



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE OLEODUCTOS EN EL ECUADOR

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

ESTÉVEZ BUNCES ANDRÉS SANTIAGO

andres.estevez@epn.edu.ec

ROSERO MANZANO SARA JACQUELINE

sara.rosero@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS, MSc.

homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **ESTÉVEZ BUNCES ANDRÉS SANTIAGO** y **ROSERO MANZANO SARA JACQUELINE**, bajo mi supervisión.

Ing. Galo Homero Barragán Campos
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **ESTÉVEZ BUNCES ANDRÉS SANTIAGO**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Estévez Bunces Andrés Santiago

DECLARACIÓN

Yo, **ROSERO MANZANO SARA JACQUELINE**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Rosero Manzano Sara Jacqueline

DEDICATORIA

A mi madre, Nelly;

Quien supo guiarme desde pequeño por el camino del bien, fomentando en mí valores que me han servido para llegar muy lejos, además de cuidarme con ese amor incondicional de madre.

A mis abuelitos, Luz (+) y Manuel;

Quienes me vieron crecer y me cuidaron gran parte mi vida, sembrando en mí un amor y apego infinito.

Andrés S. Estévez Bunces

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia,

A mi madre Mireya

A mi abuela Aida

Por todo su amor siempre

Sara Rosero M.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, llena de alegrías y momentos no tan buenos, pero siempre con la fuerza de seguir adelante.

A mi madre Nelly por nunca dejarme desmayar y darme fuerzas en los momentos más difíciles de esta etapa de mi vida, brindándome ese apoyo incondicional y sobre todo aconsejarme siempre que debía tomar decisiones.

A mi abuelita Luz (+) que desde siempre me cuidó y protegió, y que desde alguna parte del cielo me ve orgullosa, por ver a donde he llegado.

A mi abuelito Manuel a quien he llegado amar como un padre, por apoyarme y dedicarme palabras de aliento siempre. Por estar pendiente de mí y de mi madre, velando por nuestra salud y bienestar.

A mi novia Karen Valencia por ser esa amiga incondicional, cómplice de todo, apoyándome siempre en los momentos más difíciles y compartiendo mis alegrías y locuras.

Al coro de la Escuela Politécnica Nacional, especialmente al Maestro Ramiro Analuisa gran maestro y ser humano por inculcar en mí ese apego a la música junto con mis compañeros y mi novia.

Al Ing. Homero Barragán por apoyar el desarrollo de este proyecto y siempre estar predispuesto a ayudarnos. Al Ing. Gabriel Velasteguí por brindar asesoría en las diferentes etapas del proyecto. Al Ing. Santiago Camacho, Ing. Verónica Sotomayor, René Jame, Ing. Patricia Proaño, Don Miguelito, por todo el apoyo brindado para que la etapa práctica del presente trabajo se realice de forma rápida y efectiva.

A mi compañera Sara Rosero por la dedicación y confianza para el desarrollo del presente proyecto.

Andrés S. Estévez Bunces

AGRADECIMIENTO

Siempre he pensado que cuando uno logra algo, por muy pequeño que sea nunca lo logra solo, por lo que solo puedo pensar en todas las personas que han estado presentes en este proceso, en cada risa que animó a seguir adelante y a disfrutar de la vida, en cada consejo que empujó a nunca rendirse y en cada pequeña y gran ayuda que supieron brindarme.

En primer lugar, quiero agradecer a todos mis Manzanitos y en especial a mi mamá Mireya y mi abuela Aida, por siempre darme todo su amor, porque sin ustedes no sería lo que soy.

A mis hermanas Lore y Gaby por siempre ser el amor, la luz y la diversión en mi vida.

A Nicolás, por tu paciencia, amor, por el crecimiento, la escucha y el apoyo compartidos.

Al Ingeniero Barragán por su apoyo y paciencia para el desarrollo de este Proyecto de Titulación, al Ingeniero Gabriel Velasteguí por su guía oportuna, a Jorge por el acolite siempre, a Don Rene, al Ingeniero Santiago Camacho, Ingeniero Gustavo Huilca, Ingeniera Verónica Sotomayor, Ingeniera Patricia por toda su ayuda.

Al Coro de la Escuela Politécnica Nacional, que es mi lugar favorito en la Poli, por todas las personas maravillosas que conocí ahí y por tanta música que compartimos. Al Maestro y amigo Ramiro Analuisa por enseñarme tanto.

A mi amigo Leonardo, por ser como el hermano que no tengo.

A Micha, Gabo, Diego (Enero), Belén (Loser), Cami, Lucy, Pame. Saúl, Diego, Eve; a mis queridas: Nohe, Thaly y Adri. A Mary y Sebas por todo su cariño y su apoyo, por tantas historias juntos. Todos ustedes son un regalo de la vida.

A mi compañero Andrés Estévez por la dedicación para el desarrollo del presente proyecto.

Sara Rosero M.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	xvii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos	1
Alcance.....	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Soldadura de oleoductos	3
1.2.1. Tipos de soldadura en tuberías.....	4
1.2.2. Síntesis y alcance de la Norma API 5L	4
1.2.3. Requerimientos de la Norma API 1104, para la elaboración de procedimientos.	4
1.3. Soldadura por arco	6
1.3.1. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)	7
1.3.2. Soldadura eléctrica por arco en atmósfera inerte con electrodo de tungsteno “TIG” (GTAW).....	8
1.3.3. Soldadura eléctrica con alimentación continua de electrodo tubular (FCAW).....	9
1.3.4. Combinación de procesos de soldadura	10
1.3.5. Posiciones de soldadura de tubería	11
1.4. Documentación de la soldadura industrial	11
1.4.1. Especificación del proceso de soldadura (WPS).....	11

1.4.2.	Registro de calificación de procedimiento (PQR)	11
1.4.3.	Calificación del desempeño del soldador (WPQ)	12
1.5.	Ensayos no destructivos (END).....	12
1.5.1.	Inspección visual	12
1.5.2.	Tintas penetrantes	13
1.5.3.	Radiografía.....	13
1.6.	Criterios de aceptación de discontinuidades para ensayos no destructivos	13
1.7.	Ensayos Destructivos	15
1.7.1.	Ensayo de tracción	15
1.7.2.	Ensayo de rotura con entalle	15
1.7.3.	Ensayo de doblado de cara y de raíz.....	16
1.8.	Análisis de microestructura.....	16
1.9.	Ensayo de Dureza.....	16
1.10.	Costos en Soldadura	17
1.10.1.	Materia prima y mano de obra:.....	17
1.10.2.	Costo hora de utilización de equipos y maquinaria:.....	18
1.10.3.	Costo de Consumibles	19
1.11.	Costos de Energía.....	19
1.12.	Costos Generales.....	19
2.	METODOLOGÍA.....	21
2.1.	Material Base.....	21
2.1.1.	Especificación.....	21
2.1.2.	Composición Química.....	21
2.1.3.	Propiedades Mecánicas.....	22
2.2.	Proceso de Obtención de Cupones Soldados.....	22
2.2.1.	Parámetros de Procesos de Soldadura	22
2.2.2.	Parámetros del WPS	24
2.2.3.	Obtención de Cupones Soldados	24

2.3.	Ensayos.....	25
2.3.1.	Probeta del Material Base.....	25
2.3.2.	Ensayos de Cupones Soldados	27
2.3.3.	Ensayos No Destructivos.....	27
2.4.	Costos de Soldadura	41
2.4.1.	Costos de Mano de Obra (CMO) y Materia Prima (CMP)	41
2.4.1.2.	Costo de Equipos y Maquinaria.....	43
2.4.2.	Costo de Consumibles.....	43
2.4.3.	Costo de la Energía y Eficiencia de las Fuentes	47
2.4.4.	Costos Generales	48
2.4.5.	Costo Total.....	48
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
3.1.	Resultados de caracterización del material base	49
3.1.1.	Tracción del material base	49
3.1.2.	Composición química del material base.....	49
3.1.3.	Dureza del Material Base.....	50
3.1.4.	Ensayo Metalográfico del Material Base	51
3.2.	Resultados de la soldadura	52
3.2.1.	Resultado de ensayos no destructivos.....	52
3.2.2.	Resultados de ensayos destructivos.....	60
3.2.3.	Resultado de Metalografías	66
3.2.4.	Resultados del Ensayo de Dureza	79
3.3.	Resultados de los costos involucrados en cada procedimiento	80
3.3.1.	Costos de Materia Prima y Mano de Obra	80
3.3.2.	Costo de Equipos y Maquinaria	81
3.3.3.	Costo de Consumibles.....	82
3.2.	Discusión de la caracterización del material base	97
3.2.1.	Comportamiento Mecánico del material base	97
3.2.2.	Composición del Material Base.....	98

3.3.	Discusión de soldadura	99
3.3.1.	Discusión de los ensayos no destructivos.....	99
3.3.2.	Discusión de los ensayos destructivos.....	103
3.4.	Discusión de Metalografías.....	105
3.5.	Discusión de la dureza	107
3.6.	Discusión de los costos involucrados en cada procedimiento	108
4.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	116
4.1.	Conclusiones	116
4.2.	Recomendaciones	117
	Referencias bibliográficas	118
	ANEXOS	121
	ANEXO I: FICHA TÉCNICA ELECTRODO E6010	122
	ANEXO II: FICHA TÉCNICA ELECTRODO E7018	123
	ANEXO III: FICHA TÉCNICA ELECTRODO E71T-1.....	124
	ANEXO IV: FICHA TÉCNICA MATERIAL DE APORTE ER70S-6.....	126
	ANEXO V: WPS PROCESO SMAW.....	127
	ANEXO VI: WPS PROCESO SMAW- FCAW	128
	ANEXO VII: WPS PROCESO GTAW-SMAW.....	129
	ANEXO VIII: WPS PROCESO GTAW-FCAW	130
	ANEXO IX: INFORME DE ENSAYO DE TRACCIÓN DEL MATERIAL BASE	133
	ANEXO X: INFORME TÉCNICO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE	135
	ANEXO XI: INFORME TÉCNICO DE TINTAS PENETRANTES	138
	ANEXO XII: INFORME TÉCNICO DE RADIOGRAFÍA.....	146
	ANEXO XIII Y XIV: INFORME DE ENSAYO DE TRACCIÓN Y NICK BREAK DE LAS PROBETAS SOLDADAS	156
	ANEXO XV: COSTOS DE SOLDADURA.....	159
	ANEXO XVI: COTIZACIÓN DE ELECTRODOS Y GASES DE PROTECCIÓN.....	163
	ANEXO XVII: PQRs	166

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Probeta del material base.	50
Figura 3.2 Probeta P1V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	61
Figura 3.3 Probeta P1V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	61
Figura 3.4 Probeta P2V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	61
Figura 3.5 Probeta P2V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	61
Figura 3.6 Probeta P3V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	62
Figura 3.7 Probeta P3V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	62
Figura 3.8 Probeta P4V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	62
Figura 3.9 Probeta P4V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.	62
Figura 3.10 Probeta P1W1, sometida a ensayo Nick Break.	63
Figura 3.11 Probeta P1W2, sometida a ensayo Nick Break.	63
Figura 3.12 Probeta P2W1, sometida a ensayo Nick Break.	63
Figura 3.13 Probeta P2W2, sometida a ensayo Nick Break.	63
Figura 3.14 Probeta P3W1, sometida a ensayo Nick Break.	63
Figura 3.15 Probeta P3W2, sometida a ensayo Nick Break.	63
Figura 3.16 Probeta P4W1, sometida a ensayo Nick Break.	63
Figura 3.17 Probeta P4W2, sometida a ensayo Nick Break.	64
Figura 3.18 Dureza vs. Ubicación de la indentación.	80
Figura 3.19 Áreas proceso SMAW. a) Área del pase raíz (E6010). b) Área pase 1 (E6010). c) Área pase 2 (E71018). d) Área pase 3 (E7018).	82
Figura 3.20 Áreas proceso SMAW-FCAW. a) Área del pase raíz (E6010). b) Área de pase 1 (E71T-1). c) Área del pase 2 (E71T-1). d) Área del pase 3 (E71T-1).	84
Figura 3.21 Áreas proceso GTAW-SMAW. a) Área del pase raíz (ER60S-6). b) Área de pase 1 (E7018). c) Área del pase 2 (E7018). d) Área del pase 3 (E7018).	85
Figura 3.22 Áreas proceso GTAW-FCAW. Área del pase raíz (ER60S-6). b) Área de pase 1 (E71T-1). c) Área del pase 2 (E71T-1). d) Área del pase 3 (E71T-1). e) Área del pase 4 (E71T-1).	87
Figura 3.23 Gráfico comparativo de defectos superficiales, de cada neplo soldado. .	101
Figura 3.24 Gráfico comparativo de defectos superficiales, de cada neplo soldado. .	102
Figura 3.25 Gráfico comparativo del ensayo de tracción a las probetas soldadas, comparado con el material base y tubería X52 de la Norma API 5L.	104
Figura 3.26 a) Material Base donde se muestra matriz ferrítica-perlítica, laminado en frío. (Fuente: Propia).	105

Figura 3.27 Martensita Widmanstätten.....	106
Figura 3.28 ZAC de los procesos realizados a) ZAC de proceso SMAW (E6010 – E7018), b) ZAC de proceso SMAW – FCAW. c) ZAC de proceso GTAW – SMAW. d) ZAC de proceso GTAW – FCAW.....	106
Figura 3.29 Costo de mano de Obra en los cuatro procedimientos.....	108
Figura 3.30 Costo de mano de obra en los cuatro procedimientos.....	109
Figura 3.31 Costo de máquina soldadora utilizada en cada proceso.....	110
Figura 3.32 Costo de material de aporte utilizado en cada proceso.....	110
Figura 3.33 Costo de material de aporte medida.	111
Figura 3.34 Costo de gases de protección en cada proceso.....	113
Figura 3.35 Costo de energía eléctrica en cada proceso.	113
Figura 3.36 Costos generales de cada proceso.....	114
Figura 3.37 Costo total de cada procedimiento de soldadura utilizado.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Criterios de aceptación de discontinuidades.	14
Tabla 2.1 Especificación del Material Base.	21
Tabla 2.2 Composición Química de la tubería API 5L X52.	22
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de la tubería API 5L X52.	22
Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del equipo de soldadura.	23
Tabla 2.5 Especificaciones técnicas del alimentador.	23
Tabla 2.6 Materiales de aporte para cada proceso.	23
Tabla 2.7 Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de composición.	26
Tabla 2.8 Codificación para END.	28
Tabla 2.9 Especificaciones técnicas del equipo radiográfico.	29
Tabla 2.10 Tiempos para recaldo del equipo.	29
Tabla 2.11 Tiempos para el proceso de revelado.	31
Tabla 2.12 Especificaciones técnicas de la tronzadora.	32
Tabla 2.13 Codificación para cupones soldados.	33
Tabla 2.14 Codificación de probetas para ensayos.	33
Tabla 2.15 Codificación para Metalografías.	34
Tabla 2.17 Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.	35
Tabla 2.18 Especificaciones técnicas de la máquina de doblado guiado.	37
Tabla 2.18 Especificaciones técnicas de la máquina de desbaste grueso.	38
Tabla 2.19 Especificaciones técnicas de la máquina de desbaste automática.	39
Tabla 2.20 Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico invertido.	39
Tabla 2.21 Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.	40
Tabla 2.22 Ciclo de trabajo de procesos de soldadura.	42
Tabla 2.23 Eficiencia de aportación.	46
Tabla 2.24 Densidad de gases utilizados.	47
Tabla 3.1 Resultados del Ensayo de Tracción al material base.	49
Tabla 3.2 Composición Química del material base.	50
Tabla 3.3 Resultados del barrido de dureza al material base.	50
Tabla 3.4 Micrografías del material base.	51
Tabla 3.5 Inspección visual a cupones soldados.	52
Tabla 3.6 Resumen del Ensayo de Tintas Penetrantes.	54
Tabla 3.7 Resumen del Ensayo Radiográfico.	56
Tabla 3.8 Resultados del Ensayo de Tracción.	61
Tabla 3.9 Resultados del Ensayo Nick Break.	62
Tabla 3.10 Resultados del Ensayo de Doblado de Cara.	64

