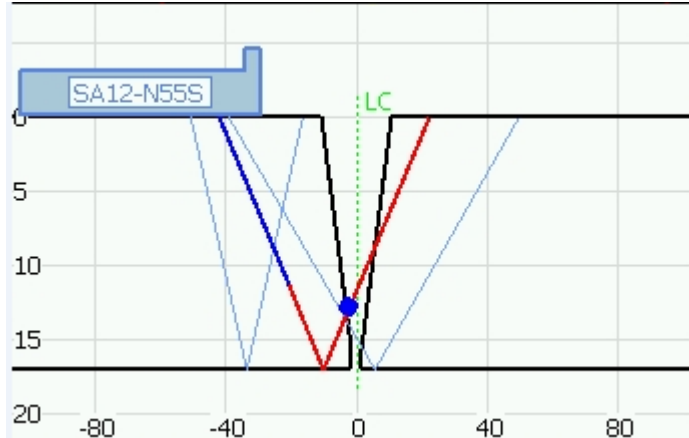
Figura 57 Toma 1 Scan A



Fuente: autor

El scan A transversal y figura 58 es una imagen transversal de la sección soldada y funciona como apoyo al scan A, muestra el haz de energía reflejado a 62° de la toma N°1, adquiriendo la información de la discontinuidad en rebote ubicándose aproximadamente a 12 mm de la superficie exterior del tubo y que además, la discontinuidad se encuentra ubicada sobre el costado de la superficie del bisel.

Figura 58 Toma 1 scan A transversal

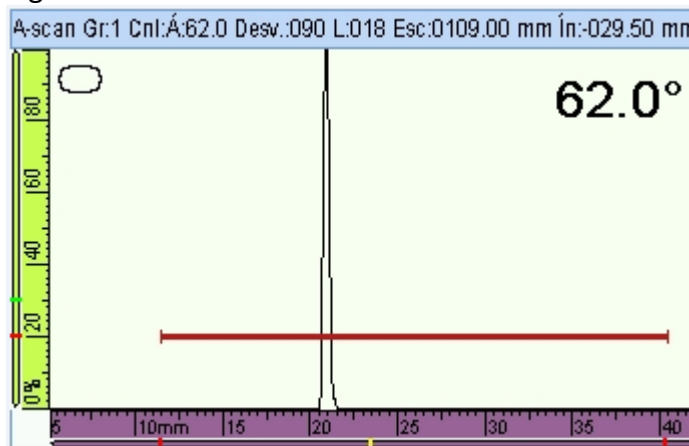


Fuente: autor

6.2.1.2. Toma N°2

La toma 2 figura 59 de nuevo muestra una cantidad de energía reflejada bastante elevada, llegando casi a un 100% en una cobertura de tan solo 1 mm de longitud, haciendo referencia al espesor de la discontinuidad falta de fusión en la sección soldada. El ángulo a 62° otra vez es el que revela la proyección de la discontinuidad.

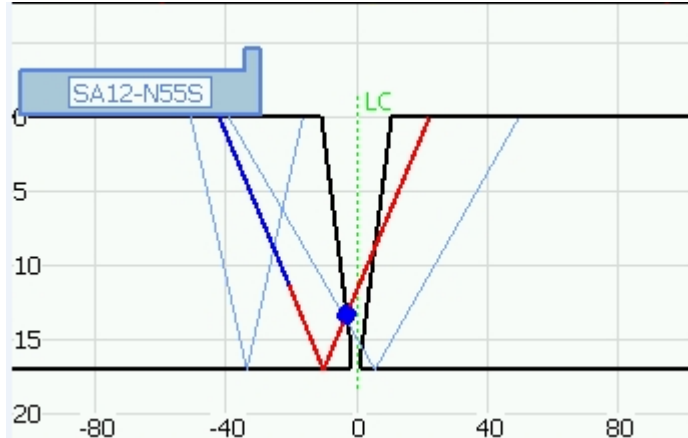
Figura 59 Toma 2 scan A



Fuente: autor

La toma transversal del scan A toma N°2 figura 60 muestra, la ubicación de la discontinuidad sobre la superficie del bisel, a una distancia de 13 mm de la superficie exterior del tubo y la adquisición de datos se obtuvo mediante rebote del haz. La figura 72 establece el primer patrón de la discontinuidad de la falta de fusión, y la figura 73 establece la ubicación de dicha discontinuidad.

Figura 60 Toma 2 scan A Transversal

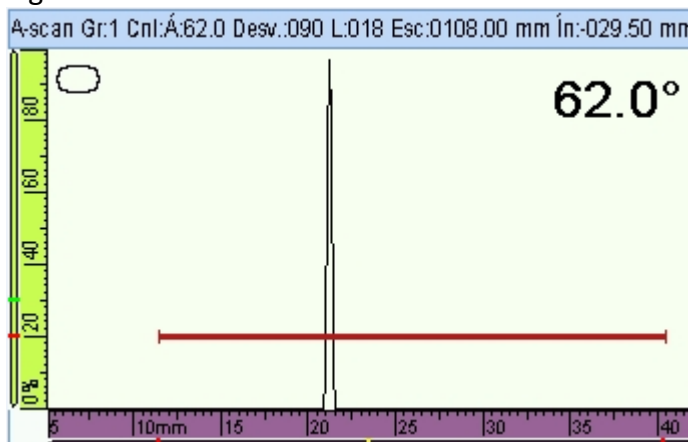


Fuente: autor

6.2.1.3. Toma N°3

La toma 3 figura 61 muestra de nuevo un pico en exceso agudo, formando ya un patrón respecto a las tomas anteriores, pues se encuentra con una energía reflejada por encima de un 90%, así mismo vamos encontrando un espesor de discontinuidad en la falta de fusión muy parecido que es de 1 mm aproximadamente para todas las tomas.

Figura 61 Toma 3 scan A



Fuente autor

Podemos visualizar en la figura 62 que la discontinuidad se encuentra ubicada aproximadamente a 12 mm de la superficie exterior del tubo y sobre la superficie del bisel, la información de los datos a 62° de la toma N°3 fue tomada en revote.

Figura 62 Toma 3 scan A transversal

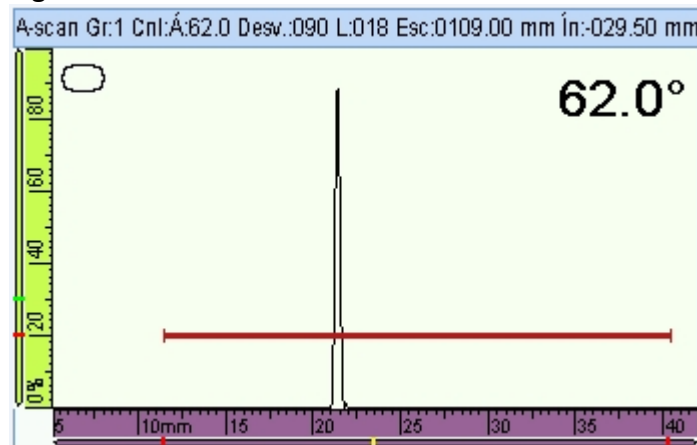


Fuente: autor

6.2.1.4. Toma N°4

La toma 4 figura 63 ilustra que la energía reflejada se encuentra aproximadamente en un 90%, el pico es agudo y presenta un crecimiento y decrecimiento muy rápido, en tan solo 1 mm, justo como las anteriores tomas, siguiendo el patrón encontrado de 1 mm de espesor para la discontinuidad, así mismo el ángulo que mejor refleja la discontinuidad es de 62° .

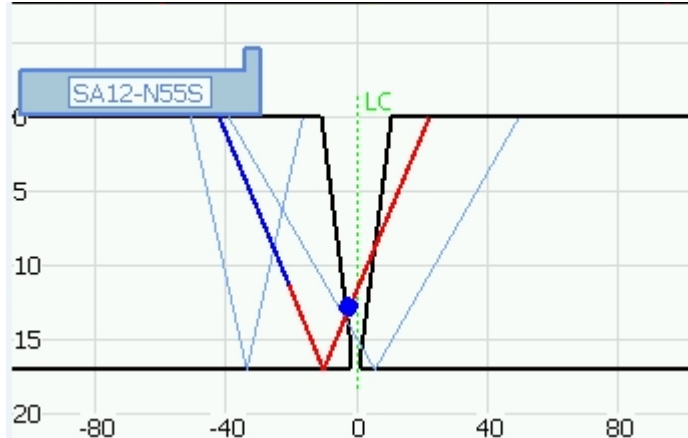
Figura 63 Toma 4 scan A



Fuente: autor

La imagen transversal de la toma 4 de la sección soldada y figura 64, revela el haz ultrasónico de 62° que ha tomado de revote la discontinuidad encontrándola sobre la superficie del bisel y a 12 mm de la superficie externa del tubo.

Figura 64 Toma 4 scan A Transversal

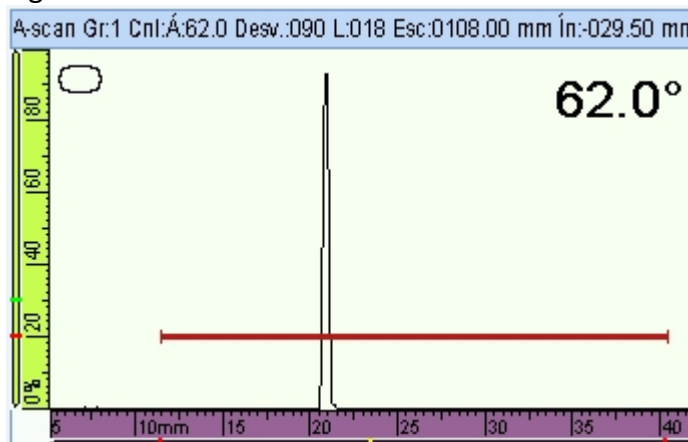


Fuente: autor

6.2.1.5. Toma N°5

La toma 5 figura 65 de nuevo revela una cantidad de energía reflejada de un valor por encima del 90%, el pico es agudo y súbito, con una longitud de aproximadamente 1mm, así mismo el ángulo es nuevamente 62° y ya se encuentra sobre el patrón establecido durante las últimas tomas.

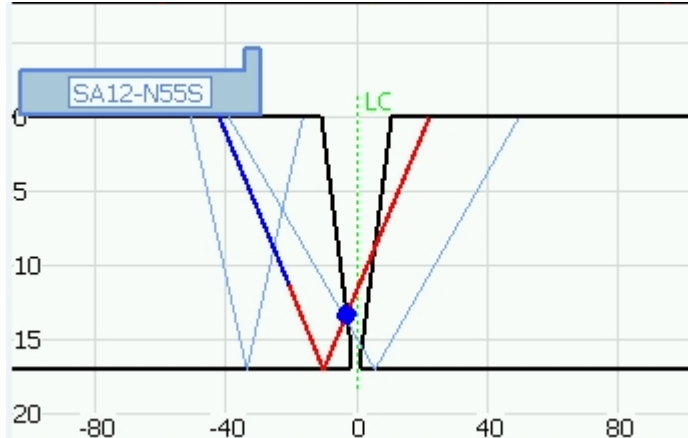
Figura 65 Toma 5 scan A



Fuente: autor

La vista transversal de la toma N°5 y figura 66, revela que el ángulo 62° ha captado la discontinuidad en modo rebote, encontrándose ésta aproximadamente a 12 mm de la superficie externa del tubo y sobre la superficie del bisel.

Figura 66 Toma 5 scan A transversal

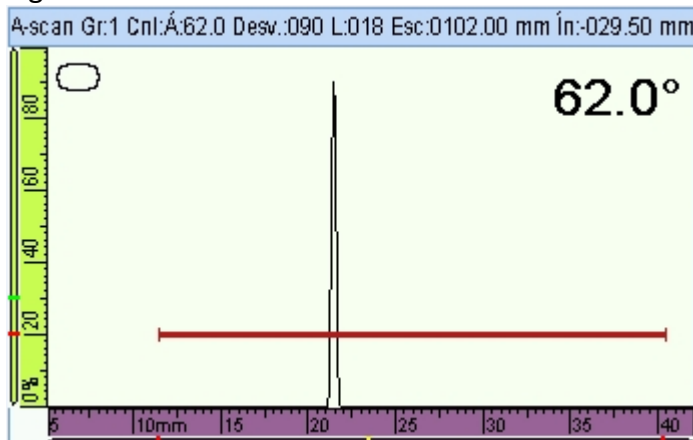


Fuente: autor

6.2.1.6. Toma N°6

La toma 6 y figura 67 describe un pico agudo que se distingue por su forma abrupta de subir repentinamente y bajar al instante; esta cantidad de energía reflejada, que está cercana al 90% en sólo 1 mm, se asimila a las demás tomas; además, también tienen en común ésta y las demás tomas, el ángulo de ataque a la discontinuidad, 62° .