Tabla 3.11 Resultados del Ensayo de Doblado de Raíz.	65
Tabla 3.12 Metalografías de P1M en 50X.	67
Tabla 3.13 Metalografías de P1M en 100X.	67
Tabla 3.14 Metalografías de P1M en 500X.	68
Tabla 3.15 Metalografías de P2M en 50X.	69
Tabla 3.16 Metalografías de P2M en 100X.	69
Tabla 3.17 Metalografías de P2M en 500X.	70
Tabla 3.18 Metalografías de P3M en 50X.	71
Tabla 3.19 Metalografía de P3M en 100X.	72
Tabla 3.20 Metalografía de P3M en 500X.	73
Tabla 3.21 Metalografía de P4M en 50X.	74
Tabla 3.22 Metalografía de P4M en 100X.	75
Tabla 3.23 Metalografía de P4M en 500X.	76
Tabla 3.24 Macrografías de P1M.	77
Tabla 3.25 Macrografías de P2M.	77
Tabla 3.26 Macrografías de P3M.	78
Tabla 3.27 Macrografías de P4M.	78
Tabla 3.28 Ensayo de Dureza en probetas soldadas.	79
Tabla 3.29 Probetas de ensayo de dureza.	79
Tabla 3.30 Costos de Mano de Obra.	81
Tabla 3.31 Costo hora de la máquina.	82
Tabla 3.32 Áreas de los pases en P1.	83
Tabla 3.33 Precio unitario de electrodos.	83
Tabla 3.34 Peso del depósito de soldadura proceso SMAW.	83
Tabla 3.35 Costo del material de aporte proceso SMAW.	83
Tabla 3.36 Áreas de los pases en P2.	84
Tabla 3.37 Precio unitario de electrodos.	84
Tabla 3.38 Peso del depósito de soldadura proceso SMAW – FCAW.	85
Tabla 3.39 Costo del material de aporte proceso SMAW – FCAW.	85
Tabla 3.40 Áreas de los pases en P3.	86
Tabla 3.41 Precio unitario de electrodos.	86
Tabla 3.42 Peso del depósito de soldadura proceso GTAW – SMAW.	86
Tabla 3.43 Costo del material de aporte proceso GTAW – SMAW.	86
Tabla 3.44 Áreas de los pases en P4.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3.45 Precio unitario de electrodos.	88
Tabla 3.46 Peso del depósito de soldadura proceso GTAW – FCAW.	88

Tabla 3.47 Costo del material de aporte proceso GTAW – FCAW.....	88
Tabla 3.48 Consumo de CO2 para proceso SMAW - FCAW	89
Tabla 3.49 Consumo de Argón para proceso GTAW – SMAW.	89
Tabla 3.50 Consumo de Argón para proceso GTAW – FCAW.....	90
Tabla 3.51 Consumo de CO2 para proceso GTAW-FCAW	90
Tabla 3.52 Costo de energía eléctrica por períodos, proceso SMAW.	91
Tabla 3.53 Costo de energía eléctrica por períodos, proceso SMAW – FCAW.....	92
Tabla 3.54 Costo de energía eléctrica por períodos, proceso GTAW – SMAW.....	93
Tabla 3.55 Costo de energía eléctrica por períodos, proceso GTAW – FCAW.	94
Tabla 3.56 Costos generales proceso SMAW.....	95
Tabla 3.57 Costos generales proceso SMAW – FCAW.	95
Tabla 3.58 Costos generales proceso GTAW – SMAW.	96
Tabla 3.59 Costos generales proceso GTAW – FCAW.....	96
Tabla 3.60 Costo total de cada proceso.....	97
Tabla 3.61 Comparación (ensayo de tracción) del material base y material de la Norma API 5L.	98
Tabla 3.62 Comparación (composición química) del material base y material de la Norma API 5L.....	98
Tabla 3.63 Defectos superficiales de cada neplo soldado.....	100
Tabla 3.64 Defectos internos de cada neplo soldado.....	102
Tabla 3.65 Resultados de ensayos de tracción de las probetas soldadas.....	103
Tabla 3.66 Áreas de la ZAC en cada proceso de soldadura.	107
Tabla 3.67 Sueldo por hora del Soldador.	109
Tabla 3.68 Consumo y Costo de Material de aporte.	111
Tabla 3.69 Índice de desperdicio de Material.....	112

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el uso de tres procedimientos de soldadura, SMAW, GTAW y FCAW combinados entre sí, en una tubería caracterizada como API 5L X52 luego de los ensayos pertinentes de composición química y resistencia a la tracción. En el procedimiento SMAW se utilizaron dos tipos de electrodos, 6010 y 7018, en el procedimiento GTAW electrodo ER70S-6 con protección de Argón al 100% y en el procedimiento FCAW con alambre E71T-1. Se soldaron tres cupones de tubería bajo las especificaciones de la Norma API 1104, combinado los procedimientos SMAW 6010 – 7018, SMAW 6010 – FCAW, GTAW – SMAW y GTAW – FCAW. En cada procedimiento se tomaron todos los tiempos involucrados en la soldadura, así como cada uno de los parámetros de los mismos, como: voltaje, amperaje, caudal de gas de protección, velocidad de alimentación del electrodo, con la finalidad de realizar los cálculos de costos en cada procedimiento para luego compararlos. La calificación de dichos procedimientos se realizó bajo los requerimientos de la Norma API 1104, en la cual especifica un total de 32 probetas (8 por cupón soldado) para ensayos mecánicos y adicionalmente se extrajeron 5 probetas, una de cada cupón soldado y una del material base para ensayos metalográficos. Se realizaron ensayos de inspección visual, tintas penetrantes y rayos x con la finalidad de observar cuál de los cupones tenía mayores discontinuidades y posteriormente posibles defectos para compararlos entre sí, dando como resultado que el procedimiento GTAW – FCAW es el de mayor defectología. Se determinaron los costos totales de los procedimientos, obteniéndose que el procedimiento GTAW – SMAW es el más costoso en comparación con el resto de procedimientos. En los ensayos de tracción, el procedimiento GTAW – FCAW presentó la mayor resistencia.

Palabras clave: API 1104, costos, defectología, propiedades.

ABSTRACT

This project analyzes the use of three welding procedures, SMAW, GTAW and FCAW combined, in a pipe characterized as API 5L X52 after the relevant tests of chemical composition and tensile strength. Two types of electrodes, 6010 and 7018, were used in the SMAW procedure, in the GTAW procedure ER70S-6 electrode with 100% Argon protection and in the FCAW procedure with E71T-1 wire. Three piping coupons were welded under the specifications of API 1104, combined with SMAW 6010 – 7018, SMAW 6010 – FCAW, GTAW – SMAW and GTAW – FCAW. In each procedure, all the times involved in welding were taken, as well as each one of the parameters, such as: voltage, amperage, protection gas flow, electrode feed rate, in order to perform cost calculations in each procedure and then compare them. The qualification of these procedures was carried out under the requirements of API Standard 1104, in which it specifies a total of 32 specimens (8 per welded coupon) for mechanical tests and additionally 5 specimens were extracted, one from each welded coupon and one from the base material for metallographic tests. Visual inspection tests, penetrating inks and x-rays were performed in order to observe which of the coupons had the greatest discontinuities and subsequently possible defects to compare them to each other, resulting in the most defective GTAW – FCAW procedure. The total costs of the procedures were determined, obtaining that the GTAW-SMAW procedure is the most expensive compared to the rest of the procedures. In tensile tests, the GTAW - FCAW procedure presented the greatest resistance.

Keywords: API 1104, costs, defectology, properties.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE OLEODUCTOS EN EL ECUADOR

INTRODUCCIÓN

Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de cuatro procedimientos de soldadura utilizados en la construcción de oleoductos en el Ecuador.

Objetivos específicos

- **Obtener** cuatro cupones de prueba con los procedimientos planteados en la metodología.
- **Medir** las variables involucradas para determinar los costos en cada cupón de soldadura.
- **Evaluar** los cupones soldados mediante ensayos no destructivos.
- **Realizar** los ensayos mecánicos necesarios para calificar los procedimientos indicados.
- **Hacer** el análisis comparativo del costo, propiedades mecánicas y defectología en las probetas obtenidas mediante la norma API 1104.

Alcance

El presente proyecto tiene como finalidad realizar un análisis comparativo en cuanto a costos, defectología y propiedades mecánicas de cuatro procedimientos de soldadura utilizados en la construcción de oleoductos en el Ecuador.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Para la construcción de oleoductos se requiere calificar un gran número de procedimientos diferentes para cubrir todo el ámbito de los trabajos de soldadura. Como antecedente en la construcción del último oleoducto del Ecuador, OCP, se calificó para la construcción alrededor de 57 procedimientos de soldadura diferentes, en función del cambio de diámetros, espesores, materiales y condiciones externas que requiere la construcción de un Oleoducto.

De la misma manera, existen diferentes etapas en la soldadura de oleoductos entre las cuales están las líneas regulares, pasos especiales, empalmes, cruces aéreos, etc. que requieren diferentes procesos de soldadura. Debido a las condiciones mencionadas anteriormente que se presentan a lo largo del proceso de montaje de oleoductos se escogen los procesos y procedimientos más adecuados.

En el Ecuador, para la construcción de oleoductos se han diseñado procedimientos diferentes aprobados para la soldadura de tubería.

Estos procedimientos de soldadura calificados tienen diferencias en cuanto a: propiedades mecánicas, costos, productividad, defectología, seguridad, etc. Cuando existen líneas regulares los procedimientos deben ser rápidos y por lo tanto se utiliza generalmente SMAW en las primeras pasadas y en los siguientes pases se usa FCAW. Si existen pasos especiales debido a quebradas, cruces de río, pendientes pronunciadas, etc. no interesa realizar los trabajos de soldadura de una manera rápida sino se los hace de forma manual con procedimiento SMAW con electrodo 6010 y luego con electrodos básicos o de bajo hidrógeno. En la defectología de soldadura en oleoductos se conoce que el 80% de defectos están en el pase raíz; por lo que, cuando los oleoductos tienen diámetros pequeños es necesario una mejor calidad en la soldadura y el pase raíz se lo hace con una combinación GTAW en los dos primeros pases y relleno con SMAW. En términos de productividad se utiliza en el pase raíz GTAW y el relleno con FCAW.

Por lo tanto, cuando se trata de oleoductos de grandes longitudes, como algunos que existen en el mundo llegando a medir alrededor de 6000 Km y en el Ecuador, por ejemplo, oleoductos como los construidos por OCP de aproximadamente 320 Km, habrá una incidencia importante en los costos, defectología y propiedades mecánicas, dependiendo de los procesos y procedimientos utilizados.

Esta problemática se pretende estudiar en el presente proyecto de titulación.

1.2. Soldadura de oleoductos

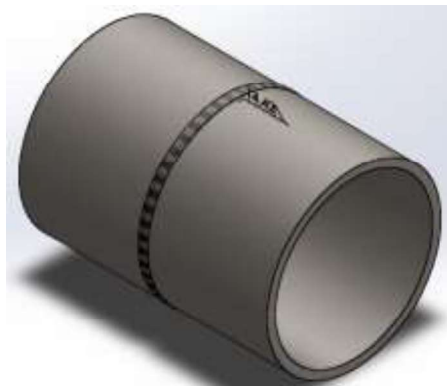


Figura. 1.1 Soldadura de Oleoducto.
(Fuente: Propia)

En la Figura 1.1 se observa la representación de soldadura en tubería de oleoductos. La soldadura de oleoductos es un tema muy extenso y abierto para su investigación y continuo desarrollo, por lo cual, siempre se busca las mejores alternativas para poder soldar la tubería de modo que se genere el menor impacto tanto económico, como social y ambiental. De esta manera es necesario un control continuo de cada uno de los parámetros que rigen a una soldadura de tubería y que no existan agentes externos que cambien o alteren dichos parámetros.

Algunos de los procedimientos más utilizados en la soldadura de tubería de oleoductos son: SMAW: soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido, GTAW: soldadura eléctrica por arco con electrodo de tungsteno bajo protección de gas y FCAW: soldadura eléctrica por arco bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo tubular.

Una manera adecuada de garantizar que todos los parámetros de la soldadura están siendo controlados es mediante el uso de los documentos estandarizados, como son: WPS: Welding Procedure Specification, PQR: Procedure Qualification Records y WPQ: Welder Performance Qualification, que se encargan de recopilar la información necesaria sobre cada parámetro de la soldadura, procedimiento y calificación tanto de la soldadura como del soldador para que el control se la soldadura sea óptima.

1.2.1. Tipos de soldadura en tuberías

Existen varios procesos y combinaciones de procedimientos utilizados en la actualidad para la soldadura en campo de tubería de conducción a campo travesía. Estos incluyen la soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) y soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW-S), principalmente. Actualmente las tuberías de acero son de mayor resistencia que las utilizadas anteriormente y están diseñadas con la soldabilidad adecuada. Los aceros utilizados comúnmente en oleoductos y tuberías de gas a campo travesía se ajustan a la especificación API 5LX o similares. (Rosero, 2019)

1.2.2. Síntesis y alcance de la Norma API 5L

La especificación API 5L determina los requisitos para tuberías en el uso del transporte de agua, gas, aceite y petróleo. Adicionalmente proporciona los requerimientos necesarios que se deben cumplir en la fabricación de tubos de acero con costura, obteniéndose dos niveles PSL 1 y PSL 2. Esta especificación cubre los grados: A25, A, B, X42, X46, X52, X65, X70, X80, además de los grados intermedios.

Se conoce además que en conjunto con la Norma API 5L, la norma API 1104 es la que se utiliza en el desarrollo de la soldadura de oleoductos. Un análisis de la norma se realiza a continuación.

1.2.3. Requerimientos de la Norma API 1104, para la elaboración de procedimientos.

La Norma API 1104 es utilizada para la elaboración y calificación de varios procedimientos en oleoductos, gaseoductos y todo tipo de tubería.

Por esta razón la Norma API 1104 será utilizada como base en la elaboración del presente trabajo. Dentro de esta Norma se encuentran especificados todos los ítems a cumplirse para que un procedimiento de soldadura sea calificado y validado.

En la Figura 1.2 se presentan los ítems de la Especificación del procedimiento de soldadura mencionados anteriormente y su orden específico en base a la Norma API 1104, mismos a ser considerados en el presente trabajo.

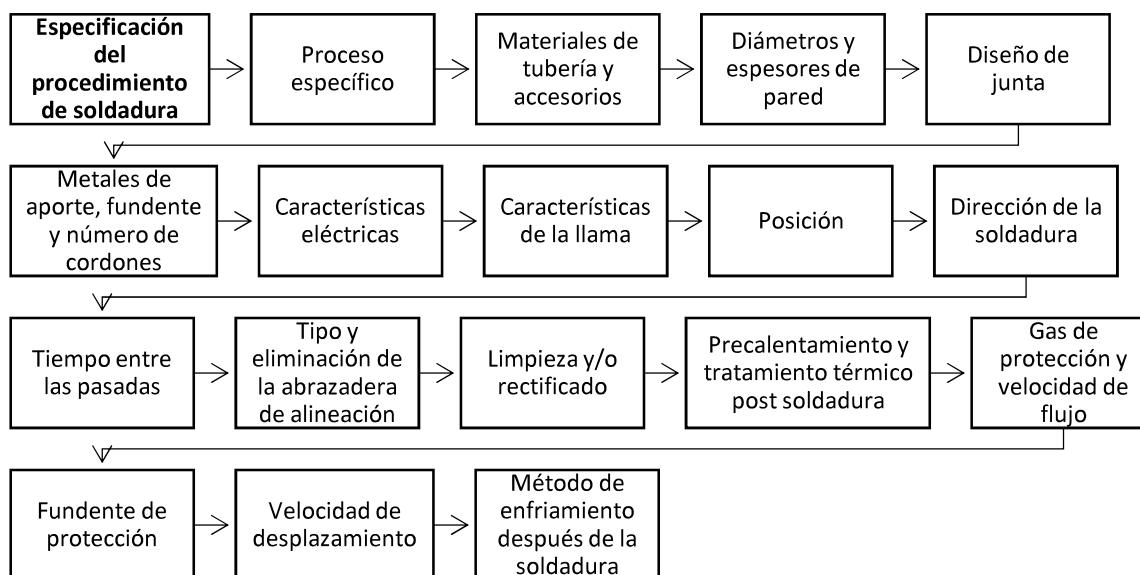


Figura. 1.2 Especificación del Procedimiento, Norma API 1104.

(Fuente: Propia)

La propia Norma API 1104 provee un modelo de WPS (Welding Procedure Specification), el cual se puede seguir con la finalidad de tener en consideración todos los parámetros definidos anteriormente en la Figura 1.2.