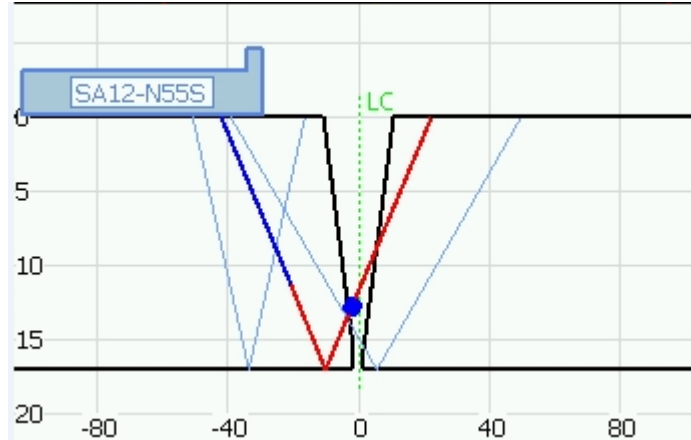
Figura 67 Toma 6 scan A



Fuente: autor

La discontinuidad ha sido encontrada en rebote por el haz ultrasónico que se encuentra a 12mm de la superficie del tubo exterior y se encuentra también sobre la superficie del bisel, tal como lo revela la figura 68.

Figura 68 Toma 6 scan A Transversal

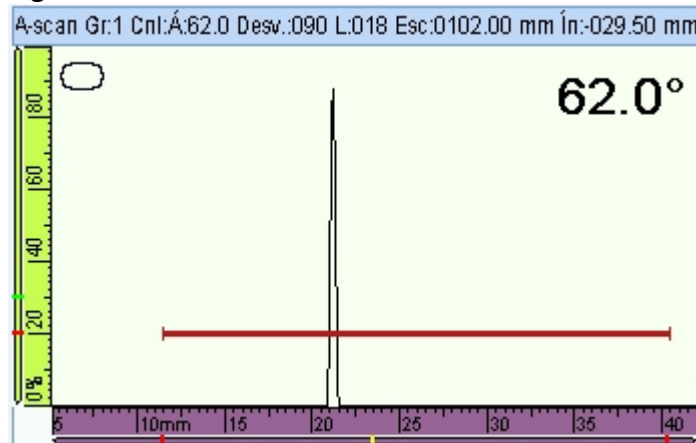


Fuente: autor

6.2.1.7. Toma N°7

La toma 7 y figura 69 manifiesta un haz ultrasónico reflejado a 62° , la cantidad de energía reflejada es de aproximadamente 90%, el pico es muy similar a las anteriores tomas debido a su forma aguda, definida y características abruptas, de nuevo es el ángulo a 62° el que detecta la discontinuidad. La longitud del pico también está ya definida, con una longitud de 1 mm.

Figura 69 Toma 7 scan A



Fuente: autor

La figura 70 revela que la discontinuidad se encuentra sobre la superficie del bisel; la imagen transversal de la toma 7 revela que el haz ha detectado dicha discontinuidad en rebote aproximadamente a 12mm de la superficie externa del tubo y muestra el recorrido del haz a 62° reflejado.

Figura 70 Toma 7 scan A transversal



Fuente: autor

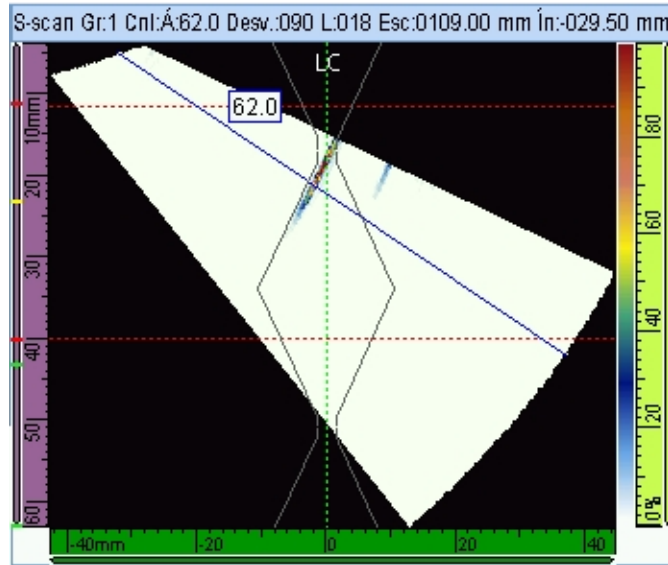
6.2.2. SCAN D

La vista del scan D es una vista de tipo sectorial; allí se aprecia todo el barrido de ángulos posibles donde cada haz ultrasónico realiza su recorrido en forma de abanico a través de toda la vista transversal de la junta soldada, además revela la forma volumétrica que tiene la discontinuidad, generando colores de distinción de claro a rojo intenso para la discontinuidad más crítica.

6.2.2.1. Toma N°1

La toma 1 y figura 71 se muestra en color blanco, resaltando del fondo negro y son todos los haz ultrasónicos que han recorrido la junta soldada, con el ángulo importante, el haz de ángulo 62° que capta de manera inmejorable la discontinuidad; se observa cómo el haz atraviesa una zona de color rojo, indicando una alta criticidad, que en el scan A llamamos “energía reflejada”.

Figura 71 Toma 1 scan D



Fuente: autor

6.2.2.2. TOMA N°2

La toma 2 y figura 72 revela el recorrido del haz ultrasónico a 62° que está siendo graficado de manera volumétrica a través del scan D; se puede apreciar la forma lineal que la discontinuidad presenta, con un alto grado de criticidad, pues un alto porcentaje de energía es representado a manera de color rojo sobre el recorrido del haz.

Figura 72 Toma 2 scan D



Fuente: autor

6.2.2.3. TOMA N°3

En la figura 73 se aprecia el barrido del haz ultrasónico y el haz a 62° que detectó la discontinuidad; el color rojo intenso refleja una alta criticidad de la discontinuidad, alcanzando el 90%.

Figura 73 Toma 3 scan D

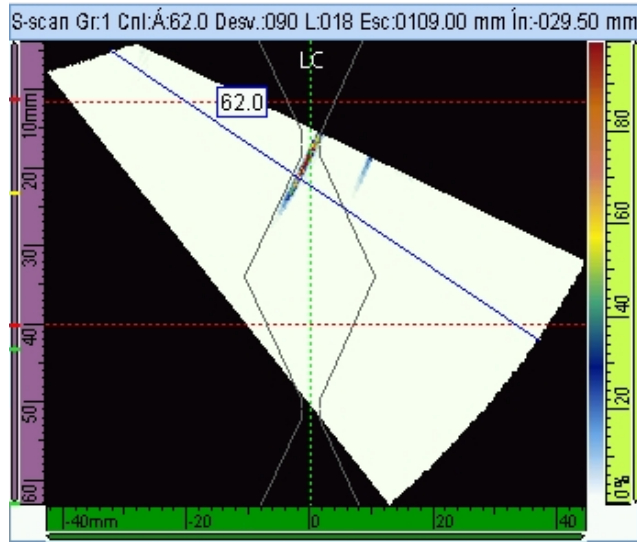


Fuente: autor

6.2.2.4. TOMA N° 4

El patrón está evidenciando con claridad, una discontinuidad de tipo planar y alargada, con una alta cantidad de energía reflejada como se ilustra en la figura 74, además la criticidad de la discontinuidad está ubicada hacia un solo punto, y tiende hacia el centro.

Figura 74 Toma 4 scan D



Fuente: Autor

6.2.2.5. TOMA N° 5

De nuevo en la figura 75 muestra, la criticidad que se encuentra concentrada en el centro de la discontinuidad encontrada, el barrido del ángulo a 62° es el que detecta la alta criticidad, hacia el 90% de energía reflejada y se va decreciendo rápidamente hacia los costados en una menor cantidad de energía.

Figura 75 Toma 5 scan D



Fuente: autor

6.2.2.6. TOMA N°6

Se detecta una criticidad alta, debido a su color de rojo intenso, establece de nuevo una forma planar y alargada de la discontinuidad, concentrando toda la energía reflejada hacia el centro y disminuyendo hacia los extremos, como se muestra en la figura 76.

Figura 76 Toma 6 scan D

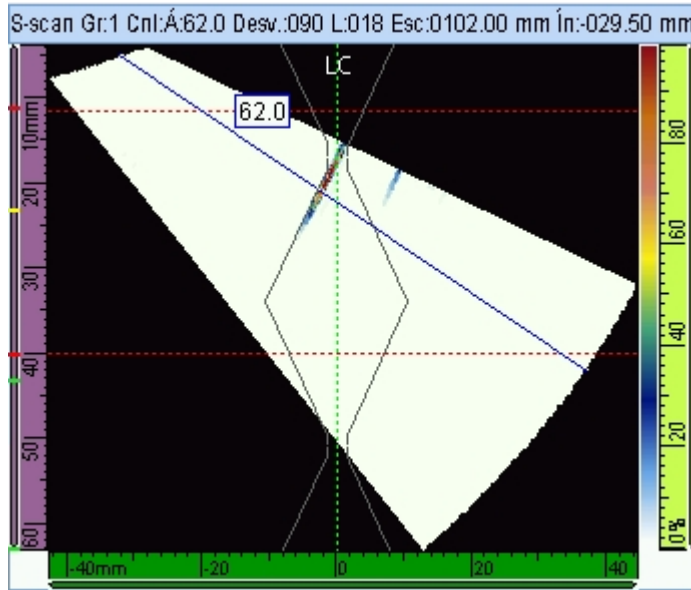


Fuente: autor

6.2.2.7. TOMA N°7

La toma 7 y figura 77 ayuda aún más a comprobar la figura definida que adquiere la discontinuidad de falta de fusión en una soldadura realizada por proceso SMAW en un tubo de acero al carbón, vista mediante el SCAN D ó S, esta figura muestra una discontinuidad encontrada de tipo planar y alargada, recargando toda la criticidad sobre el centro alrededor de un 90% y reduciendo la criticidad hacia los costados, volumétricamente no es ancha, respecto a su longitud y se encuentra sobre la superficie del bisel.

Figura 77 Toma 7 scan D



Fuente: autor

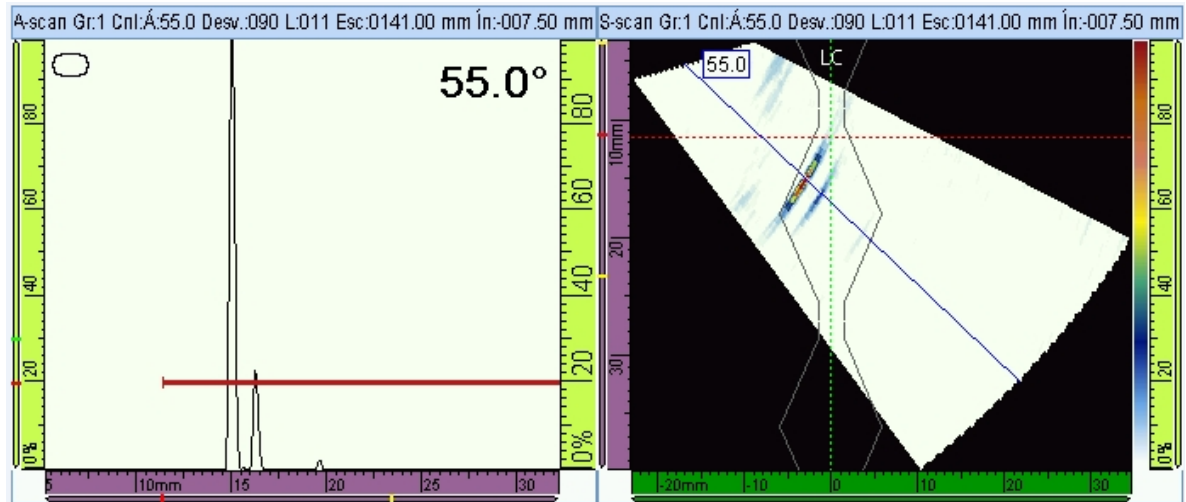
6.2.3. COMPARACIÓN SCAN A Y SCAN D

Para concluir la morfología de la discontinuidad de falta de fusión, es preciso apreciar la visualización simultánea de los picos de energía reflejada y la vista volumétrica de la discontinuidad. A continuación veremos las características de ambas vistas y su comparación para destacar el patrón que registra una discontinuidad de falta de fusión. En las siguientes tomas los scan A y D también revelan otra discontinuidad de menor energía reflejada y menor volumen reflejado, pero ésta no será tema de estudio.

6.2.3.1. TOMA 8

En la figura 78 sobre el costado izquierdo se puede apreciar el pico agudo del scan A, hacia la derecha se observa la característica de la discontinuidad de tipo plana y alargada de falta de fusión en la imagen proyectada por el scan D, por supuesto el ángulo común entre ambas vistas de 55° . La aparición de un segundo pico en el scan A revela una segunda discontinuidad, que no es tema de análisis para este informe, de la misma manera aparece una discontinuidad poco crítica en el scan D, haciendo referencia a pico del scan A.