A continuación, se detalla los ítems que debe contener el WPS en base a la Norma API 1104:

- Para: Se debe especificar si es un trabajo para personas naturales o una empresa.
- Soldadura de: Se refiere al tipo de soldadura que se va a trabajar; es decir, si se trata de tuberías, accesorios, etc.
- Proceso: El proceso de soldadura que se va a utilizar.
- Material: El material base sobre el cual se va a realizar el trabajo.
- Diámetro externo y espesor de la pared de la tubería.
- Diseño de la junta.

- Metal de aporte y número de cordones.
- Electrodo no consumible, dependiendo del proceso.
- Características eléctricas.
- Posición: Se debe identificar la posición de soldadura en la cual se va a realizar el trabajo.
- Dirección de soldadura.
- Número de soldadores.
- Tiempo entre las pasadas.
- Tipo y eliminación de la abrazadera de alineación.
- Limpieza y/o rectificado.
- Tratamiento térmico de precalentamiento/post-soldadura.
- Gas de protección y velocidad de flujo.
- Fundente de protección.
- Velocidad de desplazamiento.
- Velocidad de flujo del gas de plasma.
- Composición del gas de plasma.
- Bocetos y tabulaciones adjuntas.
- Nombre del soldador.
- Nombre de la persona que aprueba la soldadura.
- Nombre de la persona que supervisa de soldadura. ((API 1104), 2014)

Nota: Se debe colocar en el WPS un esquema de la junta a soldar, ya que al ser diferentes procesos de soldadura los que se pueden utilizar, la junta cambiará.

1.3. Soldadura por arco

La soldadura por arco es un proceso donde la unión es producida por el calor generado por un arco eléctrico con o sin metal de aporte. La energía eléctrica del arco se transforma en energía térmica, la misma que puede llegar hasta una temperatura aproximada de 4000 °C. La energía eléctrica es el flujo de electrones a través de un circuito cerrado. Cuando ocurre una apertura del circuito, los electrones e iones se mueven a gran velocidad y saltan a través del espacio libre entre los dos terminales o polos produciendo un arco eléctrico o plasma ionizado, con el suficiente voltaje para hacer fluir los portadores de carga continuamente. A través de esta apertura, se forma el arco eléctrico fundiéndose el metal a medida que se

avanza. Por lo tanto, el arco eléctrico es un flujo continuo de electrones a través de un medio gaseoso, que genera luz y calor. En la Figura 1.3 se puede observar gráficamente como se produce la soldadura por arco.

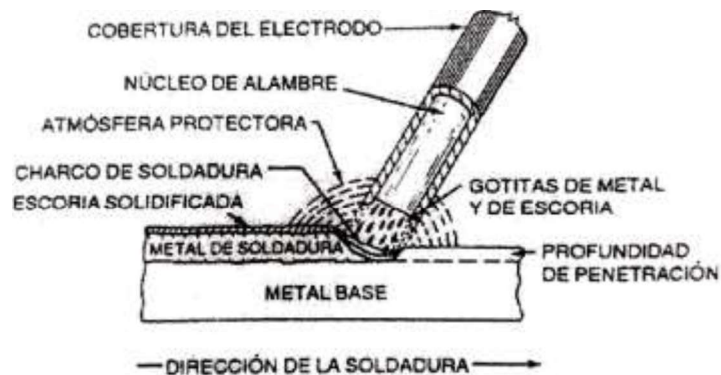


Figura. 1.3 Soldadura por Arco Eléctrico.

(Fuente: Facultad de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Soldadura)

1.3.1. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)

1.3.1.1. Definición

SMAW: "Shielded Metal Arc Welding" por sus siglas en inglés, es un proceso de unión por fusión de piezas metálicas. Para lograr la unión, se concentra el calor del arco eléctrico establecido entre bordes de las piezas a soldar y una varilla metálica, llamada electrodo, produciéndose una zona de fusión que, al solidificarse, forma una unión permanente.

Los elementos principales de esta soldadura son los siguientes: Generador de corriente (fuente de poder), cables de soldadura, porta-electrodo, masa o tierra, electrodo, pieza de trabajo.

1.3.1.2. Materiales de los electrodos

Los materiales de los electrodos están definidos por especificaciones que se han desarrollado por la AWS-ASTM en conjunto, teniendo la Norma AWS 5.1 para electrodos para soldadura por arco, de acero blando recubierto.

1.3.2.Soldadura eléctrica por arco en atmósfera inerte con electrodo de tungsteno “TIG” (GTAW)

1.3.2.1. Definición

Por sus siglas en inglés “Gas Tungsten Arc Welding”, proceso también conocido como como TIG (Tungsten Inert Gas), el mismo que al igual que otros procesos produce un arco con la diferencia que éste tiene una protección gaseosa inerte y utiliza un electrodo de tungsteno no consumible con la posibilidad de utilizar o no material de aporte. El objetivo de usar un gas inerte para su protección es desplazar al aire, el cual tiene oxígeno y nitrógeno los mismos que pueden contaminar la soldadura, los gases inertes más comunes para este proceso de soldadura son: Argón (Ar) y Helio (He).

El gas inerte que más se usa es el Argón debido a que la energía que necesita para ionizarse es muy baja, lo cual facilita la estabilidad del arco. Adicionalmente es monoatómico y posee una densidad de 1,4 g/cm³.

En este proceso el equipo que se utiliza tiene como principales a los siguientes elementos:

- Fuente de poder.
- Estabilizador de alta frecuencia.
- Sistema economizador de gas: Válvula solenoide.
- Sistema de suministro de gas argón: cilindro, reductor de presión, flujómetro y mangueras.
- Electrodo no consumible.
- Pistola o antorcha.

1.3.2.2. Material de aporte

Los electrodos que se utilizan en este procedimiento están fabricados de Tungsteno de alta pureza, o con aleaciones de 1 ó 2% de Thorio, y otros tienen 0,5% de Zirconio.

La Norma en la cual se especifica la clasificación del material de aporte para el proceso GTAW, es la AWS A5.12.

1.3.3.Soldadura eléctrica con alimentación continua de electrodo tubular (FCAW)

1.3.3.1. Definición

Por sus siglas en inglés “Flux Cored Arc Welding” o en español soldadura por arco con electrodo de núcleo de fundente, es un proceso que aprovecha el arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. En este proceso de soldadura se utiliza la protección de un fundente el cual se encuentra en la parte interna del electrodo tubular.

El equipo utilizado en este proceso, cuenta con lo siguiente:

- Fuente de poder.
- Unidad de alimentación de alambre electrodo.
- Pistola y conjunto de cables.
- Carrete de alambre electrodo tubular con núcleo de fundente.
- Sistema de protección – gas (éste se utiliza únicamente si los electrodos con núcleo lo requieren).

1.3.3.2. Material de aporte

El material de aporte para este proceso es compuesto, consiste en una funda metálica y un núcleo con diversos materiales pulverizados. Mientras se realiza el proceso de soldadura se puede utilizar una protección ajena (externa) adicional de gas activo (CO₂).

La funda metálica con la que cuenta el electrodo consiste en una funda de acero de bajo carbono y de aleación. La clasificación del electrodo y el fabricante son los que determinan la composición del núcleo de fundente.

En base a la norma AWS A5.20 se define la denominación de los electrodos para el proceso FCAW.

1.3.3.3. El fundente

El fundente es contenido en el alambre tubular, el cual entre otras funciones primarias tiene:

- Gracias a las diferentes reacciones con los elementos del fundente, provee al metal de soldadura propiedades metalúrgicas y mecánicas además de resistencia a la corrosión.

- La integridad del metal de soldadura permanece intacta (protegida) del oxígeno y el nitrógeno presentes en el aire.
- Producir una capa protectora de escoria con la finalidad de cubrir el metal del aire durante la solidificación.
- Adicionalmente proporciona un camino eléctrico uniforme reduciendo defectos como: salpicaduras y con esto facilita la cantidad de depósito adecuada, uniforme y tamaño correcto de la soldadura.

Los elementos más comunes presentes en el fundente son: Aluminio (polvo metálico), calcio (fluorofato y piedra caliza), carbono (ferro manganeso), cromo (ferro aleación o polvo metálico), hierro (ferro aleaciones y polvo de hierro), manganeso (ferro aleación o polvo metálico), molibdeno (ferro aleación), níquel (polvo metálico), potasio (feldespatos con contenido de potasio y silicatos de fritas), silicio (ferrosilicio o silicomanganeso), sodio (feldespatos con contenido de sodio y silicatos de fritas), titanio (ferroaleación como ferrotitanio; rutilo), zirconio (óxido o polvo metálico), vanadio (óxido o polvo metálico), entre otros.

1.3.4. Combinación de procesos de soldadura

La combinación de procesos de soldadura se realiza en campo principalmente por las necesidades que se presentan en la construcción de un oleoducto, como, por ejemplo: pases por montañas, tuberías aéreas, pases especiales, etc. Tomando como ejemplo en el oleoducto del OCP, se utilizaron varios procedimientos de soldadura, que en función de las condiciones geográficas de la zona fueron combinados de varias maneras siendo los principales procesos: SMAW, TIG, FCAW, GMAW los más utilizados. De forma individual como en líneas regulares en las que se pretende obtener mayor productividad siendo el pase raíz y segundo pase realizados con el proceso “SMAW” mismo que permite realizar un control de parámetros más adecuado, controlando el arco eléctrico mediante el amperaje; es decir, existe un mejor control de la piqueta, siendo un proceso de alta calidad y rentabilidad, y los pases de relleno con el proceso “FCAW”. Cabe mencionar que el proceso “SMAW” permite realizar soldaduras en zonas de acceso restringido. Si existen empalmes o cambios en la geografía donde se está realizando el montaje del oleoducto, se utiliza el proceso de soldadura “SMAW” ya que al ser un proceso manual éste permite obtener una menor cantidad de defectología en el cordón comparado con FCAW, por ejemplo, por esta razón al realizar empalmes o juntas especiales

en oleoductos es común que se realice una soldadura por día. En definitiva, la combinación de procesos de soldadura en oleoductos depende de las necesidades que se presenten en el montaje.

1.3.5. Posiciones de soldadura de tubería

Están definidas como las ubicaciones que el soldador puede tomar respecto a la junta a soldar, para realizar un cordón de soldadura. Específicamente para oleoductos se utilizan las posiciones 5G y 6G.

1.4. Documentación de la soldadura industrial

Corresponden a los documentos utilizados por los técnicos e ingenieros, con el fin de detallar todos los parámetros, datos, procesos, variables, etc., de la soldadura que se requiere y además de las pruebas destructivas y no destructivas necesarias para rechazar o aprobar la soldadura. Todo esto en base a normas o estándares que proveen de los requerimientos necesarios que deben incluirse en cada documento. La documentación es la siguiente:

1.4.1. Especificación del proceso de soldadura (WPS)

WPS: "Welding Procedure Specification", también conocido en español como: "Especificación del Proceso de Soldadura" es un documento en el cual se especifican todos y cada uno de los parámetros que se deben tomar en cuenta para realizar la soldadura. Parámetros como los especificados en el punto 1.2.3 del presente trabajo.

1.4.2. Registro de calificación de procedimiento (PQR)

PQR: "Procedure Qualification Record" o conocido también como: Registro de Calificación del Procedimiento, en este se registran todos los resultados obtenidos de las probetas soldadas, luego de realizados todos los ensayos destructivos y no destructivos para un determinado WPS, las probetas están normalizadas bajo estándares internacionales de los cuales se toma referencia para realizar los ensayos respectivos.

1.4.3. Calificación del desempeño del soldador (WPQ)

WPQ: "Welder Procedure Qualification", en español: Calificación del Proceso del Soldador, es un documento en el cual se registran los resultados obtenidos luego de que el soldador realice juntas soldadas y se determine la habilidad para obtener dichas juntas de buena calidad. Se debe utilizar un WPS calificado previamente para poder aplicar el WPQ.

1.5. Ensayos no destructivos (END)

De forma general los ensayos no destructivos sirven para determinar discontinuidades (imperfecciones) que se presenten en materiales metálicos y no metálicos. En ocasiones estas discontinuidades constituyen un defecto, que son discontinuidades que no se ajustan a los criterios de aceptación porque provocan la reducción de la vida útil del material o en el peor de los casos el desecho del mismo.

Este tipo de ensayos no ocasionan daño en los materiales, por lo cual después de que los materiales han sido ensayados éstos pueden ser utilizados sin ningún inconveniente.

Gracias a estas pruebas es posible identificar materiales defectuosos antes de que sean sometidos a procesos como: maquinado, conformado, puestos en servicio, etc. Debido a la utilidad que se vaya a dar al material esta será aceptada o rechazada, luego de realizados este tipo de ensayos en el mismo.

Defectología es el término utilizado en soldadura al existir un grupo de discontinuidades o defectos en la estructura de un material. Dentro de la defectología de materiales tenemos: inclusiones de escoria, distorsiones, porosidades, grietas, salpicaduras, socavaciones, etc. así como: fracturas, cavidades, inclusiones sólidas, penetración incompleta, etc.

1.5.1. Inspección visual

Este ensayo no destructivo es el más común, pero es en el que más información se debe conocer acerca del material y los procedimientos a ser examinados. La inspección visual es utilizada como un ensayo preventivo ya que logra detectar problemas que con el tiempo pueden agravarse ya sea en los siguientes pasos de producción de la pieza o durante su servicio. Este tipo de ensayo no destructivo debe ser aplicado por una persona certificada que tenga amplia experiencia y el conocimiento necesario para detectar posibles indicadores.

1.5.2. Tintas penetrantes

El ensayo de tintas penetrantes es un tipo de ensayo no destructivo cuyo fin es el de identificar diferentes discontinuidades superficiales que con la inspección visual no es posible notar, por lo general se utiliza en aleaciones no ferrosas, aunque es posible usar en la inspección de materiales ferrosos al no ser satisfactorios los resultados por partículas magnéticas.

Gracias a la capacidad que tienen algunos líquidos de penetrar y permanecer retenidos en grietas, fisuras, poros, etc. es que se utiliza este ensayo no destructivo. Dicha capacidad de los líquidos depende básicamente de tres propiedades: mojabilidad, tensión superficial y viscosidad.

1.5.3. Radiografía

El ensayo radiográfico (Rayos X) es uno de los métodos principales y más utilizados de los END. Es un método que mediante la radiación electromagnética de corta longitud de onda permite identificar defectos internos y externos del material que a simple vista no pueden ser identificados. La radiación que penetra y pasa a través de un material es capturada por una película sensible a la radiación.

Gracias a la diferencia en la escala de grises que se presenta en la radiografía, se pueden determinar parámetros como: espesor del material que se está analizando, así como, discontinuidades o defectos dentro del mismo.

1.6. Criterios de aceptación de discontinuidades para ensayos no destructivos

Para la aceptación de los cupones soldados en base a ensayos no destructivos, la norma API 1104 en la sección 9 detalla tanto las discontinuidades como su rango máximo de aceptación. Todos los criterios ahí descritos serán tomados en cuenta en el presente trabajo. Un resumen de dichos criterios se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Criterios de aceptación de discontinuidades.

Discontinuidad	Criterio de aceptación
Penetración inadecuada sin desalineación (IP)	<ul style="list-style-type: none"> • Una indicación no debe ser mayor a 25 mm. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 25 mm. • La suma de indicadores no debe ser mayor al 8% de la longitud soldada.
Penetración inadecuada debido a desalineación (IPD)	<ul style="list-style-type: none"> • Una indicación no debe ser mayor a 50 mm. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 75 mm.
Penetración transversal inadecuada (ICP)	<ul style="list-style-type: none"> • Una indicación no debe ser mayor a 50 mm. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 50 mm.
Fusión incompleta (IF)	<ul style="list-style-type: none"> • Una indicación no debe ser mayor a 25 mm. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 25 mm. • La suma de indicadores no debe ser mayor al 8% de la longitud soldada.
Fusión incompleta por traslape en frío (IFD)	<ul style="list-style-type: none"> • Una indicación no debe ser mayor a 50 mm. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 50 mm. • La suma de indicadores no debe ser mayor al 8% de la longitud soldada.
Concavidad interna (IC)	<ul style="list-style-type: none"> • Cualquier longitud de concavidad interna es aceptable, siempre y cuando la densidad de la imagen radiográfica no sea mayor a la del material base.
Quemón (BT)	<ul style="list-style-type: none"> • Si la dimensión máxima de la indicación es 6 mm. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 13 mm.
Inclusiones de escoria (ESI-ISI)	<ul style="list-style-type: none"> • La longitud de una indicación no debe ser mayor a 50 mm. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 50 mm. • El ancho de una indicación no debe ser mayor a 1,6 mm.
Porosidad (P)	<ul style="list-style-type: none"> • Una indicación no debe ser mayor a 3 mm. • El tamaño de la indicación no debe ser mayor al 25% del espesor de la tubería. • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 13 mm.