Figura 78 Toma 8 scan A-D

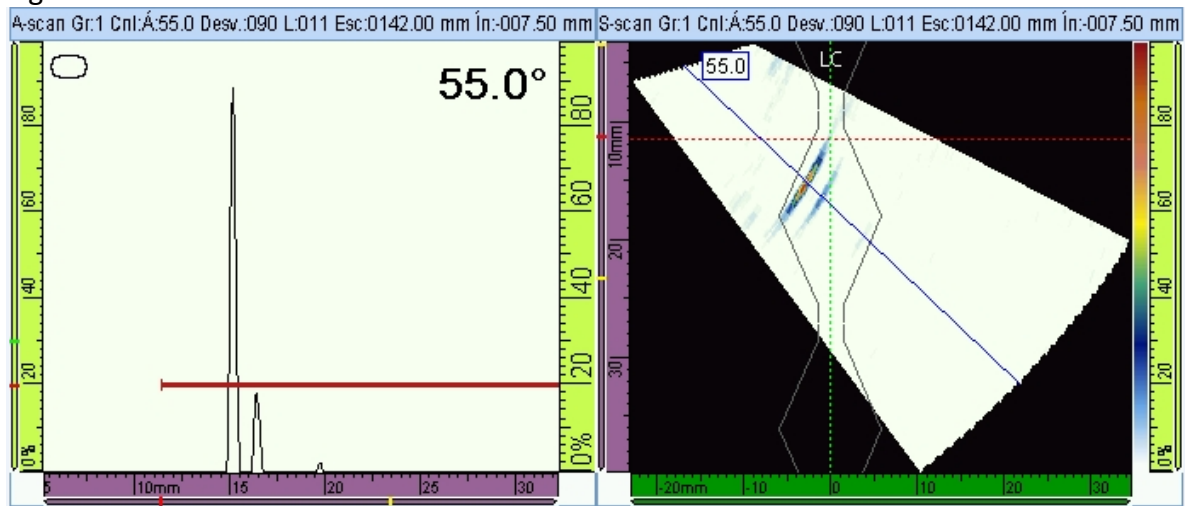


Fuente: autor

6.2.3.2. TOMA 9

De nuevo aparece un pico bastante pronunciado en la figura 79, con un porcentaje de energía reflejada de alrededor de un 90%, la discontinuidad de falta de fusión en el scan D se observa como una discontinuidad plana y alargada. Estas observaciones han sido tomadas por el ángulo a 55°.

Figura 79 Toma 9 scan A-D

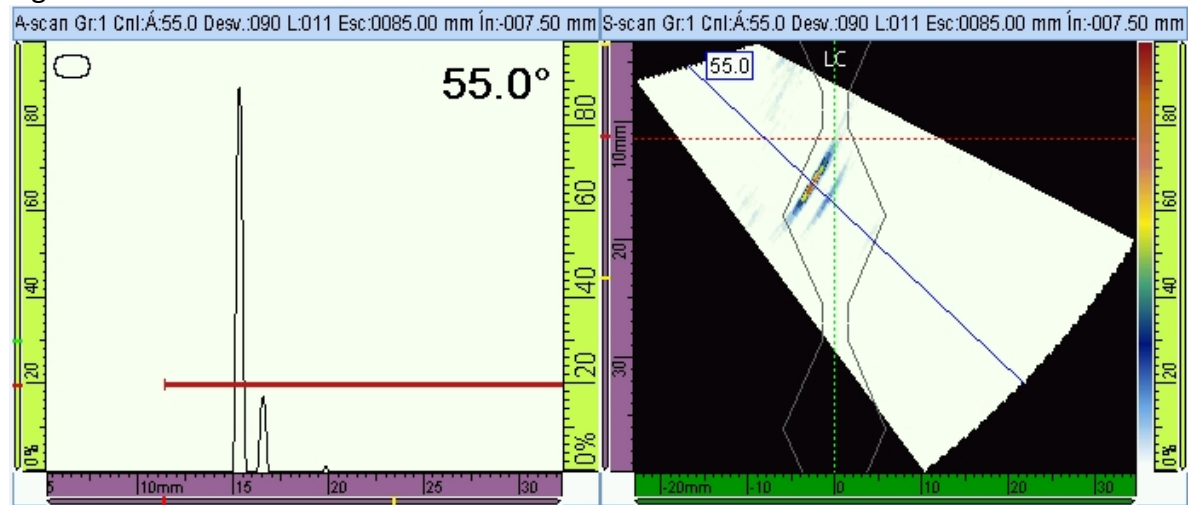


Fuente: autor

6.2.3.3. TOMA 10

El pico pronunciado que se vuelve a observar en la figura 80, alcanza una energía reflejada de un 90%, subiendo y bajando súbitamente, en poca longitud realiza su curva característica, es decir, que aquella discontinuidad, “falta de fusión”, tiene un espesor de poco menos de 1 mm; el scan D que se observa, refleja una discontinuidad tipo plana y alargada, relacionándose directamente con un patrón ya establecido en las tomas anteriores. El ángulo que ha adquirido los datos de análisis es a 55°.

Figura 80 Toma 10 scan A-D

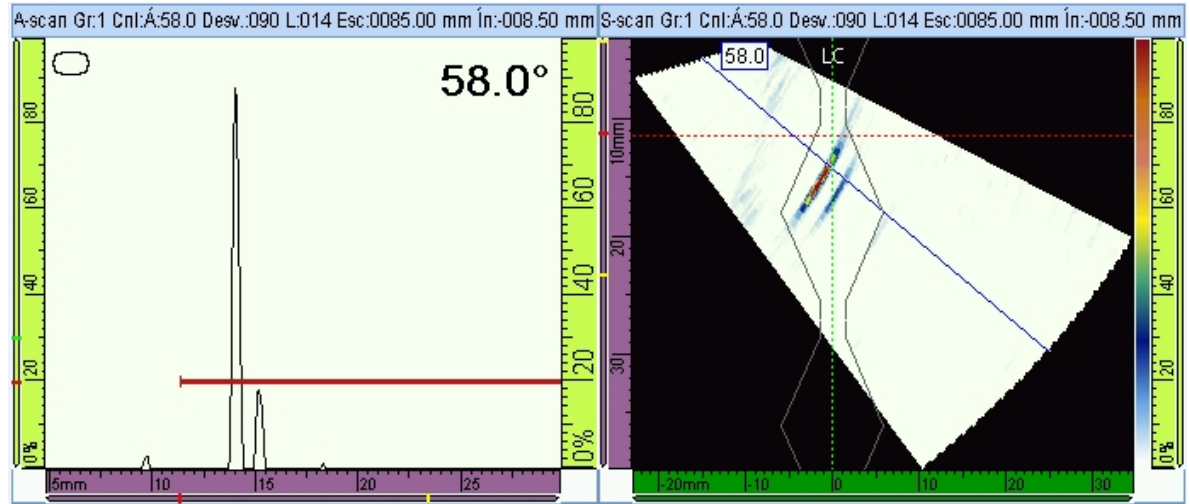


Fuente: autor

6.2.3.4. TOMA 11

En la parte izquierda de la figura 81 se aprecia el pico agudo característico de un 88% de energía reflejada, así como el espesor de poco menos de 1 mm y el ángulo a 58° el cual capturó los datos. En el costado derecho, en el scan D se recrea la aparición de la discontinuidad de forma plana y alargada, así como el ángulo a 58°.

Figura 81 Toma 11 scan A-D

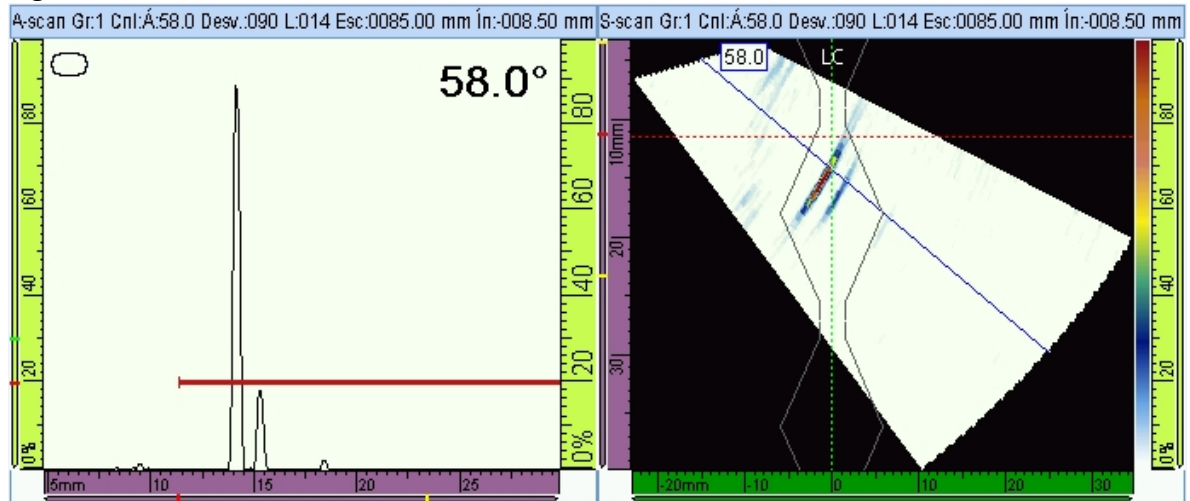


Fuente: autor

6.2.3.5. TOMA 12

La toma 12 y figura 82 muestra el scan A y el scan D. Allí se pueden apreciar las características fundamentales de la discontinuidad de falta de fusión en una junta soldada. El scan A, a la izquierda de la imagen, contiene un pico muy pronunciado, agudo y abrupto que resalta la característica fundamental, llegando a un 90% de energía reflejada; en la derecha de la imagen, se resalta la otra característica fundamental, una morfología plana y alargada de la discontinuidad que ha sido tomada por un ángulo a 58°.

Figura 82 Toma 12 scan A-D

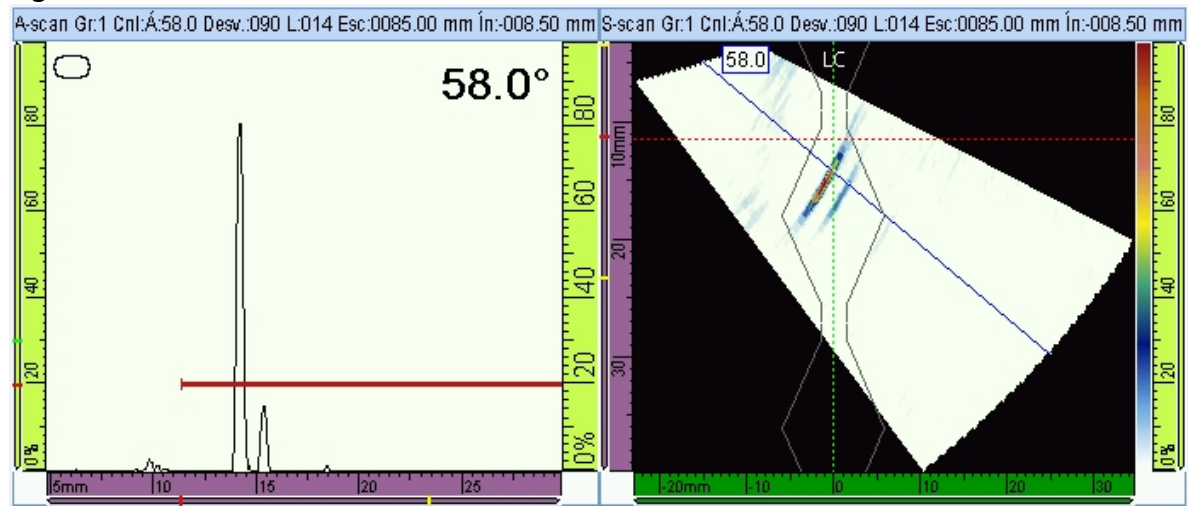


Fuente: autor

6.2.3.6. TOMA 13

En la figura 83 de nuevo encontramos un pico característico del scan A, muy agudo y alcanzando alrededor de un 80% de energía reflejada, una longitud total de la curva del pico de 1mm. En el scan D encontramos la forma característica de una discontinuidad plana y alargada, una criticidad alta debido a su color rojo. El barrido se ha realizado por el ángulo a 58°.