Grietas (C)	<ul style="list-style-type: none"> • Si la grieta es tipo cráter o estrella es poco profunda. • Una indicación debe ser menor a 4 mm.
Mordeduras (EU-IU)	<ul style="list-style-type: none"> • La suma de indicadores en una longitud soldada de 300 mm no debe ser mayor a 50 mm. • La suma de indicadores no debe ser mayor a 1/6 de la longitud soldada.

(Fuente: API 1104, 2016)

1.7. Ensayos Destructivos

Los ensayos destructivos son aquellos que luego de aplicada la prueba al material éste cambia sus propiedades físicas o químicas. Este tipo de ensayos se utilizan con la finalidad de determinar los límites mínimos y máximos que puede tener una propiedad del material.

Los ensayos tanto destructivos como no destructivos se encuentran bajo estándares que deben ser utilizados el momento de someter a un material a cualquiera de ellos.

Los ensayos destructivos en base a la Norma API 1104, que se utilizarán en el presente trabajo son los siguientes:

1.7.1. Ensayo de tracción

Permite obtener las curvas de $\sigma - \epsilon$ (esfuerzo – deformación) de los materiales con la ayuda de una máquina universal de ensayos la misma que permite la medición del comportamiento plástico de los materiales. Estas mediciones se convertirán posteriormente en curvas de σ vs. ϵ (tensión nominal/deformación plástica). (Michael F. Ashby, 2008)

1.7.2. Ensayo de rotura con entalle

El objetivo de este ensayo es determinar las condiciones críticas que produzcan la fractura instantánea de una pieza determinada, sometida a tracción axial. Este ensayo es muy parecido al ensayo de tracción con la diferencia en la forma de la probeta, ya que para el ensayo de rotura la probeta cuenta con una muesca mecanizada que actúa como concentrador de tensiones.

1.7.3. Ensayo de doblado de cara y de raíz

Este ensayo permite determinar la ductilidad de los materiales. Las probetas son sometidas a una deformación en U hasta llegar a su deformación completa o también hasta exceder la resistencia final de tensión de las fibras exteriores de la probeta y por lo tanto su falla. En este ensayo se utilizan la cara y la raíz del cordón de soldadura para ser sometido a la flexión. (Groover Mikell, 2007).

1.8. Análisis de microestructura

El análisis de microestructura, es un método que permite conocer las características intrínsecas de un material mediante la interpretación de información que se obtiene a partir de una muestra del mismo. Este procedimiento consiste en determinar las características microestructurales del material, además es posible determinar si el material analizado ha sufrido previamente tratamientos térmicos o mecánicos. Las probetas pueden extraerse de dos maneras diferentes: longitudinal o transversalmente, dependiendo de la forma del material a ser analizado.

1.9. Ensayo de Dureza

El ensayo de dureza tiene como finalidad determinar la resistencia a la penetración de un material, es empleado también como una aproximación de la resistencia a la tensión de un material, además, es un indicador de: ductilidad, tenacidad, maquinabilidad y resistencia al desgaste del material, todo esto se encuentra especificado en la norma ASTM E18, en donde se indica que existen diferentes escalas con las cuales se puede medir la dureza, siendo la más utilizada en aceros la escala Rockwell.

En la Ecuación 1.1 se representa la estrecha relación que guarda la dureza con la resistencia a la tracción del material. Tendiendo que: si TS se expresa en lb/pulg², entonces $k_h=500$; y si TS están en MPa, $k_h=3,45$ (Groover, 1997).

$$TS = k_h \times HB. \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Correlación resistencia a la tracción-dureza

(Fuente: Groover M., 1997)

1.10. Costos en Soldadura

La estimación de costos en la soldadura puede ser una tarea difícil por las variables involucradas, un acercamiento usado generalmente es la estimación del precio de los materiales, el tiempo de producción, el metal de aporte, gases, depreciación del equipo, etc.

Por lo que los costos de producción en soldadura tienen los siguientes componentes:

- Materia Prima.
- Mano de Obra (directa e indirecta).
- Costo de utilización de maquinaria y equipos.
- Costo de energía.
- Costos de consumibles (Material de aporte, gases, accesorios, fundente, etc.).
- Costos de procesos Complementarios (preparación, corte, biselado, etc.).
- Gastos Generales y otros.

1.10.1. Materia prima y mano de obra:

El costo de la materia prima es muy importante, de tal forma que muchos costos de fabricación se los obtiene a partir del costo de la materia prima.

La mano de obra directa en la soldadura de oleoductos es muy costosa, se tiene que considerar el sueldo del soldador, dependiendo de qué proceso realice en la obra, de tal forma que puede representar la mano de obra y gastos generales hasta el 80% del costo total sin tomar en cuenta materia prima.

1.10.1.1. Tiempo y Mano de Obra

Para determinar los costos de mano de obra se debe basar en los tiempos que toma llevar a cabo la fabricación de la construcción soldada, estos tiempos se agrupan como: **tiempos de arco** que dependen de factores controlados por la fuente de poder y los equipos asociados tales como: velocidad de alimentación, velocidad de avance, tipo de energía a soldar y polaridad, **tiempos de manipulación** que incluye los tiempos de operaciones en el lugar de trabajo como son: recoger piezas, colocarlas en una instalación fija, sujetarlas y posicionarlas antes y durante la soldadura, estos tiempos pueden ser calculados en una estimación con

razonable exactitud solo para aquellas operaciones que son repetitivas, las no repetitivas es mejor incluirlos en tiempos diversos. Por último, los **tiempos diversos** incluyen muchos tiempos no repetitivos, que no son fácilmente determinados, pero deben ser costeados.

Por lo que tomando en cuenta ésta relación de tiempos se crea un concepto que es la razón entre las horas netas de soldadura o “duración del arco” y las horas totales trabajadas, conocido como el factor de operación o **ciclo de trabajo**.

Cuando se eleva la duración del arco a su vez se incrementa la cantidad del metal de aporte depositado en la jornada de trabajo, por lo tanto, se incrementa la eficiencia de la operación de soldadura. De modo contrario, cuando el operador o soldador ocupa más tiempo en actividades tales como cargar accesorios o limpiar piezas, el factor operador puede bajar.

1.10.2. Costo hora de utilización de equipos y maquinaria:

Se representa por el costo de utilización del equipo o maquinaria por unidad de tiempo. Está determinado por el costo del equipo, su depreciación, el tipo de trabajo, el tiempo de vida de la máquina, etc.

Depreciación: Es un reconocimiento racional y sistemático del costo de las máquinas durante su vida útil estimada, con el fin de obtener los recursos necesarios para la reposición de los bienes y además con el fin de que conserve la capacidad operativa y productiva de las máquinas y equipos.

Tiempo de vida útil: Representa el tiempo donde una máquina soldadora permanece productiva y operativa. Depende de los siguientes factores:

- Tipo de Máquina.
- Sitio y condiciones de trabajo.
- Marca del Equipo.
- Tiempo de los proyectos donde trabaja una máquina.
- Condiciones de mantenimiento de la máquina.

1.10.3. Costo de Consumibles

Dentro del costo de consumibles se puede considerar los siguientes costos: materiales de aporte, gases de protección, planchas de refuerzo, etc.

1.10.3.1. Costo de Material de Aporte

El costo de materiales de aporte en la soldadura representa generalmente entre 8% a 15% de los costos totales. El peso del metal de aporte que se usa para ejecutar la soldadura es mayor que el peso del depósito, esto significa que debemos comprar más material de aporte que lo que se deposita debido a las pérdidas en los extremos no quemados, las pérdidas en recubrimientos o escoria, las pérdidas por salpicadura, etc.

1.10.3.2. Costo de Gases de Protección

El costo de los gases de protección depende del proceso que se utilice para la soldadura. Para calcular el gasto de los gases de protección se necesita conocer el flujo, el tiempo de uso, la densidad del gas y además el costo por libra o por kilogramo según sea el caso.

1.11. Costos de Energía

Este tipo de costos se los aplica en electro soldadoras que consumen energía eléctrica, para las electro-soldadoras los costos se basan en el consumo de energía, considerando la potencia con la que se suelda. Se debe considerar de a el costo unitario por kWh.

1.12. Costos Generales

Este tipo de costos incluye el costo de muchas operaciones no directamente asignables al trabajo o a las construcciones soldadas. Las siguientes categorías que van dentro de éstos costos son las siguientes:

- Preparación de Bisel, Limpieza.
- Seguros de vida, seguros médicos, seguridad social, fondo de contribuidores para pensiones de jubilación
- Depreciación o arrendamiento de los equipos de la planta, incluyendo las máquinas de soldar, grúas, equipo de manipulación, etc.

- Impuestos de la planta, planillas de pagos, equipos.
- Luz, agua, calefacción y otros servicios básicos utilizados.
- Costos de herramientas como: llaves de tuerca, martillos de cincelar, porta electrodos, etc.

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo que incluya: costos, defectología y propiedades mecánicas en una tubería API 5L X52. Por lo tanto, en el presente capítulo se detallan cada uno de los procedimientos, equipos, materiales e implementos utilizados tanto para la obtención de cupones soldados como para los ensayos destructivos y no destructivos de los mismos. Además del procedimiento necesario para obtener los costos de soldadura.

2.1. Material Base

El material base utilizado para realizar todas las pruebas correspondientes, es una tubería API 5L X52 cuyas características se especifican a continuación.

2.1.1. Especificación

Las características del material base se especifican en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Especificación del Material Base.

	Norma API
Nivel de Especificación del Producto	PSL1
Grado	X52 (52 [ksi])
Longitud	3 000 [mm] (118,11 pulgadas)
Diámetro	152,4 [mm] (6 pulgadas)
Espesor	7,92 [mm] (0,31 pulgadas)

(Fuente: Propia)

2.1.2. Composición Química

Siendo la tubería API 5L X52 – PSL1, según la Norma API 5L se tiene la siguiente composición química definida en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición Química de la tubería API 5L X52.

Grado	Porcentaje máximo en peso					Otros Niobidio, Vanadio (que no exceda el 0,15%)
	%Carbono	%Manganeso	%Fósforo	%Sulfuro	%Titanio	
X52	0,28	1,40	0,030	0,030	0,04	

(Fuente: API 5L, 2016)

2.1.3. Propiedades Mecánicas

En la Tabla 2.3 se especifican las propiedades mecánicas de la tubería X52 en base a la norma API 5L.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de la tubería API 5L X52.

Grado	Esfuerzo de Fluencia		Esfuerzo Último a la tensión	
	Mínimo		Mínimo	
	[Ksi]	[MPa]	[Ksi]	[MPa]
X52	52	359	66	455

(Fuente: API 5L, 2016)

2.2. Proceso de Obtención de Cupones Soldados

Para la obtención de los cupones soldados se utiliza 3 tipos de procesos principales que son: SMAW, GTAW, FCAW combinados entre ellos, por tal razón se elaboraron cuatro cupones en base a la norma API 1104. Los procesos de soldadura combinados a utilizarse son: SMAW (electrodo E6010 y E7018), SMAW-FCAW, GTAW - SMAW y GTAW-FCAW.

Los parámetros de cada proceso de soldadura, la elaboración de WPS y la obtención en sí de los cupones de soldadura se muestran a continuación.

2.2.1. Parámetros de Procesos de Soldadura

2.2.1.1. Equipo


El equipo utilizado para todos los procesos se detalla a continuación. Para los procesos SMAW y GTAW se utilizó el equipo de la Tabla 2.4 y para el proceso FCAW los equipos de las Tablas 2.4 y 2.5 ya que es un proceso con electrodo continuo (uso de carrete).

Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del equipo de soldadura.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	Lincoln Electric	
Modelo:	Invertec V350-Pro	
Características eléctricas		
Entrada:	Monofásica	
Voltaje de entrada:	220 [V]	
Salida de CD nominal:	350 [A] / 34 [V]	
Rango de circuito:	5 – 425 DC [A]	
Ciclo de trabajo:	60%	
Frecuencia:	60 [Hz]	

(Fuente: Company, 1995)

Tabla 2.5 Especificaciones técnicas del alimentador.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	Lincoln Electric	
Modelo:	LN-7 GMA	
Características eléctricas		
Fuente de poder:	115 [VCA]	
Voltaje de entrada:	220 [V]	
Diámetro del alambre		
Electrodo sólido	0,60 – 1,60 [mm]	
Electrodo tubular	1,2 – 2,0 [mm]	
Velocidad de avance del alambre		
De 1,90 a 17,8 [m/min]		

(Fuente: Propia)

2.2.1.2. Material de Aporte

El material de aporte que se usa en cada proceso se detalla en la Tabla 2.6 y sus catálogos se encuentran en los ANEXOS: I, II, III y IV.

Tabla 2.6 Materiales de aporte para cada proceso.

Proceso	Metal de aporte	Características principales
SMAW	E6010	Composición química y propiedades mecánicas: ANEXO I
	E7018	Composición química y propiedades mecánicas: ANEXO II
FCAW	E71T-1	Composición química y propiedades mecánicas: ANEXO III
GTAW	ER70S-6	Composición química y propiedades mecánicas: ANEXO IV

(Fuente: Propia)

Electrodo de Tungsteno: éste electrodo se usó para el proceso GTAW. Específicamente se utilizó el electrodo EWTh2 (2% Torio), que se detalla en cada WPS que involucra a los procesos GTAW-SMAW y GTAW-FCAW.

Tabla 2.7 Composición química y otras características del electrodo EWTh2 (2% Torio).

Nombre Comercial	%W	%ThO ₂	Otros óxidos o elementos	Diámetro	Color de punta
Electrodo de tungsteno con 2% de Torio	97,3	1,7 – 2,2	0,5	2,4 mm (3/32")	Roja

(Fuente: Indura, 2017)

2.2.2. Parámetros del WPS

Para cada combinación de procedimientos es necesaria la aplicación de un WPS, el cual contiene toda la información indicada en el punto 1.2.3 del presente trabajo. Para el presente trabajo se utilizaron cuatro WPS, mismos que se encuentran en los Anexos V, VI, VII y VIII para los procedimientos: SMAW, SMAW – FCAW, GTAW – SMAW y GTAW – FCAW, respectivamente.

2.2.3. Obtención de Cupones Soldados

La Norma en la cual se basa el presente trabajo es la Norma API 1104, especifica que las dimensiones de los cupones a soldar deben ser de 230 mm (9 pulg), siendo esta lo longitud máxima que se va a usar en los ensayos destructivos y no destructivos. Por lo tanto, en el presente trabajo se utilizaron neplones de 130 mm de longitud para luego ser soldados, estos se obtuvieron como se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 2.1.

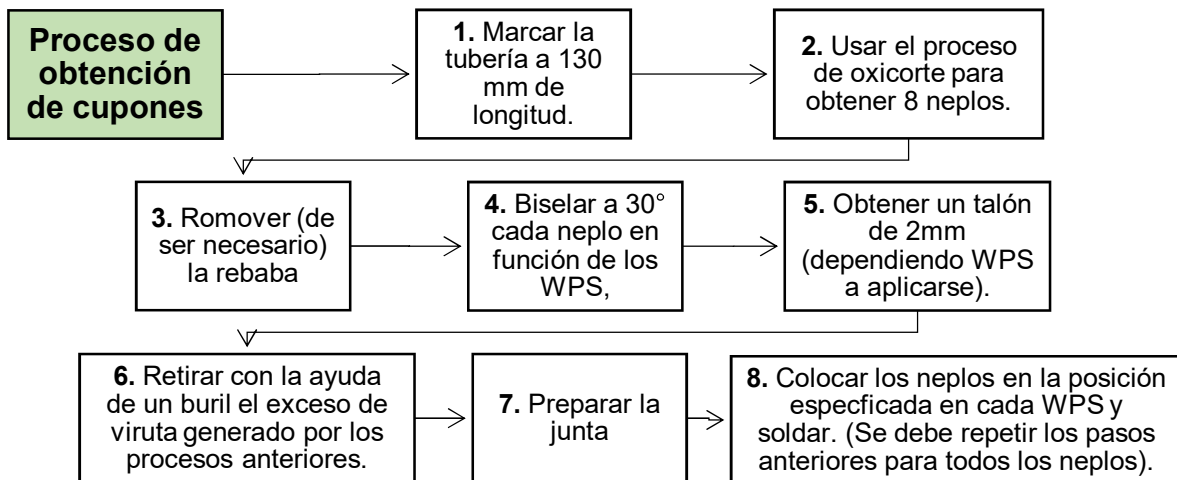


Figura. 2.1 Diagrama de flujo para la obtención de cupones soldados.
(Fuente: Propia)



a)



b)



c)

Figura. 2.2 a) Proceso de oxicorte. b) Proceso de biselado en el torno. c) Posición 6G, especificada en cada WPS.