Figura 83 Toma 13 scan A-D

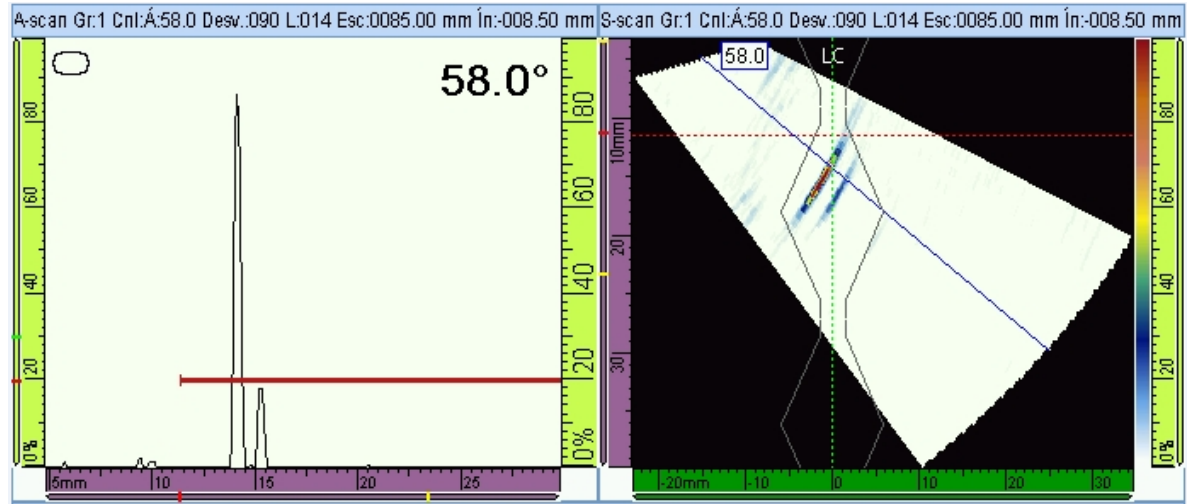


Fuente: autor

6.2.3.7. TOMA 14

La figura 84 plasma la característica ya encontrada de la discontinuidad de falta de fusión en una junta soldada, el pico característico completamente definido, muy agudo, abrupto y perpendicular al eje de la abscisa sobre el scan A. La morfología de la discontinuidad también se encuentra con un patrón de reconocimiento establecido, teniendo una forma plana y alargada con los niveles de criticidad en el centro de la discontinuidad.

Figura 84 Toma 14 scan A-D



Fuente: autor

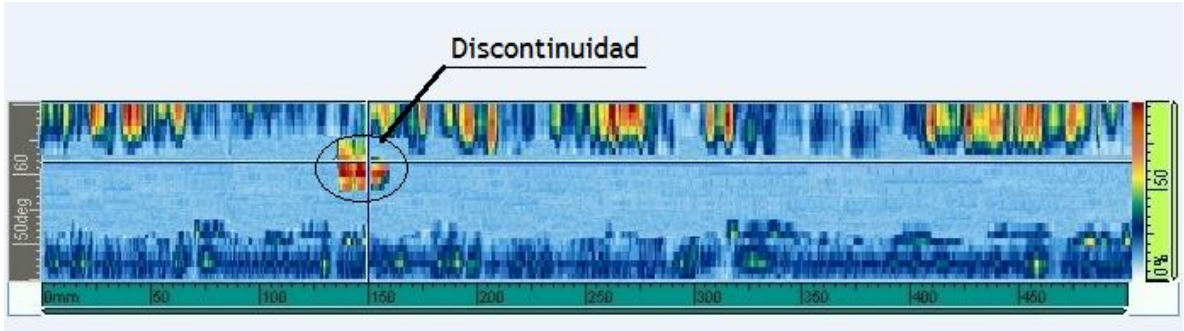
6.2.4. SCAN C

El scan C se caracteriza por ser una vista superior y revela una imagen de colores y longitud de los mismos, los colores indican energía reflejada, tal y como podría interpretarse en un scan A o D, sólo que adicionalmente, podemos ver la verdadera magnitud de la discontinuidad a través del cordón de soldadura en la junta. Una de las características de este tipo de scan, es que se realiza una toma única, y ahí se grafica la discontinuidad en niveles de colores.

6.2.4.1. TOMA ÚNICA

La figura 85 muestra la gráfica del scan C, que es la vista superior de la discontinuidad, se observa un color rojo en toda la longitud de la discontinuidad, resaltando una alta energía reflejada por el haz ultrasónico; además se puede apreciar la longitud total de la discontinuidad, aproximadamente 25mm. Esta es la única discontinuidad detectada por el ensayo, las demás marcaciones en rojo solo son parte de la visualización de la inspección en los límites exteriores.

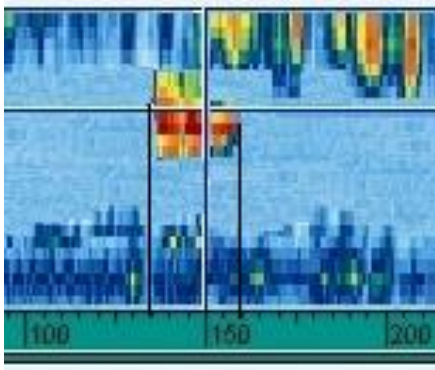
Figura 85 Scan C toma única



Fuente: Autor

La figura 86 muestra una ampliación de la discontinuidad encontrada en el scan C, se puede observar el color rojo en toda la longitud de la discontinuidad, reflejando una cantidad elevada de energía, e indicando que dicha discontinuidad, tiene una longitud de 25mm.

Figura 86 Scan C ampliada



Fuente: autor

Anteriormente no conocíamos la longitud que la discontinuidad tenía a través del cordón de soldadura; con la ayuda del scan C, sabemos cómo es la morfología de una discontinuidad de falta de fusión, rojo intenso en toda la longitud de la discontinuidad.

6.3. PROCEDIMIENTO TINTAS PENETRANTES (PT)

El ensayo detectó discontinuidades abiertas a la superficie. Fue un ensayo donde se requirió un nivel intermedio de conocimiento, aun así, se contó con la experiencia de west arco para la elaboración de dicho ensayo.

6.3.1. Materiales utilizados

No fue requerido ningún equipo electrónico para la realización del ensayo, para la total ejecución solo fue requerido, como material explícito de este ensayo, las tintas penetrantes, los demás materiales son también utilizados en los demás ensayos, como lo son los elementos de limpieza.

6.3.1.1. Elementos de limpieza

Se utilizaron algunos elementos adicionales como guantes para la manipulación de las tintas, así como trapos y grata metálica para la limpieza de la pieza.

- Retal de trapo o toalla
- Grata metálica
- Guantes de nitrilo

6.3.1.2. Tintas penetrantes

Las tintas penetrantes fueron los principales artículos para la realización del ensayo, y las que finalmente revelaron las discontinuidades que se hallaban en la probeta. El ensayo se realizó con tintas penetrantes tipo II, de tipo visible lavable con agua método A, como quedó registrado en la figura 87.

Figura 87 Clasificación del examen con penetrantes. Tipo y método

TIPO II	
Coloreados	
Método A	Lavables con agua (ASTM E-1418)
" C	Removibles con solvente (ASTM E-1220)

Fuente: NORMA ASTM E165-94

- Limpiador: Realizó la tarea de limpiar la zona de inspección. Fue importante realizar una buena limpieza, se necesitó que las discontinuidades estuvieran libres de cualquier contaminante como óxido, suciedad o cualquier elemento que pudiera interferir con la lectura de las discontinuidades.
- Penetrante: Fluido que ingresó a las cavidades imperfectas del cordón de soldadura.
- Revelador: Con la utilización de la tinta reveladora, pudimos conocer las discontinuidades que había en la soldadura.

Figura 88 Tintas penetrantes



Fuente: Autor

6.3.2. Aplicar tintas penetrantes

Antes de utilizar cualquier tinta, se observó el estado de la probeta y presentaba oxidación tanto en el cordón de soldadura como en sus alrededores; debido a esto, fue preciso realizar una limpieza previa.

6.3.2.1. Limpieza superficial

La probeta presentaba signos de oxidación, como primera medida se realizó una limpieza con la grata metálica, tanto en el cordón de soldadura como en la zona perimetral, aproximadamente entre 2 y 3 centímetros del cordón hacia el extremo de la probeta y posteriormente una remoción del exceso de óxido aún presente en la probeta con un retal de tela.

A continuación se aplicó el limpiador a 15 cm de la superficie de la probeta, y de nuevo con el retal de tela se remueven impurezas que quedan en la superficie dejando la probeta en óptimas condiciones para aplicar el penetrante.

Figura 89 Limpieza de probeta



Fuente: autor

6.3.2.2. Aplicar penetrante

Una vez estuvo libre de impurezas la probeta, se procedió a aplicar la tinta penetrante aproximadamente a 15 cm de la superficie, de forma pareja y constante en toda la periferia del cordón.

Figura 90 Tiempos de penetración para penetrantes y revelador

TABLA 2 Tiempos de Penetración Mínimos Recomendados

Material	Forma	Tipo de Discontinuidad	Tiempo de Penetración (minutos)	
			Penetrante	Revelador
Aluminio, Magnesio, Acero, Latón y Bronce, Ti y Aleac Alta Temp.	Fundición y soldaduras	Gotas frias, porosidad, falta de fusión, fisuras (todas las formas)	5	10
	Materiales forjados-extrusión Forja, planchas	Traslape, fisuras (todas las formas)	10	10
Herramientas Carburos	Todas las formas	Falta de fusión, porosidad, fisuras	5	10
Plásticos	Todas las formas	Fisuras	5	10
Vidrio	Todas las formas	Fisuras	5	10
Cerámicos	Todas las formas	Fisuras, porosidad	5	10

^A Para el rango de Temperaturas de 50 a 100F (10 a 38 C) para los penetrantes fluorescentes y 50 a 125 F (10 a 52 C) para penetrantes visibles

^B El máximo tiempo de penetración de acuerdo con 8.5.2

^C El tiempo de revelado empieza tan pronto como la capa de revelado húmedo ha secado en la superficie de las piezas (mínimo recomendado). Tiempos máximos de revelado de acuerdo con 8.8.6

Fuente: Norma ASTM E165-94

El tiempo mínimo recomendado para que actúe el líquido revelador es de 5 minutos, minutos en los cuales el penetrante se introduce apropiadamente en las discontinuidades; sin embargo, el procedimiento se ha realizado en un tiempo de 10 minutos antes de remover el penetrante con un retal de tela.

6.3.2.3. Aplicar revelador

Se aplicó el líquido revelador a una distancia aproximada de 15 cm de la superficie del cordón, aquél debe actuar en un tiempo mínimo de 10 minutos, pero el revelador se ha dejado un tiempo de 15 minutos antes de inspeccionar la probeta. El procedimiento de aplicar el revelador debió realizarse de forma pausada, constante y uniforme sobre la superficie para que el revelador no generara falsas indicaciones o distorsionara la inspección por exceso de tinta.

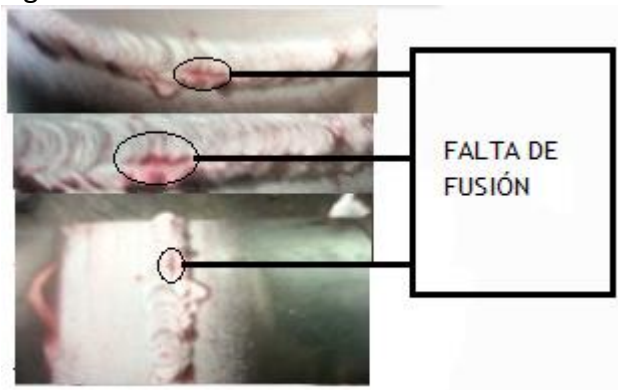
Figura 91 Exceso de tinta en un procedimiento



Fuente: autor

Pasados los 15 minutos, el revelador ha absorbido el líquido penetrante lo suficiente como para revelar las discontinuidades abiertas a la superficie, visibles y marcadas con un color rojo intenso. De esta manera se ha encontrado la falta de fusión ocurrida en el proceso de soldadura realizada en la probeta.

Figura 92 Discontinuidades de falta de fusión



Fuente: Autor

No todas las marcas rojas pueden ser falta de fusión u otra discontinuidad; algunas son producto de la geometría de la pieza o del cordón de soldadura o producto de una limpieza deficiente.