(Fuente: Propia)

2.3. Ensayos

Para conocer las características del material base, tanto como de los cupones soldados se necesitan realizar ensayos No Destructivos y Ensayos Destructivos.

2.3.1. Probeta del Material Base

Para conocer las especificaciones iniciales o caracterizar nuestro material base, se realiza un ensayo de tracción y un ensayo de composición química.

2.3.1.1. Probeta del Ensayo de Tracción del Material Base

Para el ensayo del material base se utilizó el dimensionamiento descrito en la Norma ASTM E8/E8M, la cual especifica lo siguiente:

El registro de las dimensiones se debe realizar en base al Espécimen 2 de la propia Norma que se muestra en la Figura 2.3:

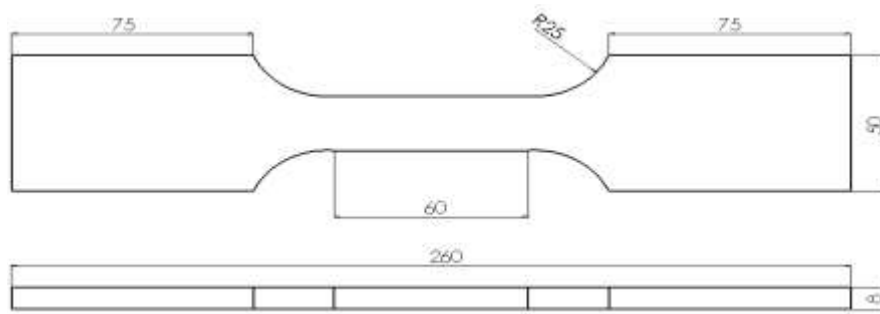


Figura. 2.3 Probeta utilizada en el ensayo de tracción (material base).
(Fuente: Propia, con dimensionamiento basado en ASTM E8/E8M)

2.3.1.2. Composición del Material Base

Para caracterizar al material base y saber cuál es su composición química y a qué grado dentro de la Norma API 5L pertenece la tubería donada para el presente trabajo es necesario realizar el ensayo de chispa.

2.3.1.3. Equipo

Las características técnicas del equipo utilizado para el ensayo de composición química se detallan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.8 Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de composición.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	BRUKER	
Modelo:	Q2 ION	
Características eléctricas		
Entrada:	Monofásica	
Voltaje de entrada:	100 – 240 [V]	
Frecuencia:	50/60 [Hz]	
Características de espectro		
Cobertura del espectro:	170 – 411 [nm]	
Chispa y arco:	De 10 [μs] a 2 [ms]	
Compensación de ambiente activo:	10 y 45 [°C]	

(Fuente: Loachamin L., Pérez W., 2018)

2.3.2. Ensayos de Cupones Soldados

Parte importante de los ensayos en los cupones soldados son los Ensayos No Destructivos, que en base a la Norma API 1104 son los siguientes: Inspección Visual, Radiografía y Tintas Penetrantes. Para los Ensayos Destructivos, teniendo un diámetro de material base de 6 pulgadas y un espesor de 8mm (0,31 pulgadas), según la norma API 1104, se deben realizar 4 ensayos de cada cupón soldado como se muestra en la Figura 2.4.

Outside Diameter of Pipe		Number of Specimens					
in.	mm	Tensile Strength	Nick Break	Root Bend	Face Bend	Side Bend	Total
Wall Thickness ≤ 0.500 in. (12.7 mm)							
<2.375	<60.3	0 ^b	2	2	0	0	4 ^a
2.375 to 4.500	60.3 to 114.3	0 ^b	2	2	0	0	4
>4.500 to 12.750	>114.3 to 323.9	2	2	2	2	0	8
>12.750	>323.9	4	4	4	4	0	16
Wall Thickness > 0.500 in. (12.7 mm)							
≤4.500	≤114.3	0 ^b	2	0	0	2	4
>4.500 to 12.750	>114.3 to 323.9	2	2	0	0	4	8
>12.750	>323.9	4	4	0	0	8	16
^a One nick break and one root bend specimen are taken from each of two test welds, or for pipe less than or equal to 1.315 in. (33.4 mm) in diameter, one full-section tensile strength specimen is taken.							
^b For materials with SMYS's greater than the material specified as API 5L Grade X42, a minimum of one tensile test is required.							

Figura. 2.4 Tipo y número de Probetas de ensayo para Procedimiento de calificación del procedimiento. (Fuente: API 1104, 2016)

2.3.3. Ensayos No Destructivos

Se realizó tres ensayos no destructivos, cada uno con la finalidad de observar que tipos de defectos y discontinuidades se presentaron en la soldadura ya terminada. Los ensayos mencionados anteriormente fueron: inspección visual, tintas penetrantes y radiografía. El ensayo de inspección visual se realizó bajo la tutela del Ingeniero Gabriel Velasteguí, para el ensayo de tintas penetrantes nos basamos en la Norma ASTM E-165 y para el ensayo radiográfico se usó la Norma ASTM E94.

Según la norma API 1104, cuando la fuente radiográfica es externa y a más de 13 mm (½ pulg.) de la superficie de la soldadura, se deberá realizar por lo menos cuatro exposiciones separadas por 90° para el ensayo radiográfico de una soldadura completa (DWE/SWV). Por esta razón cada niple de tubería se divide en cuatro partes desde la A hasta la D.

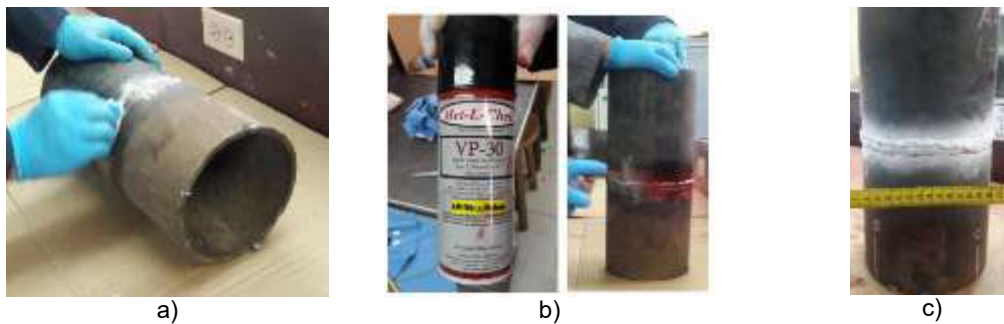


Figura. 2.5 Tintas penetrantes. a) Limpieza de Probeta. b) Aplicación de penetrante. c) Inspección.
(Fuente: Propia)

2.3.3.1. Codificación de cupones

Al tratarse de tres END es necesario utilizar una codificación que permita la identificación adecuada de cada ensayo en los cupones soldados, siendo ésta la que se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Codificación para END.

Procedimiento	Codificación END		
	Inspección Visual	Tintas Penetrantes	Radiografía
SMAW	I1	T1	19 – RXV – RX – 09 – P1
SMAW - FCAW	I2	T2	19 – RXV – RX – 09 – P2
GTAW-SMAW	I3	T3	19 – RXV – RX – 09 – P3
GTAW-FCAW	I4	T4	19 – RXV – RX – 09 – P3

(Fuente: Propia)


2.3.3.2. Radiografía

Fue necesario adecuar la posición y forma de radiografiar los cupones de soldadura, para lo cual se dividió a cada cupón soldado en cuatro partes iguales, con una extensión de película de 17 cm para cada sección, con lo que se aseguró que sea visible el cordón de soldadura y la penumbra no afecte a la identificación de discontinuidades.

2.3.3.2.1. Equipo

El equipo utilizado para radiografía es el que se encuentra en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos (LAB-END), el cual cuenta con un panel de control y un tubo de rayos catódicos, y sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Especificaciones técnicas del equipo radiográfico.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	Balteau	
Modelo:	Baltographe	
Características eléctricas		
Alimentación de la red:	10 [A] / 220 [V] / 2500 [VA]	
Ángulo de haz:	40°	
Frecuencia:	50 [Hz]	
Alto voltaje mínimo útil:	40 [kV]	
Alto voltaje máximo útil:	220 [kV] a 10 [mA]	
Fuente:	3,2 x 3,2 [mm]	

(Fuente: Almeida G., Álvarez G., 2017)



Figura. 2.6 División de tubería en cuatro partes iguales.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.11 se detallan los tiempos de recaldo del equipo radiográfico, propios del Laboratorio de Ensayos No Destructivos.

Tabla 2.11 Tiempos para recaldo del equipo.

Tiempo de parada	Tiempo de permanencia [s]
1 a 8 horas	10
8 horas a 7 días	30
1 a 4 semanas	60
Más de un mes	120

(Fuente: Laboratorio de Ensayos No Destructivos, Equipo Radiográfico)

En la Figura 2.7 se observa el Diagrama de Operación del Equipo Radiográfico, mismo que sirve para determinar el tiempo de exposición de las muestras.

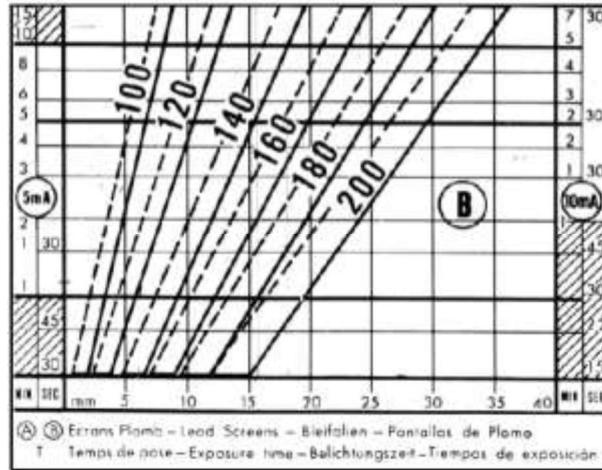


Figura. 2.7 Diagrama de Operación del Equipo Radiográfico.
(Fuente: Propia)

$$t_{exp} = t_c * f_n * f_p * f_D * f_v \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Ecuación del tiempo de exposición

Siendo,

t_c = Tiempo en base al diagrama de operación del equipo de Rayos X.

f_n = Factor de corrección por densidad (1)

f_p = Factor de corrección por película (0,2)

f_D = Factor de corrección por distancia (0,5)

f_v = Factor de corrección por varios (1)



a)



b)

Figura. 2.8 Ensayo Radiográfico. a) Aplicación de IQI. b) Cupón soldado, centrado.
(Fuente: Propia)

2.3.3.2.2. Procedimiento de revelado e inspección.

Una vez listas las películas radiográficas se las lleva al cuarto oscuro en el cual se considera los tiempos de cada parada detallados en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Tiempos para el proceso de revelado.

Proceso	Tiempo
Tina de baño de revelado	5 minutos
Tina de baño de parada	1 minuto
Tina de baño de fijado	10 minutos
Tina de lavado final	1 minuto
Secado de las películas	3 horas o más

(Fuente: Laboratorio de Ensayos No Destructivos, 2019)

Una vez terminado el proceso de revelado, las películas deben ser analizadas en el Negatoscopio e identificar cada tipo de discontinuidad (si existe) y verificar con una regla la distancia a la que se encuentra en cada película revelada.


2.3.3.3. Ensayos destructivos

Según la norma API 1104, con el diámetro de nuestra tubería de 6 pulgadas, se debe realizar 4 ensayos a las probetas soldadas: Ensayo de Tracción (Tensile Strength), Rotura por entalla (Nick Break), Doblado de Raíz (Root Bend), Doblado de Cara (Face Bend). Se explicará la codificación de las probetas para cada proceso y cada ensayo según la norma API 1104.

2.3.3.3.1. Corte de probetas

Para el corte de las probetas utilizadas en cada ensayo se utilizó la tronzadora industrial con enfriamiento de agua con la que cuenta el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla. Las dimensiones de cada probeta, en base a la Norma API 1104 fueron de 25 mm de ancho. Fueron cortadas 8 probetas de cada cupón soldado; es decir, 32 probetas para los ensayos mecánicos y 5 para el ensayo de metalografía. Las características del equipo utilizado para el corte de las probetas se detallan en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Especificaciones técnicas de la tronzadora.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	W. J. SAVAGE CO. ING	
Modelo:	SN-10 10T86-199	
Voltaje:	220 [V]	
Amperaje:	26 [A]	
Frecuencia:	50 [Hz]	
Potencia del motor:	10 [HP]	

(Fuente: Propia, 2019)

2.3.3.3.2. Codificación de probetas

El proceso de obtención de las probetas de ensayo para cada cupón soldada se realiza como se observa en la Figura 2.9.

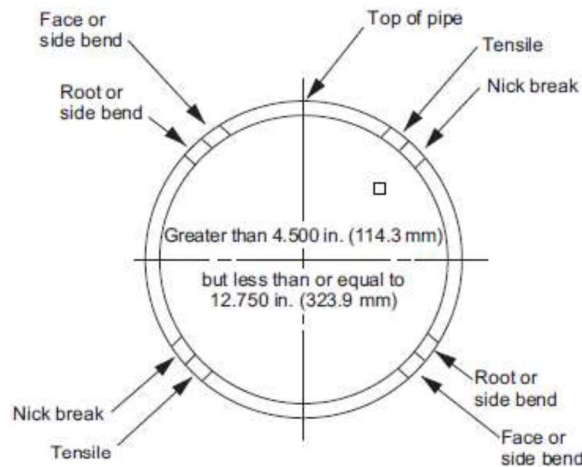


Figura. 2.9 Ubicación de probetas de soldadura a tope para el test de calificación de procedimiento (Fuente: API 1104, 2016)

La codificación fue la siguiente: a cada cupón soldado se le designa las letras P1, P2, P3 y P4, dependiendo de cada proceso de soldadura utilizado que se detalla en la Tabla 2.14. A cada ensayo mecánico se le designa letras, desde la V hasta la Z en orden y cada probeta se le da el número 1 o 2 al lado derecho de la letra. La codificación queda de la siguiente manera:

- Para los cupones soldados:

Tabla 2.14 Codificación para cupones soldados.

Procedimiento realizado en el cupón	Codificación
SMAW E6010 y E7018	P1
SMAW – FCAW	P2
GTAW – SMAW	P3
GTAW – FCAW	P4
GTAW – FCAW	P5

(Fuente: Propia)

- El cupón soldado **P5** tiene la misma combinación de **P4**, con la finalidad de que este último sea reemplazado, ya que debido a la cantidad de discontinuidades que presentaba se rechazó. Dichas discontinuidades se presentan en los informes de Ensayos No Destructivos, en los ANEXOS XI y XII. Es decir, que todos los ensayos correspondientes a **P4** en realidad son del nepló que lo reemplazó, **P5**.
- Para los Ensayos Mecánicos se utiliza la siguiente codificación: tracción: V, rotura por entalle: W, Doblado de raíz: X y doblado de cara: Y.

La codificación de los ensayos mecánicos se presenta en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15 Codificación de probetas para ensayos.

	Cupones soldados				
	P1	P2	P3	P4	
Ensayos Mecánicos	V	P1V1	P2V1	P3V1	P4V1
		P1V2	P2V2	P3V2	P4V2
	W	P1W1	P2W1	P3W1	P4W1
		P1W2	P2W2	P3W2	P4W2
	X	P1X1	P2X1	P3X1	P4X1
		P1X2	P2X2	P3X2	P4X2
	Y	P1Y1	P2Y1	P3Y1	P4Y1
		P1Y2	P2Y2	P3Y2	P4Y2

(Fuente: Propia)

- Para Metalografías

La codificación utilizada para el ensayo metalográfico se presenta en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16 Codificación para Metalografías.

Procedimiento	Codificación
Material Base	PBM
SMAW E6010 y E7018	P1M
SMAW – FCAW	P2M
GTAW – SMAW	P3M
GTAW – FCAW	P4M

(Fuente: Propia)

2.3.3.3.3. Ensayo de Tracción (Tensile Strength)

La finalidad de este ensayo es reconocer la resistencia máxima a la tracción de la soldadura, para ser comparada con la resistencia tanto teórica como experimental del material base.

2.3.3.3.3.1. Probetas

Las dimensiones se basan en las especificadas en la Norma API 1104. Este código establece que las dimensiones de las probetas son de 230 mm de longitud y de un ancho de 25 mm, como se observa en la Figura 2.10.

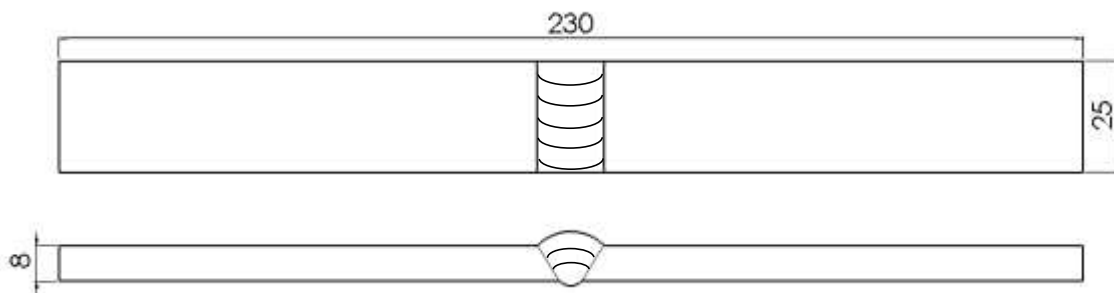


Figura. 2.10 Dimensiones, probeta de ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

2.3.3.3.3.2. Equipo

El equipo utilizado para este ensayo, es la máquina universal de ensayos del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional, cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17 Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	Tinius Olsen	
Modelo:	L	
Capacidad de carga:	3000 [kN]	
Dimensiones:	1016 x 915 x 788	
Velocidad de ensayo	0 – 76 [mm/min]	

(Fuente: Propia)

2.3.3.3.3. Procedimiento

Se verifica que la máquina se encuentre en la posición inicial (dos manillas en cero) y se coloca la probeta en las mordazas tipo cuña. Encerar la carga y proceder con el ensayo de tracción presionando la manija de sujeción de las mordazas hasta que se produzca la falla de la probeta.

2.3.3.3.4. Ensayo de Rotura con Entalle (Nick Break)

Al igual que el ensayo de tracción, éste permite medir la resistencia de la soldadura con la diferencia de tener un concentrador de esfuerzos que provoca la falla de la probeta en el cordón de soldadura.

2.3.3.3.4.1. Probetas

En base a la Norma API 1104, los especímenes para este ensayo tienen las siguientes dimensiones: 230 mm de longitud y 25 mm de ancho. Se realizó la entalla en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas con una limadora. Todas las dimensiones se pueden observar en la Figura 2.11.

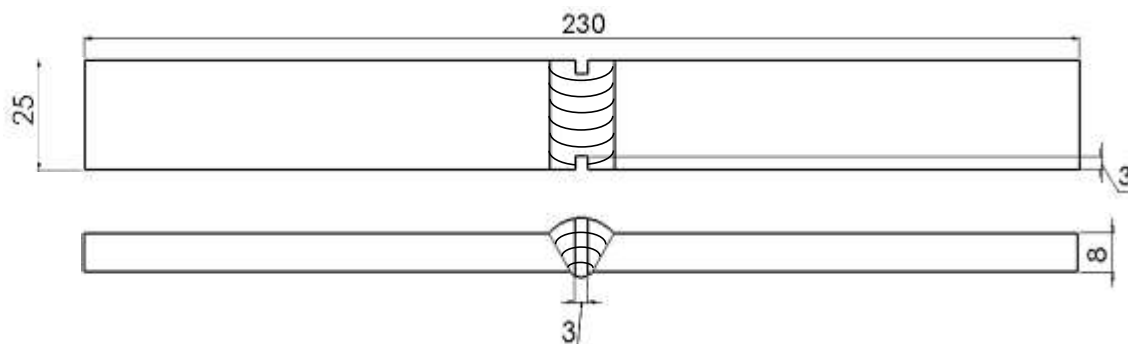


Figura. 2.11 Dimensiones, probeta de ensayo nick break.
(Fuente: Propia)

2.3.3.3.4.2. Equipo

Las especificaciones técnicas del equipo utilizado para el ensayo nick break se detalla en la Tabla 2.17.

2.3.3.3.4.3. Procedimiento

El procedimiento es el mismo al del ensayo de tracción, detallado en el punto 2.3.3.3.3.3.

2.3.3.3.5. Ensayo de Doblado de Cara (Face Bend) y Doblado de Raíz (Root Bend)

Este ensayo tiene como finalidad evidenciar discontinuidades presentes en el cordón de soldadura tanto en la superficie (cara) como en la base de la soldadura (raíz) y probar la ductilidad del material del cordón de soldadura.

2.3.3.3.5.1. Probetas

Las probetas se obtuvieron con el proceso detallado en el punto 2.3.3.5.1. y bajo las especificaciones de la Norma API 1104, como se observa en la Figura 2.12.

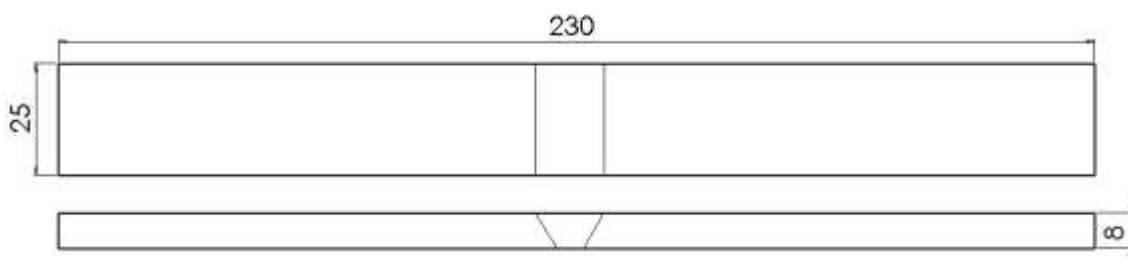


Figura. 2.12 Dimensiones, probeta de ensayo de doblado.
(Fuente: Propia)

2.3.3.3.5.2. Equipo

El equipo utilizado en este ensayo es del Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18 Especificaciones técnicas de la máquina de doblado guiado.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	S/N	
Modelo:	S/N	
Voltaje:	220 [V]	
Potencia del motor:	2 [Hp]	
Frecuencia:	60 [Hz]	
Sistema de carga:	Hidráulico	
Velocidad:	Variable	

(Fuente: Propia)

2.3.3.3.5.3. Procedimiento

El procedimiento del ensayo de doblado de cara y raíz se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 2.13.

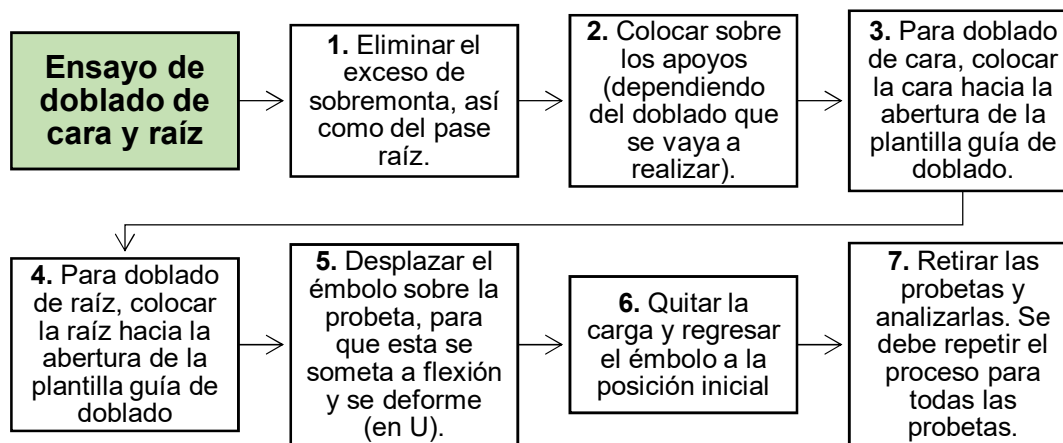


Figura. 2.13 Diagrama de flujo del ensayo de doblado de cara y raíz.

(Fuente: Propia)

2.3.3.3.6. Metalografía

Las metalografías que se realizan en el presente trabajo tienen como finalidad observar la zona afectada por el calor en los 4 procedimientos de soldadura, y observar si existió algún cambio de microestructura al realizarse la soldadura en la tubería API 5L X52.


2.3.3.3.6.1. Probetas

Las probetas fueron cortadas de cada cupón con una distancia de 8 mm a cada lado del cordón de soldadura con la finalidad de ser montadas en un soporte capaz de ingresar en cada cavidad de la máquina automática de pulido.

2.3.3.3.6.2. Equipo

Las características de los equipos utilizados en este ensayo se detallan en las Tablas 2.19, 2.20 y 2.21.

Tabla 2.19 Especificaciones técnicas de la máquina de desbaste grueso.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	BUEHLER LTD	
Modelo:	Metallurgical Apparatus	
Características eléctricas		
Voltaje:	220 [V]	
Amperaje:	8,2 [A]	
Potencia:	3 [Hp]	
Velocidad:	1720 [rpm]	
Frecuencia:	60 [Hz]	
Dimensiones		
95 x 67 x 71 [cm]		
Peso neto		
75 [Kg]		

(Fuente: Propia)

Tabla 2.20 Especificaciones técnicas de la máquina de desbaste automática.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	Metkon	
Modelo:	FORCIMAT-FORCIPOL 2V	
Características eléctricas		
Voltaje:	220 [V]	
Amperaje:	8,2 [A]	
Potencia:	150/600 [W]	
Velocidad:	50 – 600 [rpm]	
Frecuencia:	50/60 [Hz]	
Dimensiones		
95 x 69 x 70 [cm]		
Peso neto		
25 – 75 [Kg]		

(Fuente: Propia)

Tabla 2.21 Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico invertido.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	OLYMPUS	
Modelo:	GX41F	
Características		
Voltaje:	110 [V]	
Software:	STREAM ESSENTIALS	
Enfoque:	Manual	
Visualización:	Binocular	
Iluminación:	Luz halógena de 30 [W]	
Rango de magnificación:	5X, 10X, 20X, 50X, 100X, 500X	



a)



b)

Figura. 2.14 Tratamiento de probetas. a) Desbaste grueso de probeta montada. b) Pulido de probetas en máquina automática.

(Fuente: Propia)

2.3.3.3.7. Ensayo de dureza

Para el presente trabajo, y luego de realizado el ensayo de tracción al material base se obtuvieron los siguientes resultados: resistencia mínima a la tracción 503,5 MPa, mismos que ayudaran a realizar la comparación con cada uno de los procesos de soldadura realizados en la tubería API 5L X52.

$$HB = \frac{503,5}{3,45} = 145,942 HB \approx 80 HRB \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Cálculo de dureza teórica mínima de la tubería API 5L X52.

2.3.3.3.7.1. Equipo

El equipo utilizado en el ensayo de dureza, se detalla a continuación en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22 Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	DUROTWIN	
Modelo:	Mitutoyo DT-10	
Indentadores:	Punta de 1/16" Cono de diamante	
Peso:	60 [Kg]	
Capacidad de carga:	60 [kgf] 100 [kgf] 150 [kgf]	
Dimensiones:	70 x 79 x 21,5	

(Fuente: Propia)

2.3.3.2.7.2 Procedimiento del ensayo de dureza

El procedimiento de este ensayo se detalla a continuación en el diagrama de flujo de la Figura 2.15.

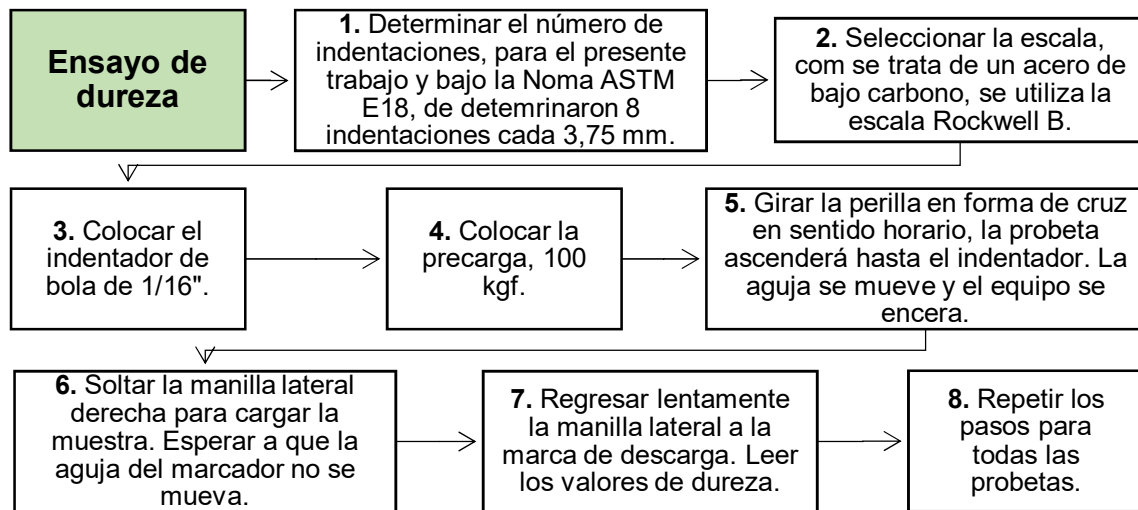


Figura. 2.15 Diagrama de flujo del ensayo de dureza.
(Fuente: Guía de procedimiento, Laboratorio de desgaste y falla de materiales)

2.4. Costos de Soldadura

A continuación, se explica la metodología para determinar los costos de soldadura. El procedimiento descrito a continuación se debe usar para los cuatro cupones soldados anteriormente. Se miden los tiempos de todas las operaciones.

2.4.1. Costos de Mano de Obra (CMO) y Materia Prima (CMP)

Para la determinación de los costos de mano de obra se tomaron los siguientes datos:

- Tiempo de arco, siendo la suma de todos los tiempos mientras el arco se mantiene entre el material de aporte y el material base. Dentro de estos tiempos no se debe incluir los tiempos de otras actividades realizadas en el lugar de trabajo.
- Tiempo de operación, el cual contiene a todos los tiempos que se demora el soldador en realizar la soldadura incluidos los tiempos de limpieza, entre otros.
- Tiempos adicionales o de otras actividades, aquellos en los que el operador cambió de electrodos, utilizó moladora, utilizó grata, etc.

El costo de la materia prima es el costo final al consumidor del material que se va a utilizar; es decir, es el costo final tomando en cuenta todos los procesos que la materia prima ha debido pasar para ser útil en el proceso de soldadura.

2.4.1.1. Ciclo de trabajo

Para la determinación del ciclo de trabajo se siguieron los siguientes pasos:

- Medir todos los tiempos de arco.
- Sumar todos los tiempos de arco, para obtener un solo tiempo de arco.
- Medir todos los tiempos de operación.
- Sumar todos los tiempos de operación.

Obtener el tiempo de ciclo de trabajo utilizando la fórmula:

$$Ct = \frac{ta}{tto} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Ecuación de determinación del ciclo de trabajo (Criollo, 2011)

Donde:

ta = Tiempo de arco

tto = Tiempo total de operación

De igual manera se puede hacer uso de la Tabla 2.23 si no se tienen los tiempos:

Tabla 2.23 Ciclo de trabajo de procesos de soldadura.

Proceso	Ciclo de trabajo [%]
Electrodo Manual	5-30
MIG Sólido	10-60
MIG tubular	10-60
TIG	5-20

(Fuente: Criollo, 2011)

Para calcular el costo de la mano de obra en dólares por metro, se hace de la siguiente manera:

$$CMO \left[\frac{USD}{m} \right] = SS \left[\frac{USD}{h} \right] * tarco \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Determinación del Costo Mano de Obra

Donde:

CMO = Costo mano de obra

SS = Sueldo del soldador u operador de soldadura

tarco = Tiempo de arco

La tarifa de pago por hora al soldador se puede incluir en la fórmula anterior, pero en la mayoría de las compañías se sectoriza la tarifa de pago para cubrir las prestaciones, como el costo de seguro, vacaciones, días festivos, etc. Por lo que se determina de acuerdo a la contabilidad de cada compañía. En el presente trabajo se considera el sueldo del soldador como \$900 mensuales.