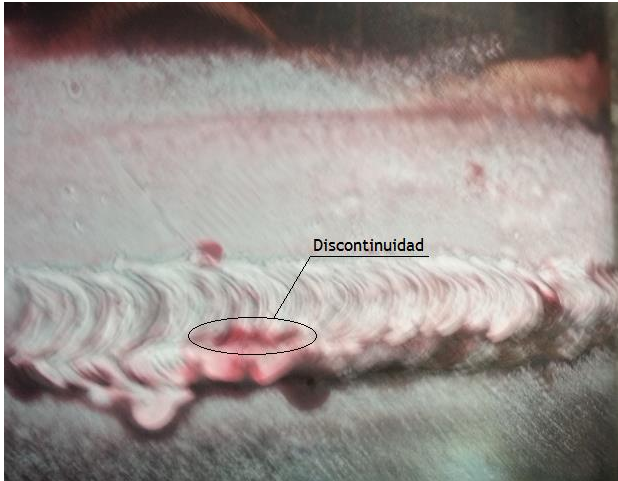
6.4. ANALISIS TINTAS PENETRANTES (PT)

El ensayo de tintas penetrantes es quizá el ensayo más utilizado en la industria, debido a sus características de tipo portátil para desarrollar el ensayo, además de ser desarrollado en materiales tanto magnéticos como no magnéticos, aunque solo es utilizado en materiales no porosos, la sensibilidad de las tintas proporciona una gran utilidad para piezas que varían en su forma y tamaño al ser evaluadas bajo este método. Se realiza para descubrir discontinuidades abiertas a la superficie y se fundamenta en el principio de capilaridad. La falta de fusión no es una discontinuidad que se caracterice por ser superficial, sin embargo en algunos casos puede ser encontrada.

A continuación veremos algunos casos donde apareció la discontinuidad de falta de fusión superficial en el tubo de acero al carbono.

La figura muestra la discontinuidad de falta de fusión entre pasadas; el líquido revelador genera una línea continua de color rojo, sobresaliendo del tono blanco que hay sobre la pieza. Se aprecia como la discontinuidad es de tipo alargada y plana.

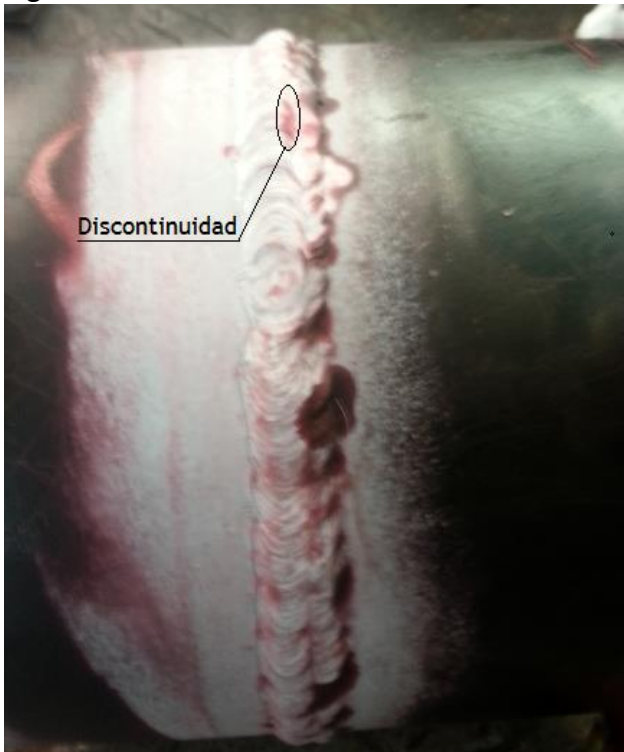
Figura 93 Discontinuidad revelada 1



Fuente: autor

Se revela la discontinuidad de falta de fusión, su forma es alargada, de tipo planar y angosta.

Figura 94 Discontinuidad revelada 2



Fuente: autor

En la imagen 93 y 94 se evidencian otras indicaciones pero éstas no concuerdan con la geometría de la falta de fusión y no son consideradas como relevantes.

6.5. PROCEDIMIENTO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT)

El ensayo de partículas magnéticas se realizó para inspeccionar las discontinuidades abiertas a la superficie o sub superficiales. La inspección se realizó de manera inmediata al realizar el ensayo sin requerir un gran entrenamiento del funcionamiento del equipo que fue manejado por personal de west arco.

6.5.1. Materiales y equipo

Como es común y necesario, los elementos de limpieza siempre estuvieron presentes. Es importante realizar limpieza para evitar que la inspección arroje falsas indicaciones, y además prepara la probeta para el ensayo. El equipo consta de un yugo, que generó un campo magnético en la probeta que se empolvó previamente con partículas magnéticas secas que se acumularon en las discontinuidades y generaron una indicación visual.

6.5.1.1. Elementos de limpieza

- Grata metálica
- Guantes de nitrilo
- Retal de tela

La limpieza antes de iniciar cada ensayo siempre fue importante. En un ensayo superficial como este, la suciedad o pequeñas impurezas pueden interferir y distorsionar el examen visual y es por este motivo que la limpieza se realizó apropiadamente.

6.5.1.2. Yugo

Fabricado con una bobina eléctrica que está unida a un par de piezas de acero ferromagnético, el yugo, produjo un campo magnético fuerte sobre la pieza de manera indirecta, debido a que el campo está elevado sobre la pieza, en la bobina. El yugo trabaja de dos formas: corriente alterna y directa, sin embargo y para efectos del ensayo realizado se trabajó en modo de corriente directa.

Figura 95 Yugo



Fuente: Autor

6.5.1.3. Partículas magnéticas secas

Las partículas magnéticas secas son visibles de color rojo; para el riego sobre la probeta se utilizó un soplador de polvo.

Figura 96 Soplador de polvo de partículas magnéticas



Fuente: Autor

6.5.2. Desmagnetización de la probeta

Debido a que el ensayo consta de generar un campo magnético a través de la probeta, el paso inicial realizado fue desmagnetizar dicha probeta con el fin de evitar que se acumularan las partículas magnéticas en sentido aleatorio por alguna magnetización previa que se desconozca.

El yugo se ubicó en algún punto sobre la probeta, posteriormente fue girado 180° sobre su mismo eje y de nuevo fue puesto en contacto con la probeta, esta operación se repitió 3 veces en distintos puntos de la probeta tratando de abarcar toda su área.

6.5.3. Limpieza de la probeta

Antes de realizar el ensayo, se le hizo una limpieza a la probeta, tanto en el cordón de soldadura como en la zona adyacente, aproximadamente entre 2 y 3 cm desde el cordón hacia el extremo de la probeta. Se utilizó la grata metálica para remover óxido y posteriormente se limpió con el retal de tela.

6.5.4. Riego de las partículas sobre la probeta

Se utiliza un soplador de polvo para realizar el riego uniforme sobre la superficie de la probeta; lo importante fue lograr que se esparcieran tanto en el cordón de soldadura como en las zonas periféricas del cordón.

Figura 97 Partículas magnéticas



Fuente: Autor

6.5.5. Magnetización de la probeta

6.5.5.1. Selección de corriente

A través del yugo se logra una magnetización indirecta sobre la probeta; la corriente seleccionada fue corriente directa, seleccionada con la simple interacción de un switch ubicado sobre el yugo. El campo magnético indirecto genera un fuerte campo magnético sobre el material y hace que se evidencien mejor las discontinuidades.

6.5.5.2. Generación del campo magnético sobre la probeta

El yugo se ubicó sobre la pieza sin que éste se haya encendido; una vez puesto el yugo perpendicularmente sobre el cordón de soldadura se enciende, y con pequeños movimientos en semicírculos del yugo se genera el campo magnético.

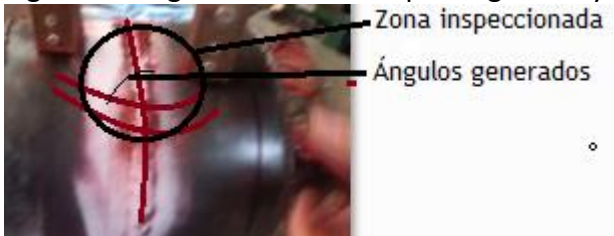
Figura 98 Movimiento del yugo



Fuente: Autor

La razón por la que se realizaron los movimientos del yugo se debe a que estos movimientos generan varios ángulos de ataque entre el cordón de soldadura y el campo magnético generado; así conseguimos una mejor agrupación de las partículas sobre las discontinuidades en la superficie.

Figura 99 Ángulos entre el campo magnético y cordón



Fuente: Autor

Los ángulos deben estar entre 20° y 90° , y así pudimos establecer un buen procedimiento para el ensayo de partículas magnéticas.

6.5.6. Inspección visual

La inspección visual se realiza inmediatamente después de haber generado el campo magnético en la pieza, una de las grandes ventajas que suministra este ensayo.

Figura 100 Discontinuidad de falta de fusión



Fuente: Autor

Las discontinuidades superficiales de falta de fusión quedan en evidencia una vez realizado el procedimiento del ensayo de partículas magnéticas.

6.6. ANALISIS PARTICULAS MAGNETICAS (MT)

Es un ensayo no destructivo que se realiza en materiales ferromagnéticos y revela discontinuidades superficiales y cercanas a la superficie. El resultado fue instantáneo y el más rápido obtenido durante la realización de los ensayos. El ensayo además no generó ningún riesgo para la salud del operador. En el ensayo, resulta difícil identificar con claridad la falta fusión.

Figura 101 Inspección partículas magnéticas



Fuente: autor

Se revela una discontinuidad de tipo plana y alargada, características de falta de fusión.

Figura 102 Inspección ampliada



Fuente: autor

El ensayo de partículas magnéticas no resultó relevante a la hora de descubrir la discontinuidad de falta de fusión, generó cierta distorsión en la inspección y con dificultad se encontró la discontinuidad.

6.7. PROCEDIMIENTO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL (RT)

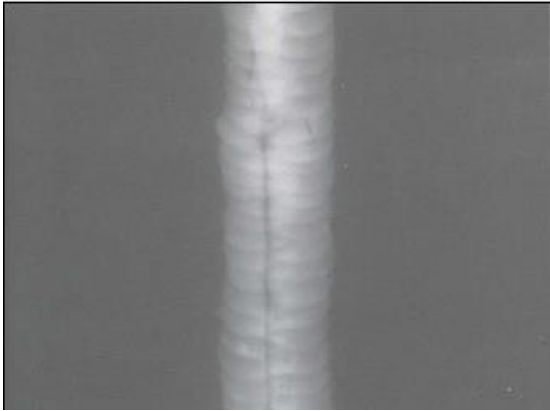
El ensayo, que es un ensayo no destructivo volumétrico, registró la estructura interna de la probeta detectando las discontinuidades que se encontraban al interior y dejando un registro con la forma definida del hallazgo.

El equipo es sumamente costoso, y el personal que realizó el ensayo está altamente entrenado y calificado debido al riesgo radiológico al que se está expuesto el cuerpo humano en el momento de la realización del ensayo.

6.7.1. Registro de imágenes

Se le asignó la tarea de la realización del ensayo a la empresa GQM ingeniería, quienes entregaron el siguiente registro.

Figura 103 Radiografía de falta de fusión



Fuente: Material de estudio GQM ingeniería sas

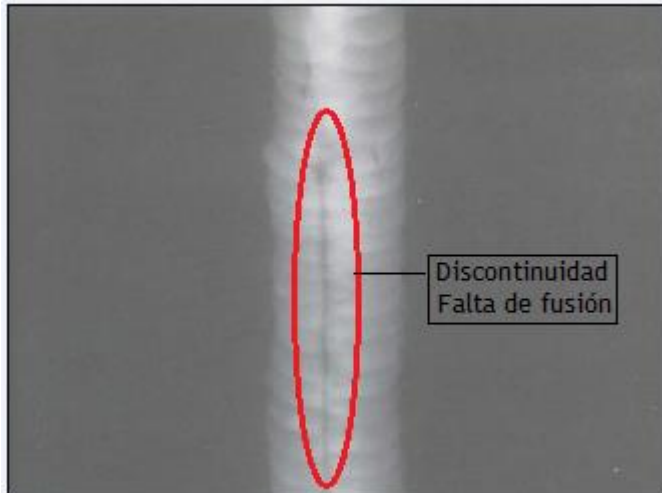
Las condiciones de seguridad del laboratorio y del ensayo no permitieron el ingreso para presenciar el ensayo, fue considerado un riesgo para la salud estar allí, y solo personal autorizado, capacitado y de la empresa GQM Ingeniería SAS estuvo presente en la realización del ensayo.

6.8. ANALISIS RADIOGRAFÍA

La discontinuidad de falta de fusión en la inspección por el método de ensayo no destructivo radiográfico tuvo complicaciones debido al riesgo generado para la salud humana durante la inspección.

El volumen de discontinuidad es pequeño, alargado y delgado, sin embargo, la discontinuidad se hizo visible a la radiografía; esta discontinuidad estuvo alineada y paralela al camino radiográfico, y se pudo ver como una línea densa y oscura.

Figura 104 Inspección radiografía



Fuente: Material de estudio. GQM INGENIERÍA SAS

Se muestra una junta soldada a tope en V sencilla, de acero ASTM A36, allí aparece la falta de fusión en la raíz, notoriamente se pudo visualizar una línea más oscura y densa que sobresale en el centro de la soldadura.

7 ANÁLISIS

El análisis del documento se realizó a partir de los registros obtenidos en los ensayos no destructivos, los resultados fueron satisfactorios según lo esperado.