2.4.1.2. Costo de Equipos y Maquinaria

El tipo de depreciación más utilizado en ingeniería es la lineal, el cual considera que la máquina desgasta igual durante cada período contable, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Da [USD] = \frac{Ci - Vd}{tu} \quad \text{Ec.(2.5)}$$

Ecuación para determinar la depreciación

Donde,

Da = Depreciación anual en dólares

Ci = Costo inicial en dólares

Vd = Valor de desecho en dólares

Tu = Tiempo de vida útil en años

Para determinar el costo hora de las máquinas soldadoras se determina de la siguiente manera:

$$Cu \left[\frac{USD}{hora} \right] = \frac{Da * 1 \text{ año} * 1 \text{ día}}{365 \text{ días} * 3 \text{ horas}} \quad \text{Ec.(2.6)}$$

Costo hora de la máquina soldadora

Las 3 horas en la ecuación nos hace referencia al ciclo de servicio, donde se especifica que la máquina soldadora no puede trabajar más de 3 horas seguidas.

2.4.2. Costo de Consumibles

En los procesos utilizados, los consumibles a los que nos referiremos serán: materiales de aporte y gases de protección. A continuación, se detalla el cálculo de los dos costos mencionados anteriormente.

2.4.2.1. Costo de Materiales de Aporte (CMA)

Para la determinación de estos costos de materiales de aporte se siguen los siguientes pasos:

- Determinar cuáles son los materiales de aporte de acuerdo al estudio del presente trabajo. Al ser un trabajo comparativo de cuatro procedimientos de soldadura, tenemos: Electrodo: E6010, E7018 y ER70S-6, Alambre: E71T-1.
- Cotizar los diferentes materiales de aporte, en casas comerciales de la ciudad de Quito.

El peso total del metal de aporte que se compra para la soldadura siempre debe ser mayor al peso del depósito del metal, por lo que se debe comprar más metal de aporte por las pérdidas que se generan como: la escoria, pérdidas por salpicadura, etc.

Para obtener resultados exactos se debe medir el rendimiento del electrodo a usar, por lo que el costo del electrodo se obtiene de la siguiente manera.

$$CMA [USD] = PU \left[\frac{USD}{kg} \right] \times PDS \left[\frac{kg}{m} \right] * R. (\%) * Pe [m] \quad \text{Ec.(2.7)}$$

Ecuación para determinar el costo del material de aporte

Donde,

PU = Precio unitario del electrodo por kilogramo

PDS = Peso del Metal depositado

R = Rendimiento del material de aporte

Pe = Perímetro de la tubería

Para conocer la cantidad del metal de soldadura depositado se necesita calcular la sección transversal que ocupa este metal depositado y se puede determinar mediante cálculos geométricos, para una junta con ranura en V simple, con talón (Figura 2.16) y sin talón (Figura 2.17), se calcula como se indica a continuación:

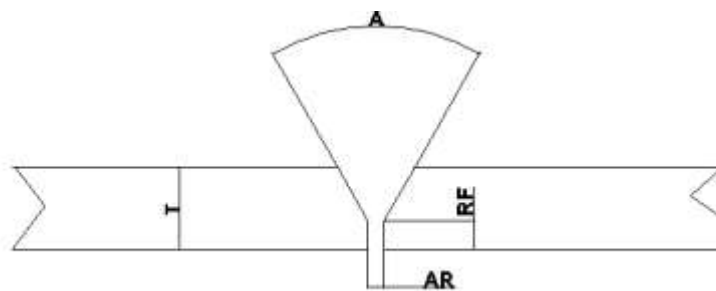


Figura. 2.16 Ranura en V simple con talón

(Fuente: Propia)

$$CSA = (T - RF)^2 * \tan\left(\frac{A}{2}\right) + AR * T \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Ecuación de determinación del área transversal (Criollo, 2011)

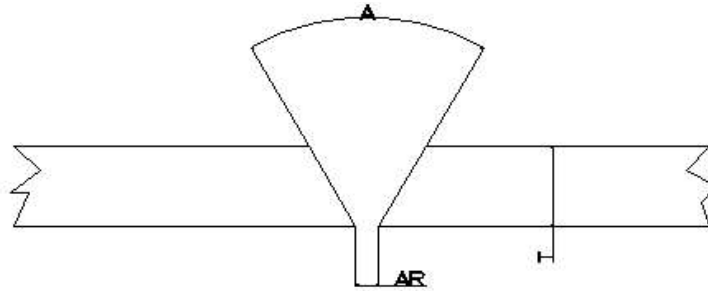


Figura. 2.17 Ranura en V simple sin talón
(Fuente: propia)

$$CSA [cm^2] = (T)^2 * \tan\left(\frac{A}{2}\right) + AR * T \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Ecuación de área de sección transversal sin talón (Criollo, 2011)

Donde:

CSA= Área de la sección transversal

T = Espesor

RF = Cara de soldadura (talón)

A = Ángulo de bisel

AR = Abertura de raíz

Por lo tanto, el metal depositado se calcula de la siguiente manera:

$$PDS \left[\frac{kg}{m} \right] = CSA [cm^2] * \rho_m \left[\frac{kg}{cm^3} \right] * 100 \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Ecuación de Peso del metal depositado

Donde:

PDS = Peso del metal depositado

CSA = Área de la sección transversal

ρ_m = Densidad del metal de aporte

Para obtener el costo del material de aporte, se utiliza la Ecuación 2.10. multiplicada por la longitud total del perímetro donde se deposita el metal de aporte. A las soldaduras que tienen

bisel se les añade un valor del 10%, estas cantidades son arbitrarias, pero para la mayoría de los cálculos son bastante exactas. La eficiencia de aportación se muestra en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24 Eficiencia de aportación.

Proceso	Eficiencia de aportación [%]
Electrodo Manual	68
MIG Sólido	90
MIG tubular con Protección	83
MIG tubular sin Protección	79
TIG	85
FCAW	92

(Fuente: Criollo, 2011)

2.4.2.2. Costo de Gases de Protección

Para conocer el costo de los gases, se realiza un cálculo simple. Se debe conocer el tiempo de utilización del gas, el flujo de gas utilizado y el costo del gas por litro en el mercado. Por lo que se tiene el siguiente cálculo:

$$CGU[USD] = FG \left[\frac{l}{min} \right] \times t_{gas}[min] \times PG \left[\frac{USD}{l} \right] \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Ecuación Costo del Gas utilizado. (Criollo, 2011)

Donde:

CGU = Coto del Gas utilizado

FG = Flujo del gas usado en la soldadura

t_{gas} = Tiempo de utilización del gas usado en la soldadura

PG = Precio del gas por litro usado

Si no se conoce el precio por litros (PG) directamente se debe utilizar los factores de conversión necesarios, conociendo la densidad de los gases, como los utilizados en nuestros procesos, detallados en la Tabla 2.25.

Tabla 2.25 Densidad de gases utilizados.

Gas	Densidad [kg/m ³]
Argón	1,784 kg/m ³ = 0,001784 kg/lit
CO ₂	1,976 kg/m ³ = 0,001976 kg/lit

(Fuente: Wikipedia, 2019)

2.4.3. Costo de la Energía y Eficiencia de las Fuentes

Para el costo de energía eléctrica es necesario considerar parámetros como: voltaje y corriente de soldadura, costo de energía [W-h], la eficiencia de la fuente de poder y el tiempo de soldadura.

$$P = V * I \left[\frac{J}{s} \right] \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Ecuación de Potencia

$$CEE[\text{USD}] = TE \left[\frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \right] * P [\text{kW}] * \text{tsoldadura} [h] * EFE \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Costo de energía eléctrica por metro

Donde,

P = Potencia

V = Voltaje

I = Intensidad

TE = Tarifa eléctrica

tsoldadura = Tiempo de soldadura expresado en horas.

EFE = Eficiencia Energética

La tarifa eléctrica (TE) que se maneja es según el sector donde se use en el Ecuador, para eso se utiliza el Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución Codificado. Además, la eficiencia energética de la máquina (EFE) es del 50% (Lawrence Doyle, 2010)

2.4.4. Costos Generales

Para los costos generales en el presente trabajo se consideran: limpieza, preparación del bisel, entre otros. Se consideran los tiempos en los que se realiza cada operación y se las multiplica por el costo/hora del salario del soldador de la siguiente manera:

$$CG = tg * SS \quad \text{Ec. (2.14)}$$

Ecuación Costos Generales

Donde:

CG = Costos generales

tg = Tiempo de operación

SS = Sueldo del soldador

2.4.5. Costo Total

Los costos totales de soldadura son la suma de todos los costos mencionados anteriormente. Como se indica en la Ecuación 2.15.

$$\text{Costo total de soldadura [USD]} = CMP + CMO + Cu + CMA + CGU + CEE + CG \quad \text{Ec.(2.15)}$$

Ecuación de costo total.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los puntos tratados en la metodología con respecto al material base y a los cupones soldados con los procesos nombrados anteriormente. Estos resultados tienen su respectivo análisis para la validación y comparación de sus procedimientos.

3.1. Resultados de caracterización del material base

Para la caracterización del material base se realizaron los ensayos: mecánicos, composición química y de microestructura que se presentan a continuación.

3.1.1. Tracción del material base

Los resultados que se presentan en la Tabla 3.1 se obtuvieron al realizar el ensayo de tracción al material base con el fin de determinar su resistencia máxima a la tracción. En dicho ensayo se utilizaron dos probetas del material base y en el ANEXO IX se detalla el informe del ensayo realizado.

Tabla 3.1 Resultados del Ensayo de Tracción al material base.

Id.	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	Lbf	N	ksi	MPa	Ksi	MPa	
M18.033.01	9 843	43 785	63,4	437,1	73,4	505,4	29,7
M18.033.02	9 752	43 378	64,4	443,9	72,9	501,6	31,8

(Fuente: Propia)

3.1.2. Composición química del material base

En base al Ensayo de Composición del material base, el resultado obtenido para la composición química se presenta en la Tabla 3.2 cuyo informe se encuentra detallado en el ANEXO X

Tabla 3.2 Composición Química del material base.

Componente	M1%
Carbono (C)	0,140
Silicio (Si)	0,237
Manganeso (Mn)	0,352
Fósforo (P)	0,019
Azufre (S)	0,014
Niquel (Ni)	0,028
Cobre (Cu)	0,0091
Aluminio (Al)	0,015
Cobalto (Co)	0,0035
Hierro (Fe)	99,18

(Fuente: Propia)

3.1.3. Dureza del Material Base

Como se observa en la Figura 3.1 se realizaron 7 indentaciones. Los resultados y el promedio de la dureza se presentan en la Tabla 3.3.



Figura 3.1 Probeta del material base.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.3 Resultados del barrido de dureza al material base.

Indentación	Escala [HRB]	Tiempo [s]
1	78	16,71
2	78	18,51
3	80	17,30
4	80	17,47
5	81	15,85
6	78	17,51
7	79	15,92
Promedio	79,14	17,04

(Fuente: Propia)

3.1.4. Ensayo Metalográfico del Material Base

Las metalografías del material base fueron obtenidas sin ataque a un aumento de 100X. Las micrografías del material fueron atacadas con Nital al 2%, a 100X y 500X. Las micrografías obtenidas se encuentran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Micrografías del material base.

Identificación	Amplificación	Observación	Imagen
MB (Sin ataque Químico)	100X	Presencia de inclusiones no metálicas	
MB (Atacada)	100 X	Matriz ferrítico-perlítica	
MB (Atacada)	500X	Se puede observar con más claridad, la composición ferrítico - perlítica. Ferrita (Blanco) Perlita (negro-café)	

(Fuente: Propia)

3.2. Resultados de la soldadura



A continuación, se detallan los resultados de: inspección visual, tintas penetrantes, radiografía, ensayos de tracción, Nick break, doblado de raíz y cara, metalografías, dureza en la soldadura y finalmente costos de las probetas soldadas.




3.2.1. Resultado de ensayos no destructivos

3.2.1.1. Resultados de inspección visual

La inspección fue realizada en conjunto con la supervisión del Ing. Gabriel Velasteguí, en la misma se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Inspección visual a cupones soldados.

Id. Cupón soldado	Procesos	Esquema	Observaciones
I1	SMAW 6010/7018		<ul style="list-style-type: none"> • Cordon homogéneo. • Existe la presencia de discontinuidades. • Buena penetración. • Tomando tres medidas del ancho de cordón se tiene: 10,2 mm; 12,4 y 14,6 dando un promedio de 12,4 mm.
I2	SMAW 6010-FCAW		<ul style="list-style-type: none"> • Cordon homogéneo. • En ciertas secciones presenta unas ligeras olas no uniformes, indicativo de un cambio en el voltaje. • En ciertas zonas presenta exceso en la sobremonta. • Presencia de mordeduras superficiales en el pase final. • Buena penetración. • Midiendo el ancho del cordón en tres posiciones diferentes se tiene: 14,8 mm; 13,7 mm y 15 mm dando un promedio de 14,5 mm.







I3	GTAW-SMAW 7018		<ul style="list-style-type: none"> • Cordón de soldadura con buena apariencia superficial. • Presencia de discontinuidades. • Buena penetración y sobremonta. • Tomando tres medidas del ancho del cordón se tiene: 12,9 mm; 12,7 y 13,1 dando un promedio de 12,9 mm.
I4	GTAW-FCAW		<ul style="list-style-type: none"> • Cordón irregular. • No existe una apariencia de olas uniformes que es lo adecuado. • Posible existencia de poros en ciertas zonas que deben ser verificados con otros ensayos no destructivos. • Sobremonta excesiva en ciertas zonas. • Tomando tres medidas del ancho del cordón se obtuvo lo siguiente: 14 mm; 13,4 mm y 13,25 mm dando como promedio 13,55 mm.
I5	GTAW-FCAW		<ul style="list-style-type: none"> • Presenta mejor apariencia (aunque aún irregular) que en el cupón I4. • Mordedura superficial entre pases. • Mordeduras en varias zonas del cordón. • Se tomaron tres medidas del ancho del cordón teniendo: 16,35 mm; 18,35 y 17,2 mm dando como promedio 17,3 mm.

(Fuente: Propia)

3.2.1.2. Resultados de tintas penetrantes



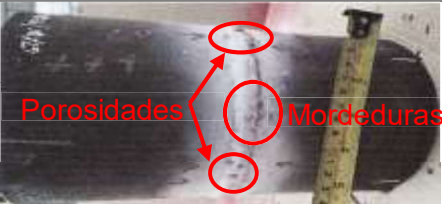
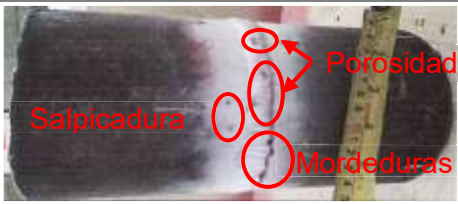
Los resultados obtenidos en cada uno de los cupones soldados se presentan en el ANEXO XI. A continuación, se presentan los resultados más representativos en cada cupón soldado. En la Tabla 3.6 se presenta un resumen de cada probeta en función de su nomenclatura.

Tabla 3.6 Resumen del Ensayo de Tintas Penetrantes.

Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
T1	SMAW 6010-7018 (Manual)	<ul style="list-style-type: none"> Sección A: porosidades. Sección B: una mordedura.
Esquema de la pieza		
Sección A		Sección B
		
Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
T2	SMAW 6010 / FCAW (Outershield)	<ul style="list-style-type: none"> Sección C: porosidades. Sección D: porosidades, además de mordeduras.
Esquema de la pieza		
Sección C		Sección D
		
Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
T3	GTAW / SMAW 7018	<ul style="list-style-type: none"> Sección B: salpicaduras en el material base y una porosidad. Sección C: porosidades.
Esquema de la pieza		
Sección B		Sección C
		

Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
T4	GTAW / FCAW (Outershield)	• Todas las secciones presentan porosidades y mordeduras.

Esquema de la pieza

Sección A	Sección B
	
Sección C	Sección D
	

Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
T5	GTAW / FCAW (Outershield)	<ul style="list-style-type: none"> • Sección A: un poro y mordeduras. • Sección B: una porosidad además de mordeduras.