7.1. DOCUMENTO WPS

La inspección a través de los ensayos no destructivos ha dejado en evidencia que la discontinuidad de falta de fusión sí se generó durante el proceso de soldadura, observándose en tres partes distintas:

- Superficial
- Raíz
- Interna en el bisel

El documento WPS estableció 4 variables imperativas. Estas variables se redactaron de tal forma que inducían a un mal proceso de soldadura:

- Técnica de soldeo
- Preparación inadecuada del material
- Diseño inadecuado de la junta
- Calor insuficiente

El análisis que resulta con base al inapropiado manejo que se le asignó a las 4 variables es que éstas indujeron a la aparición de la discontinuidad de falta de fusión. En la sección 5.4 del marco experimental N°5, se dejó en evidencia que las variables no se exigieron llevar a un nivel crítico de error, sino por el contrario fueron llevándose progresiva y simultáneamente.

El documento WPS se realizó con el objetivo de inducir la aparición de una discontinuidad durante el proceso de soldadura. Viendo los resultados, se pudo constatar que el documento en mención, sí cumplió debidamente con el objetivo de direccionar al soldador para que éste realizara una soldadura con la inclusión de la discontinuidad de falta de fusión durante el proceso de soldeo.

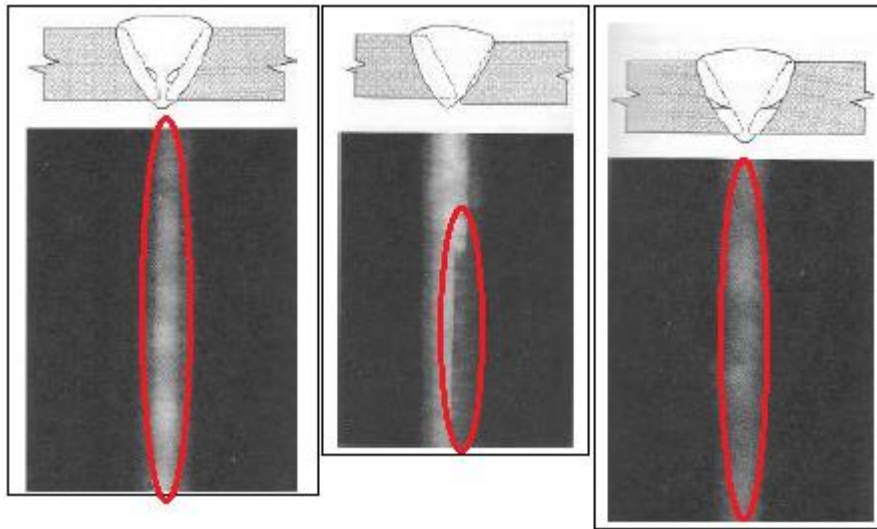
Es importante resaltar que el éxito del objeto de análisis de este proyecto, radicó en la escritura de un documento WPS inapropiado para la realización de un buen proceso de soldadura que generó errores y malas prácticas, creado con propósito únicamente investigativo; en ningún momento fue descrito como documento base para la realización de futuros procesos de soldadura.

7.2. FALTA DE FUSIÓN

La falta de fusión se representa gráficamente como una discontinuidad filosa y alargada [7]. Las discontinuidades pueden presentarse en la superficie, en la raíz del bisel y en la estructura interna del bisel.

Las figuras 8, 9 y 10 revelan la característica fundamental de la falta de fusión, discontinuidad filosa y alargada.

Figura 105 Casos de falta de fusión



Fuente: ING. Ricardo Echeverría. DEFECTOLOGÍA [11]

La figura 105 proporciona un resumen de las imágenes de la discontinuidad de falta de fusión, la semejanza en las imágenes se hace evidente con un patrón alargado, delgado y rectilíneo, describe una trayectoria en una sola dirección y no genera agrupación de ningún tipo y el tono de color se mantiene similar durante todo el recorrido de la discontinuidad.

La figura 62, da una imagen transversal del bisel de soldadura, en ésta figura se evidencia una discontinuidad delgada, la vemos como un punto desde la perspectiva transversal y se encuentra sobre el bisel de la junta. Cuando agregamos la figura 61 al análisis, ésta indica, según el reflejo de haz de energía, que en efecto es una discontinuidad delgada, detectada por el ángulo 62 del barrido sectorial. La figura 75 complementa el análisis, encontrándose una gráfica que muestra todo el barrido que realiza el ensayo en el bisel de la probeta y el ángulo 62 que ubica la discontinuidad con un alto nivel de criticidad mostrada por el color rojo intenso del haz reflejado casi en toda su totalidad de energía. Con el análisis de las tres figuras, podemos concluir que en efecto, la discontinuidad es

delgada, ubicada en el costado del bisel, sin embargo necesitamos estar seguros que es alargada y no un simple punto que revela otra discontinuidad que no es falta de fusión.

La figura 85 grafica la discontinuidad encontrada en la vista superior, allí conocemos la discontinuidad en su totalidad, y podemos concluir que es una discontinuidad delgada, alargada, que describe una trayectoria rectilínea y no genera agrupación, características teóricas de la discontinuidad de falta de fusión, de tal forma podemos decir que hemos encontrado la falta de fusión en la probeta.

El patrón rectilíneo, alargado y delgado se ha encontrado en todas las tomas realizadas a través del ensayo no destructivo de ultrasonido phased array.

El mismo patrón se ha encontrado en las figuras 92 y 100, que corresponden a los ensayos de tintas penetrantes y partículas magnéticas, en ellas se evidencia el patrón encontrado en el ensayo de ultrasonido, transcribe un recorrido alargado y delgado, paralelo al cordón de soldadura, sin agrupaciones. De esta forma y como la inspección se realiza de forma visual, podemos concluir que el patrón se asimila a las gráficas hechas por el ensayo de ultrasonido, es decir que hemos encontrado a través de tintas penetrantes y partículas magnéticas la discontinuidad de falta de fusión en la probeta.

La figura 104 muestra el mismo patrón que el encontrado en los ensayos anteriores, a través de la radiografía mostrando la estructura interna del cordón de soldadura, se muestra una discontinuidad delgada y alargada, recorre una longitud de forma recta, evidenciando el mismo patrón encontrado en los ensayos anteriores, es decir, la discontinuidad de falta de fusión se encuentra en la raíz.

Así pues se ha encontrado en todos los ensayos no destructivos, el mismo patrón de la discontinuidad, concluyendo que es la discontinuidad de falta de fusión.

7.3. PROCESO DE SOLDADURA

El registro evaluado de los ensayos no destructivos indicó falta de fusión en el cordón de soldadura de la probeta y la discontinuidad apareció en tres sectores del cordón. Se analizó que las variables tales como: técnica de soldeo, preparación inadecuada del material, diseño inadecuado de la junta, y calor insuficiente, son variables que están presentes en los tres puntos donde se encontró la discontinuidad falta de fusión.

Teóricamente, la falta de fusión es producida por la mala técnica en la aplicación de la soldadura, preparación inadecuada del material base o mal diseño de la junta. Dentro de las deficiencias que causan la falta de fusión, se destacan el insuficiente aporte de calor a la soldadura, falta de acceso a todas las partes de fusión o ambas. [7]

A partir del concepto teórico de la generación de la falta de fusión, se creó el documento WPS específico para propiciar la discontinuidad, allí se especificaron 4 variables que debían ser manejadas simultáneamente para inducir a la aparición de la falta de fusión en el cordón de soldadura de la probeta.

En la sección 8.2 se estableció que en efecto si se generó la discontinuidad de falta de fusión y que fue encontrada en 3 diferentes lugares del cordón de soldadura; superficialmente, interna sobre el costado del bisel y en la raíz del bisel.

La mala técnica de soldeo se ha propiciado interfiriendo en la utilización de una sola técnica durante el proceso de soldadura, se le ha ordenado al soldador, a través del wps, que utilice dos técnicas de soldadura durante la realización del cordón como lo indica la figura 41, de esta manera se indujo a la aparición de la discontinuidad de falta de fusión.

De igual forma, la figura 42, que representa el procedimiento de soldadura del wps manifiesta que el soldador debe incrementar proporcionalmente la velocidad de soldeo en cada pasada de soldadura. Esto se produjo implementando una marca durante el recorrido de la soldadura como se explicó en la sección 5.5 del capítulo Marco Experimental. A través de esta combinación de guías para el soldador, se estableció la manipulación y control de una mala técnica de soldeo para la incorporación de la falta de fusión en la soldadura de la probeta.

La variable de mala preparación de la probeta se manejó de manera mecánica, a través de una deficiente limpieza con grata metálica como se explica en la sección 5.5 del Marco Experimental sin embargo, no se realizó limpieza de polvo para la raíz del bisel.

La junta se ha diseñado de manera que el electrodo tuviera dificultad al momento de depositar material en la raíz, así lo manifiesta la figura 44.

Finalmente, el aporte de calor se hace con amperaje mínimos recomendados por el fabricante de los electrodos, tal y como se evidencia en las figuras 45 y 46.

Las 4 variables, son las que teóricamente producen la discontinuidad de falta de fusión, y fueron las únicas variables que se indujeron al error, variables como tipo de corriente y polaridad fueron realizadas acorde al manual del fabricante, y de acuerdo al anexo 1 y 2.

No hubo precalentamiento ni post calentamiento, la probeta se soldó con temperatura ambiente. Los rangos con los que se manejaron las variables no se alteraron en grandes proporciones.

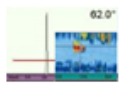
No se pudo concluir cuál variable afectó más o menos la aparición de la discontinuidad; lo que fue seguro es que las 4 variables manejadas inapropiada y simultáneamente, sí afectaron la soldadura y sí indujeron a la aparición de la discontinuidad de falta de fusión.

La discontinuidad de falta de fusión se encontró en tres puntos sobre el perfil de la junta; sin embargo no se repitieron sobre el cordón de la soldadura. Esto se debió a que las 4 variables que se manejaron inapropiadamente no se llevaron a niveles críticos. Era contraproducente llevarlas a tales niveles porque podrían generar otras discontinuidades que disminuirían la claridad y la efectividad del estudio exclusivo de la falta de fusión e inclusive podrían dejar al cordón de soldadura inapropiado para la realización misma de los ensayos.

7.4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos han encontrado la discontinuidad de falta de fusión en diferente ubicación sobre el perfil de la junta, sin embargo fue posible decidir qué método fue más efectivo para evaluar la discontinuidad.

Tabla 6 Análisis de ensayos

Ensayo	Ubicación discontinuidad	Sensibilidad en la detección	Retroalimentación			Tiempo para evaluar	Equipo utilizado	Competencia de estudios técnicos
			Forma	Tamaño	Ubicación			
Ultrasonido UTPA	Interna	Muy alta				Medio	Complejo	Alta
Tintas Penetrantes PT	Superficial	Alta		visual	Visual	Bajo	Muy simple	Media
Partículas magnéticas MT	Superficial	Alta		visual	Visual	Inmediato	Simple	Baja
Radiografía Industrial RT	Raiz	Baja			Previa inspección	Alto	Muy complejo	Muy alta

Fuente: Autor

De acuerdo a la tabla 6, el ensayo más eficiente fue el de ultrasonido. Entrega una compleja retroalimentación de la discontinuidad detectada: forma, tamaño y ubicación; además es una discontinuidad que se encuentra internamente en la probeta y no se pudo encontrar con ningún otro ensayo. La sensibilidad es muy alta y fue posible hacer el ensayo en todo el recorrido del cordón en un buen tiempo, aunque el equipo utilizado es complejo y el personal que realiza el ensayo debe ser altamente calificado, los registros del ensayo así lo requieren.

La discontinuidad de falta de fusión se describe como una discontinuidad de tipo planar alargada con tendencia a seguir una trayectoria en línea recta; esta forma característica se encontró en todos los ensayos. El ensayo de ultrasonido aportó una característica más de detección; el haz que descubre la discontinuidad, como lo grafica la figura 61 refleja una energía altísima en un corto periodo de espacio.

Las discontinuidades se encontraron en tres lugares diferentes, superficie, interno y raíz. Por éste motivo los ensayos deben ser también ubicados y establecidos para cada zona de inspección útil en la probeta.

Los ensayos superficiales son los de tintas penetrantes y partículas magnéticas, éstos no pueden registrar discontinuidades internas. Estos ensayos a su vez, proporcionan una visualización directa de la discontinuidad y el resultado puede ser obtenido directamente de manera visual en campo en un breve periodo de tiempo.

El ensayo de radiografía y el de ultrasonido, son ensayos para evaluar la soldadura de manera interna, éstos no pueden ser utilizados a manera de inspección superficial ya que no habría gráfica resultante sin embargo, la relación entre ellos se deriva en que ambos son ensayos volumétricos y proporcionan una gráfica interna del material a inspeccionar, el ensayo de ultrasonido, brinda una retroalimentación desde diferentes vistas del cordón de soldadura y genera la ubicación exacta de donde se encuentra la discontinuidad. El ensayo de radiografía proporciona una visión de la longitud de la discontinuidad en una sola vista, la superior.

Entonces tenemos dos tipos de ensayos, volumétricos y visuales, pese a que todos cuatro son ensayos no destructivos, los visuales tienen más similitudes que los volumétricos, los ensayos no destructivos volumétricos no generan las mismas gráficas y en su mayoría no pueden ser utilizados para evaluar la misma área del cordón de soldadura.

El ultrasonido no puede inspeccionar la raíz debido a que su mayor destreza radica en la proyección de rebote del haz de energía así como lo muestra la figura 16. Entonces pierde eficiencia porque no encuentra rebote y a su vez el ensayo de radiografía es menos preciso para la detección de la discontinuidad de falta de fusión sobre los bordes del bisel.

De tal manera que para cada ubicación en donde esté presente la discontinuidad de falta de fusión, existe un ensayo no destructivo preciso para la detección de la misma y es por eso que la utilización en conjunto de los 4 ensayos no destructivos generó una excelente inspección de la probeta.

8 CONCLUSIONES

- Se resalta la importancia de generar el WPS para realizar un proceso de soldadura SMAW deseado, este documento WPS debe escribirse de tal forma que se establezca el objetivo de la soldadura.
- Las cuatro variables críticas como; calor insuficiente, mal diseño de la junta, preparación inadecuada de la junta y una mala técnica de soldeo, las cuales se manipularon simultáneamente durante el proceso de soldadura generan al menos una discontinuidad en la raíz, en la superficie y en el interior de la junta. El soldador altamente capacitado siguió a cabalidad el proceso de soldeo que planteaba el documento WPS, de ahí se resalta de que en la industria, los soldadores sean capacitados para obtener la soldadura propuesta en el documento WPS.
- La discontinuidad de falta de fusión se encontró en lugares diferentes de la probeta, cada ensayo encontró la discontinuidad en un lugar específico dentro del perfil de la junta; ningún ensayo encontró la discontinuidad de falta de fusión en diferentes sitios de la junta soldada.
- La utilización de tintas penetrantes, genera una mejor visualización de la discontinuidad a la generada por la aplicación de partículas magnéticas, sin embargo ambos ensayos describen una discontinuidad con una trayectoria sobre el costado del cordón de soldadura de tipo planar y alargada. Estos ensayos aplican solo para discontinuidades abiertas a la superficie.
- El ensayo no destructivo de ultrasonido phased array, aporta información completa para una discontinuidad interna. Es un ensayo con gran sensibilidad y muy eficiente, sin embargo no se aplica para discontinuidades abiertas a la superficie.
- El ensayo de ultrasonido phased array muestra la discontinuidad de falta de fusión con una característica resaltante que hace fácil encontrar la discontinuidad en futuras inspecciones. Una gráfica inconfundible de un pico en extremo alto con índice de energía reflejada que oscila entre el 80% y el 90%, la curva se realiza en una corta longitud.
- Las variables críticas controladas durante el proceso de soldadura generan la aparición de la discontinuidad de falta de fusión en un proceso SMAW.
- No es posible establecer el mejor ensayo para detectar la falta de fusión en una soldadura, porque la discontinuidad aparece en diferentes lugares del perfil de la junta y ningún ensayo revela la discontinuidad en dos lugares diferentes; por lo tanto, para cada lugar en donde se encuentra la discontinuidad existe el ensayo no destructivo apropiado para la detección.
- Existe un ensayo que cuando encuentra la discontinuidad, la describe de la mejor manera, el ensayo phase array, es quien mejor describe la discontinuidad que encuentra, ofrece una gráfica detallada de la discontinuidad, posición, espesor

longitud y forma de la misma, así como establece en detalle a través de la energía reflejada un patrón de picos agudos generados por la falta de fusión.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] David Mazuera Robledo*, John Alberto Suárez Gómez, Jorge Enrique, Giraldo Barrada. (Junio, 2010). Estudio de productividad en la soldadura del acero MIL A 461000 con los procesos GMAW Y SMAW. Revista Facultad de Ingeniería Universidad Antioquia. Colombia.
- [2] Normativa ASNT (American Society of Nondestructive Testing) ASNT SNT-TC-1ª . (2012)
- [3] Manual de soldadura WEST ARCO. Primera edición 2012
- [4] Ing. Carlos Eliseo Flores. (Diciembre, 2010) Soldadura al arco eléctrico SMAW. Revista Facultad de ingeniería Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- [5] Catálogo de productos Lincoln electric. Venezuela.
- [6] Normativa AWS (American Welding Society) D1.1. Código de Soldadura en estructuras. (2010)
- [7] NORMA API 1104. (1999)
- [8] AWS 3.0 (Definiciones y términos en soldadura) (2013)
- [9] Ing. Antonio Fabio O. (Julio, 2010) Soldadura por arco eléctrico SMAW. Recuperado <https://adnervillarroel.wordpress.com>
- [10] José Antonio Merino Sierra. (2002) Aplicación de ultrasonido C-SCAN acoplamiento de aire para la inspección de estructuras sándwich de material compuesto. Tesis pregrado. Universidad Carlos III. Madrid.
- [11] Ing. Ricardo Echeverría. Facultad de ingeniería. (2002). Defectología. Universidad de Comahue. Argentina.
- [12] Ing. Samuel Rosario Francia, Ing. Adalberto Ruiz LL. (Octubre, 2013). Imperfecciones en soldadura tipos de discontinuidades. Recuperado <https://metfusion.wordpress.com>
- [13] Alejandro Francisco Santos Villacrés. (Julio, 2012). DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD DE LA SOLDADURA CON EL USO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN PUENTES METALICOS UTILIZANDO LA NORMA AWS D1.5E. Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional. QUITO. Ecuador.
- [14] ASME SECCIÓN V. (2007)
- [15] NORMA PARA LA CERTIFICACIÓN DE INSPECTORES DE SOLDADURA DE LA AWS. (2010)
- [16] Ing. Marco Antonio Pardo C. ASNT NDT NIVEL III. MEMORIAS NIVEL II ULTRASONIDO.
- [17] Cristina Rodríguez Gonzales. (2012). Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonido. TESIS DOCTORAL. Universidad de Cantabria. España.
- [18] Norma ASTM E165-94. (2013)
- [19] Ing. Ricardo Echeverría. (2003). Líquidos penetrantes. Facultad de ingeniería. Universidad de Comahue. Argentina.

- [20] Juan Manuel Lesmes (2014) Industria metalmecánica. Revista A. Recuperado <http://www.andi.com.co/Rev/Paginas/Edicion-247.aspx>
- [21]. Joe Silva (2013) 700 empresas de la construcción en Colombia. Revista en Obra. Recuperado http://en-obra.com/digitales/index/Digitales_page/2

ANEXO N°1
SOLDADURAS WEST ARCO
ELECTRODO E6013

SW 613



ELECTRODOS PARA SOLDAR ACEROS AL CARBONO

IDENTIFICACIÓN : WEST ARCO E6013
CLASIFICACIÓN : AWS E6013
ESPECIFICACIÓN : AWS A.5.1, ICONTEC 2191, ASME SFA 5.1
APROBADO : ABS (Grado 1)

CARACTERÍSTICAS SOBRESALIENTES

El revestimiento es a base de rutilo y potasio, lo cual le da muy buena estabilidad, inclusive al trabajar con corriente alterna en equipos de bajo voltaje de circuito abierto.

APLICACIONES TÍPICAS

Carrocerías, muebles metálicos, ductos de aire acondicionado, rejas, ventanas y ornamentación en general. Puede usarse en tanques y estructuras teniendo en cuenta las limitaciones establecidas en los códigos de construcción aplicables.

RECOMENDACIONES PARA SU APLICACIÓN

Se utiliza en corriente alterna o continua, polaridad negativa (-) o positiva (+). Lleve el arco corto y una velocidad de avance adecuada al tipo de junta y al diámetro que emplee. Al soldar en filete horizontal mantega el electrodo con un ángulo de elevación de 50 a 70° con relación a la platina inferior y una inclinación de 10 a 20° en la dirección de avance. Entre mas delgada la platina y mayor corriente, se debe usar un ángulo de elevación mayor para evitar recalentamiento de la platina vertical.

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS DEL METAL DEPOSITADO

Resistencia a la tracción:	42 - 52Kg/mm ² (60 - 74 Ksi)
Límite de fluencia:	34 - 45Kg/mm ² (48 - 65 Ksi)
Elongación:	22 - 29%
Resistencia al Impacto Charpy en Va -20°C:	50 - 110 joules.

NOTA: Ensayos realizados según AWS A.5.1

DIMENSIÓN	AMPERAJES RECOMENDADOS
2.4 X 300 mm (3/32")	50 - 90 A
2.4 X 350 mm (3/32")	50 - 90 A
3.2 X 350 mm (1/8")	80 - 120 A
4.0 X 350 mm (5/32")	110 - 160 A
4.8 X 450 mm (3/16")	130 - 210 A
6.4 X 450 mm (1/4")	200 - 300 A

EMPAQUE: Caja de 20 Kg peso neto.

Ver recomendaciones de almacenamiento al final del catálogo.

ANEXO N°2
SOLDADURAS WEST ARCO
ELECTRODO E7018

WIZ 18 S



ELECTRODOS PARA SOLDAR ACEROS AL CARBONO

IDENTIFICACIÓN	WESTARCO E7018 S
CLASIFICACIÓN	AWS E7018
ESPECIFICACIÓN	AWS A.5.1, KONTEC 2191, ASME SF A.5.1
APROBADO	ABS (Grado 3H, 3Y), Lloyd's (Grado 3)

CARACTERÍSTICAS SOBRESALIENTES

El WIZ 18 S es un electrodo cuyo revestimiento es de tipo básico, bajo hidrógeno, para ser utilizado con corriente directa, polaridad positiva (+) o con corriente alterna (70 OCV mínimo). Debido al polvo de hierro, tiene una alta tasa de deposición y bajas pérdidas por salpicaduras. Su extremo de arco grafitizado le da un excelente encendido. El depósito de soldadura da una excelente calidad radiográfica.

APLICACIONES TÍPICAS

Se utiliza para soldaduras de acero al carbono de hasta 70.000 lbs/pulg² de resistencia a la tensión, en aplicaciones en estructuras, tuberías y tanques a presión, calderas, vagones de ferrocarril, etc.

RECOMENDACIONES PARA SU APLICACIÓN

Al soldar con WIZ 18 S se debe mantener un arco corto, evitando movimientos bruscos del electrodo. Al usar corriente alterna, el transformador debe tener por lo menos 78V en vacío. En posiciones diferentes a la plana deben utilizarse electrodos de 5/32" (4mm) ó de menor diámetro.

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS DEL METAL DEPOSITADO

Resistencia a la tracción:	51 - 59Kg/mm ² (72 - 84 Ksi)
Límite de fluencia:	43 - 51Kg/mm ² (62 - 72 Ksi)
Elongación:	24 - 38%
Resistencia al impacto Charpy en Va -20°C:	70 joules.

NOTA: Ensayos realizados según AWS A.5.1

COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DEL METAL DEPOSITADO

Carbono	0.05 - 0.10%	Manganeso	1.00 - 1.40%
Silicio	0.40 - 0.65%	Fósforo	0.035% máx.
Azufre	0.035% máx.		

DIMENSIÓN	AMPERAJES RECOMENDADOS
2.4 X 300 mm (3/32")	70 - 100 A
2.4 X 350 mm (3/32")	70 - 100 A
3.2 X 350 mm (1/8")	100 - 145 A
3.2 X 450 mm (1/8")	100 - 145 A
4.0 X 350 mm (5/32")	135 - 200 A
4.0 X 450 mm (5/32")	135 - 200 A
4.8 X 350 mm (3/16")	170 - 270 A
4.8 X 450 mm (3/16")	170 - 270 A
6.4 X 450 mm (1/4")	240 - 400 A

EMPAQUE: Caja de 20 Kg peso neto.

Ver recomendaciones de almacenamiento al final del catálogo.

ANEXO N°3
TINTA PENETRANTE SPOTCHECK

Spotcheck® SKL-SP2 Solvent Removable Penetrant

Spotcheck® SKL-SP2 is a solvent removable penetrant offering maximum reliability in the detection of surface-open flaws and discontinuities. Spotcheck® SKL-SP2 is a solvent removable (or post emulsifiable) red color contrast penetrant with outstanding penetrating characteristics. It offers maximum reliability in locating surface-open flaws and discontinuities and has been successfully used on non-porous ceramics and other similar materials.

MATERIAL SAFETY DATA SHEET
PRODUCT DATA SHEET
APPLICATION INSTRUCTIONS
DISTRIBUTOR LIST
LPI ACCESSORIES

Specifications Compliance:

AMS-2644, AECL, ASME B & PV Code
Sec V, ASTM E1417, MIL-STD 2132, ASTM
E165, MIL-STD-271, ISO 3452

Part Number and Container Size:

- 01-5155-35: 1 gallon (case of 4)
- 01-5155-40: 5 gallon pail
- 01-5155-45: 55 gallon drum

Available in 16 oz. aerosol cans

Applications: Welds, Forgings, Pressure Vessels, Castings, General Metal Work, Leak Testing, Power Plant, Construction.

Classification: Type 2, Method B, C or D

Temperature: SKL-SP2 should be used at temperatures between 40° F to 125° F.



ANEXO N° 4
TINTA REVELADORA SPOTCHECK

Spotcheck® SKD-S2 Non-Halogenated Solvent Developer

Spotcheck® SKD-S2 is a non-halogenated solvent developer that meets major requirements for special alloy and nuclear applications.

Spotcheck® is a ready to use suspension of white developing particles in a fast drying solvent. It produces an opaque white coating, which provides an excellent contrasting background for penetrant indications.

MATERIAL SAFETY DATA SHEET
PRODUCT DATA SHEET
APPLICATION INSTRUCTIONS
DISTRIBUTOR LIST
LPI ACCESSORIES

Specifications Compliance:

AMS 2644, MIL-STD-271, MIL-STD-2132, AECL, ASME B & PV Code, Section V, Boeing PS-21202, AMS 2647, ASTM E1417, ASTM E165, NAVSEA 250-1500-1, Boeing BAC 5423, PSD 6-46 or 8-4, GE P50YP107, ISO 3452

Part Number and Container Size:

- 01-5352-35: 1 gallon (case of 4)
- 01-5352-40: 5 gallon pail
- 01-5352-45: 55 gallon drum
- Also available in 16 oz. aerosol cans

Applications: Developer for Liquid Penetrant Inspection process.

Classification: Form d Non-aqueous Type 1 Fluorescent (solvent based). Form e Non-aqueous Type 2 Visible Dye (solvent based).



ANEXO 5
TINTA LIMPIADORA SPOTCHECK

Spotcheck® SKC-S

Spotcheck® SKC-S is a non-halogenated material used in the penetrant inspection process.

Spotcheck® SKC-S is a non-halogenated material used in the liquid penetrant inspection process. SKC-S is used on a moist cloth to remove surface penetrant from the inspection area prior to applying developer.

MATERIAL SAFETY DATA SHEET
PRODUCT DATA SHEET
APPLICATION INSTRUCTIONS
DISTRIBUTOR LIST
LPI ACCESSORIES

Specifications Compliance:

AMS-2644; MIL-STD-271; MIL-STD-2132; AECL; ASTM E 165; ASTM E 1417; ASME B&PV Code, Section V; NAVSEA 250-1500-1; Boeing BAC 5423 PSD 6-46 or 8-4; General Electric P50YP107; Boeing PS-21202, ISO 3452

Part Number and Container Size:

- 01-5750-35: 1 gallon (case of 4)
- 01-5750-40: 5 gallon pail
- 01-5750-45: 55 gallon drum
- Available in 16 oz. aerosol cans

Applications: SKC-S is used to remove excess surface penetrant from the inspection area prior to applying developer.

Classification: Class 2

Temperature: 40°F to 125°F



ANEXO N° 6
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS SECAS

1 GRIS / 2 AMARILLO / 3A NEGRO / 8A ROJO PARTÍCULAS MAGNÉTICAS NO FLUORESCENTES MÉTODO SECO

Descripción general:

Los polvos magnéticos MAGNAFLUX #1 Gris, #2 Amarillo, #3A Negro y #8A Rojo están listos para usarse, son de libre flujo para uso general, método seco, de contraste de color. Estos polvos se usan para localizar discontinuidades en la superficie y ligeramente por debajo de la superficie en estructuras ferrosas.

El #1 Gris es un polvo gris o casi blanco que produce indicaciones bien definidas de contraste de color sobre fondos oscuros.

El #2 Amarillo es un polvo amarillo pálido ideal para superficies oscuras.

El #3 Negro es un polvo negro azulado ideal para producir indicaciones bien definidas sobre superficies pulidas con chorro de arena (sandblastado) o granallado sobre fondos claros.

El #8A Rojo es un polvo cuyo color proporciona un fuerte contraste sobre la mayoría de las superficies y fondos con color.

Composición:

Los polvos magnéticos secos se componen de polvos magnéticos y pigmentos selectos.

Aplicación:

Algunas de las aplicaciones más usuales incluyen, soldaduras, grandes piezas forjadas y coladas y en aquellos lugares con superficie áspera.

Propiedades típicas (no es una especificación):

	#1 Gris	#2 Amarillo	#3 Negro	#8A Rojo
Dimensión de partículas (promedio)	180 micras	180 micras	180 micras	180 micras
Sensibilidad relativa SAE	8	8	8	8
Límite superior de temperatura*	750 °F 399 °C	500 °F 280 °C	600 °F 316 °C	600 °F 316 °C

*Los límites en la temperatura no significan que el material no formará indicaciones de partículas magnéticas arriba de las temperaturas especificadas. Sin embargo, las partículas sometidas a altas temperaturas durante un cierto tiempo pueden alterar su color, sinterizarse o despedir humo. Las partículas calentadas a 900 °F (482 °C) o que pasen por una flama pueden arder sin flama o producir chispas.

MAGNAFLUX

A Division of Illinois Tool Works Inc.
3624 WEST LAKE AVENUE ■ GLENVIEW, ILLINOIS 60026
TEL 847.657.5300 ■ FAX 847.657.5388
www.magnaflux.com

ANEXO N°7
YUGO AC/DC MAGNAFLUX

MAGNAVIS® MAGNETIC YOKES

Magnavis® Y-7 AC/DC Magnetic Particle Inspection Yoke

The Magnavis7 Y-7 AC/DC Magnetic Particle Yoke is designed for one-person portable magnetic particle inspections of ferrous parts. Ideal for inspection of welds and other remote testing. Articulating, double-jointed legs of yokes contour to any part shape to assure good contact.

[quick links](#)

MAGNAVIS PRODUCTS
DISTRIBUTOR LIST

Y-7 Core Benefits:

- Used to find both surface and near-surface discontinuities
- Articulating, double-jointed legs contour to part's shape for superior contact
- Solid state controls located in the yoke's housing for maximum safety and reliability



Y-7 Yoke Part Numbers:

- 43550: 115V - 50/60Hz
- 43560: 230V - 50/60Hz

Y-7 Yoke Kit Part Numbers:

- 43509: 115/60Hz Kit
- 620741: 230V/50-60Hz

Y-7 Yoke Kit Includes:

Y-7 AC/DC Yoke, 1 lb. of #1 Gray, 1 lb. of #8A Red Powder, Portable Carrying Case, Paint Marker, SCRUBS™ Hand Cleaner, Powder Spray Bulb and Kit Instructions.



General Specifications	Y-7 AC/DC Yoke
Weight	115V - 7.4 lbs 230V - 7.2 lbs
Leg Span	0" - 12"
Current Type	115V/60Hz or 230V/50-60Hz
Cord Length	12 feet
Warranty	1 year

ANEXO N° 8
EQUIPO DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY OMNISCAN MX2

Especificaciones del OmniScan MX2*

Especificaciones de la estructura principal del OmniScan MX2	
Dimensiones globales (A x A x D)	325 mm x 235 mm x 130 mm
Peso	3,2 kg, sin módulo y con una batería
Almacenamiento de datos	
Dispositivos de almacenamiento	Tarjeta de memoria SD de alta capacidad, dispositivos de almacenamiento USB de serie en gran parte, o cable Ethernet de alta velocidad y opcional
Tamaño de archivos de datos	300 MB
Puertos de E/S	
Puerto USB	3
Alarma acústica	Si
Salida de video	Salida de video (SVGA)
Ethernet	10/100 Mbps
Línea de comunicación de E/S	
Codificador	Línea del codificador de dos ejes (cuadratura, hacia arriba/abajo o reloj/anticlock)
Entrada digital	TTL de 4 entradas digitales, 5 V
Salida digital	TTL de 4 entradas digitales, 5 V, 15 mA
Tecle de activación/ desactivación de adquisición	TTL habilitado de adquisición remota, 5 V
Línea de salida de energía	5 V, línea de salida de alimentación de 500 mA (con protección contra cortocircuitos)
Alarmas	2 TTL, 5V, 15 mA
Salida analógica	2 salidas analógicas (12 bits) de -5 V a +5 V en 10 kΩ
Entrada de sincronización	Entrada de sincronización TTL de 5 V
Pantalla	
Tamaño de pantalla	26,4 cm (10,4 pulg.) (diagonal)
Resolución	800 píxeles x 600 píxeles
Iluminación	700 cd/m²
Cantidad de colores	16 millones
Tipo	LCD de TFT
Fuente de energía	
Tipo de batería	Baterías inteligentes de iones de litio
Cantidad de baterías	1 a 2 unidades (el compartimento de batería puede albergar dos baterías sustituibles en modo caliente)
Duración de la batería	Mínimo de siete (7) horas con las dos baterías instaladas
Especificaciones ambientales	
Temperatura de funcionamiento	-10 °C a 45 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C a +60 °C con baterías incorporadas -20 °C a +70 °C sin baterías incorporadas
Humedad relativa	Máximo del 70 % de humedad relativa a 45 °C sin condensación
Grado de protección	Diseñado para cumplir los requisitos IP66
Índice de protección ante caídas	Resistencia ante caídas conforme a la norma MIL-STD-883C 516.5
Compatibilidad del módulo MX2	
MX2 4.0 y versiones superiores	OMN-M2-PA1664
	OMN-M2-PA16128
	OMN-M2-PA32128
	OMN-M2-UT-3CH
MX2 3.1	OMN-M-UT-8CH
Todas las versiones MX2	OMN-M-PA1664
	OMN-M-PA16128
	OMN-M-PA32128
	OMN-M-PA32128PR
MX2-M 3.1 y previas versiones	OMN-M-PA3232 (200 V)
	OMN-M-PA1664M

Especificaciones del módulo Phased Array	
(se aplica a los módulos OMN-M2)	
Dimensiones globales (A x A x D)	226 mm x 183 mm x 40 mm
Peso	1,6 kg
Conectores	1 conector phased array: conector PA de Olympus 2 conectores UT: LEMO 00
Cantidad de leyes focales	256
Reconocimiento de la sonda	Reconocimiento automático de la sonda
Emisor/Receptor	
Apertura	32 elementos**
Cantidad de elementos	128 elementos**
Emisor	Canales PA
Tensión	40 V, 80 V y 115 V
Ancho del impulso	Regulable de 30 ns a 500 ns; y con 2,5 ns de resolución
Forma del impulso	Onda cuadrada negativa
Impedancia de salida	<25 Ω
Receptor	Canales UT
Ganancia	0 dB a 80 dB de señal máxima de salida de 550 mVp-p (altura completa de pantalla)
Impedancia de entrada	65 Ω
Ancho de banda del sistema	0,5 MHz a 18 MHz (-3 dB)
Formación (concentración) del haz	
Tipo de escaneo	Seccional y lineal
Cantidad de grupos	Hasta 8
Adquisición de datos	
Frecuencia de digitalización	400 MHz (12 bits) después de interpolación por 4 pases
Frecuencia máxima de emisión de impulsos	Hasta 10 kHz (C-scan)
Tratamiento de datos	
Cantidad de puntos de datos	Canales PA Hasta 8192
Promedio en tiempo real	2, 4, 8, 16
Rectificador	Radiofrecuencia (RF), onda completa, media onda positiva (+), media onda negativa (-)
Filtro	tres (3) filtros de paso bajo, tres (3) de paso banda y cinco (5) de paso alto. tres (3) filtros de paso bajo, seis (6) de paso banda y tres (3) de paso alto (ocho (8) filtros de paso bajo cuando son configurados en TOFD)
Filtro de video	Sumado (ajustado a la banda de frecuencia de la sonda)
Visualización de datos	
Frecuencia de refresco de la representación A-scan	Tiempo real: 60 Hz
Sincronización de datos	
Según el reloj interno	de 1 Hz a 10 kHz
Según el codificador	Dois ejes: de 1 a 65 536 pases
Ganancia corregida en función del tiempo (TCG) programable	
Cantidad de puntos	32: curva de ganancia corregida en función del tiempo por ley focal
Alarmas	
Cantidad de alarmas	3
Condiciones	Toda combinación lógica de puertas
Salidas de alarma	2

** Las aperturas y las cantidades de elementos varían según el modelo. Los modelos vigentes para envío presentan las configuraciones 16:64, 16:128 y 32:128.