Esquema de la pieza

Sección A	Sección B
	

(Fuente: Propia)

3.2.1.3. Resultados de radiografía

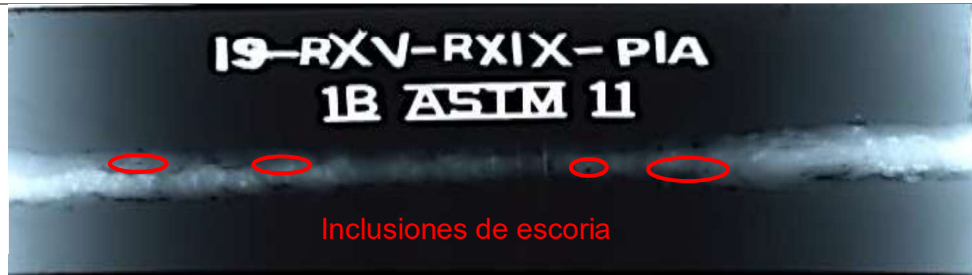
Los resultados obtenidos en el informe del ensayo radiográfico se detallan en el ANEXO XII y a continuación en la Tabla 3.7 se presenta un resumen de los indicadores más representativos en los cupones.

Tabla 3.7 Resumen del Ensayo Radiográfico.

Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
P1	SMAW 6010-7018 (Manual)	<ul style="list-style-type: none"> Secciones A y B: inclusiones de escoria, poros tipo gusano y nidos de poros.

Esquema de la pieza

Sección A



Sección B



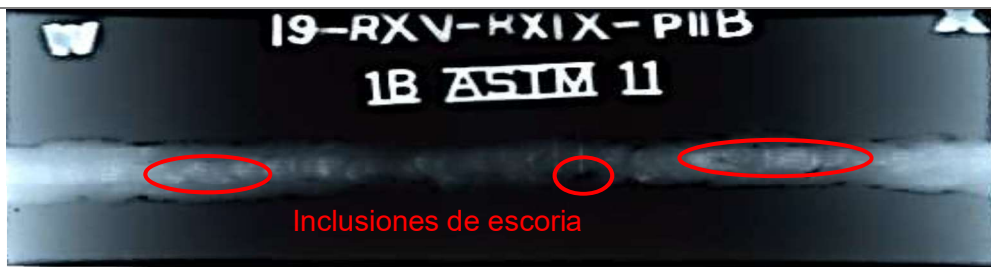
Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
P2	SMAW 6010 / FCAW (Inershield)	<ul style="list-style-type: none"> Todas las secciones presentan inclusiones de escoria Sección C: mordeduras.

Esquema de la pieza

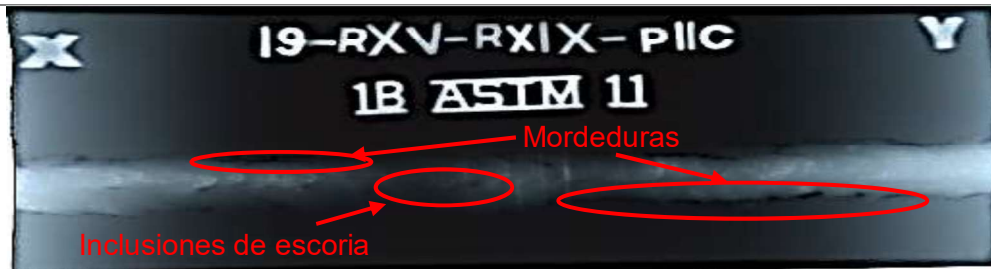
Sección A



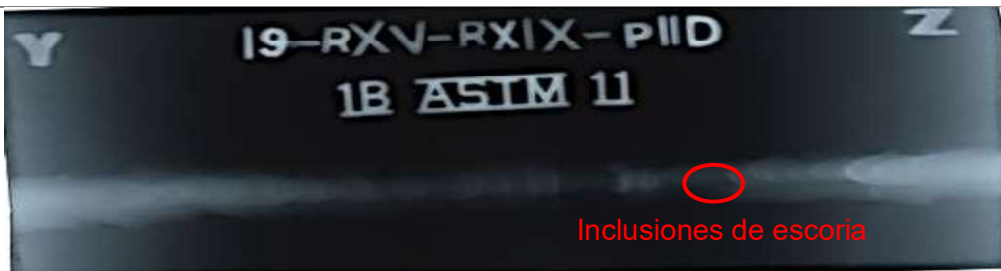
Sección B



Sección C



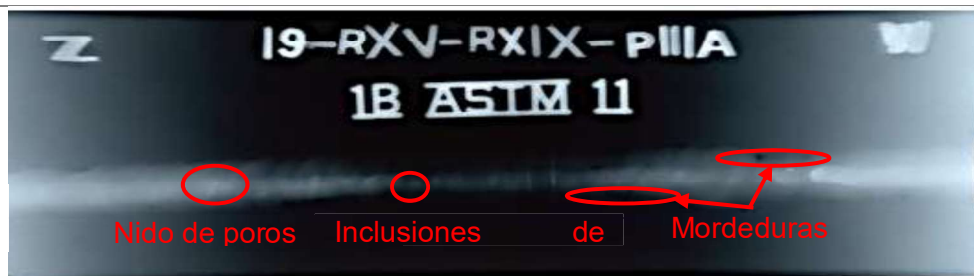
Sección D



Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
P3	GTAW / SMAW 7018	<ul style="list-style-type: none"> Todas las secciones presentan inclusiones de escoria. Sección A: nido de poros y mordeduras.

Esquema de la pieza

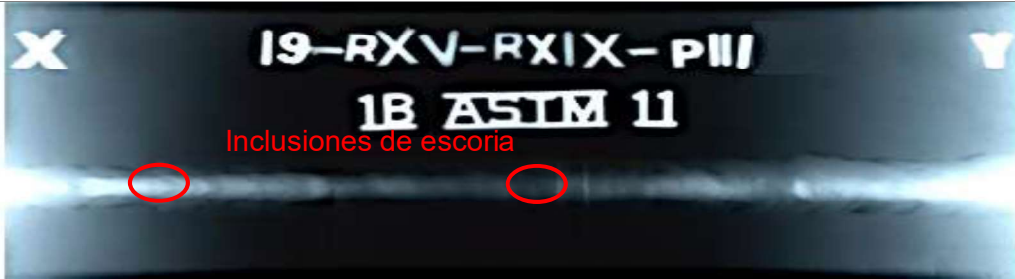
Sección A



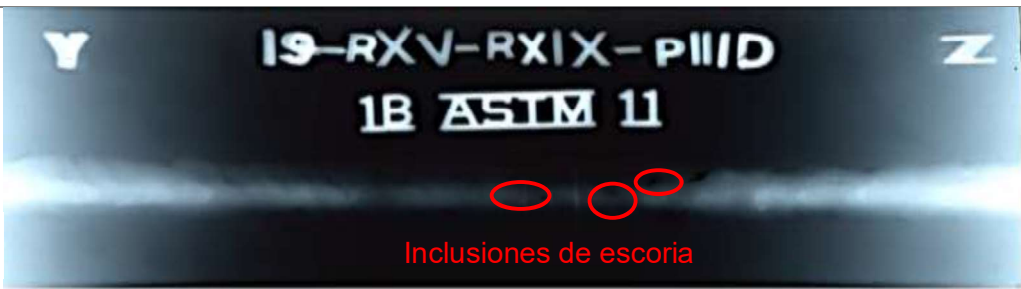
Sección B



Sección C



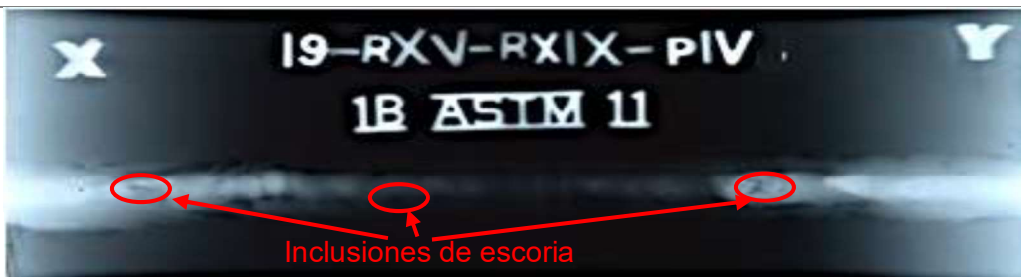
Sección D



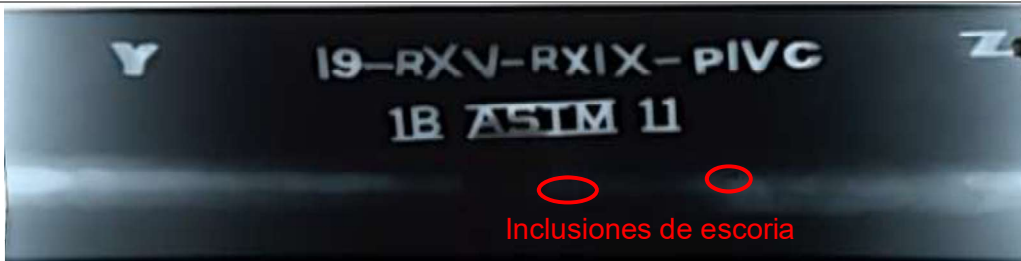
Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
P4	GTAW / FCAW (Inershield)	<ul style="list-style-type: none"> Todas las secciones presentan inclusiones de escoria. Sección C: porosidades.

Esquema de la pieza

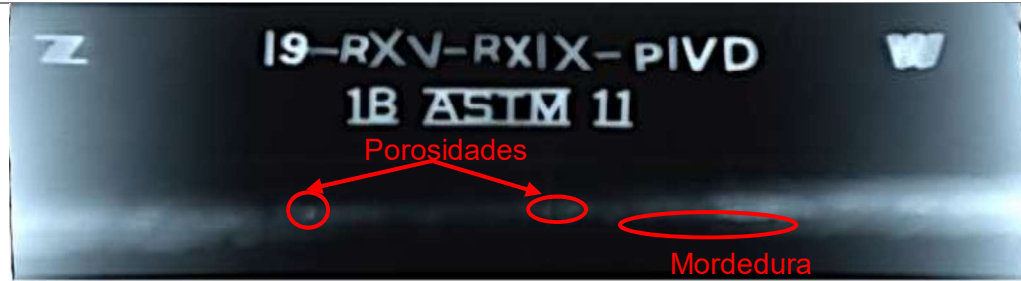
Sección A



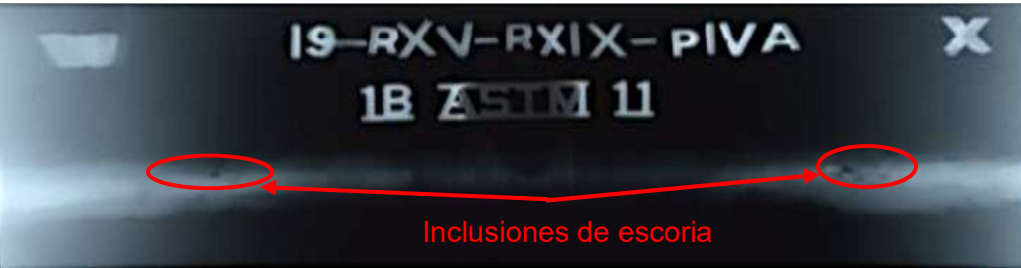
Sección B



Sección C



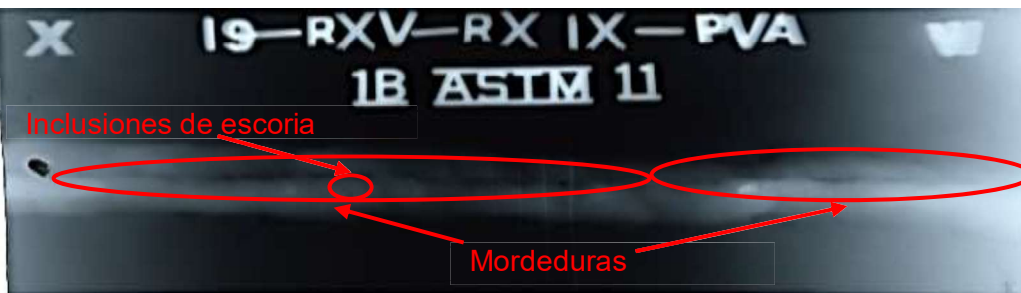
Sección D



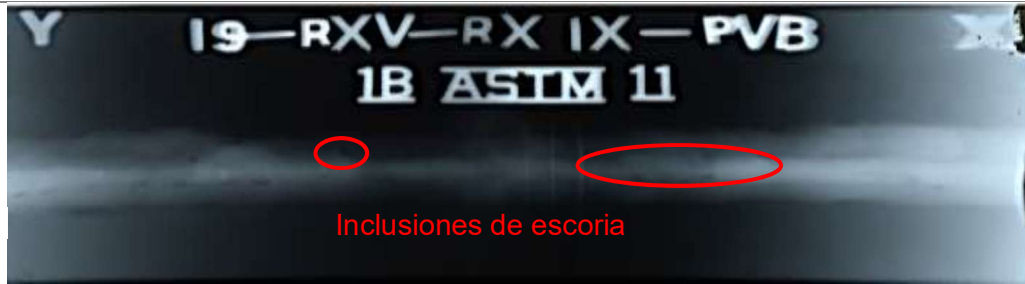
Codificación	Procesos de soldadura	Observaciones
P5	GTAW / FCAW (Inershield)	<ul style="list-style-type: none"> • Sección A: inclusiones de escoria y mordeduras. • Sección B: inclusiones de escoria. • Sección C: penetración excesiva. • Sección D: mordeduras.

Esquema de la pieza

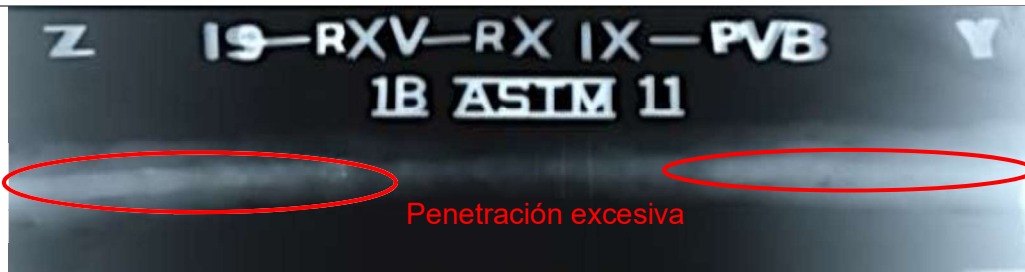
Sección A



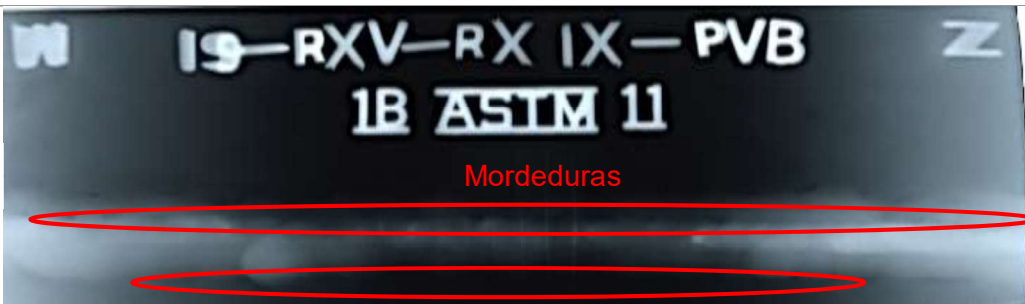
Sección B



Sección C



Sección D



(Fuente: Propia)

3.2.2. Resultados de ensayos destructivos

3.2.2.1. Resultados del ensayo de tracción

En la Tabla 3.8 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el Ensayo de Tracción, la resistencia a la tracción de las probetas obtenidas en cada uno de los neopros de tubería soldada con los diferentes procesos de soldadura. El detalle de este Ensayo se encuentra en el ANEXO XIII

Tabla 3.8 Resultados del Ensayo de Tracción.

Codificación	Codificación del LAEV	Resistencia a la tracción		Observación	Imagen
		Ksi	MPa		
P1V1	M19.091.09	68,4	471,9	Aprueba	Figura 3.2
P1V2	M19.091.10	68,9	474,9	Aprueba	Figura 3.3
P2V1	M19.091.11	68,1	469,2	Aprueba	Figura 3.4
P2V2	M19.091.12	68,1	469,3	Aprueba	Figura 3.5
P3V1	M19.091.13	66,8	460,8	Aprueba	Figura 3.6
P3V2	M19.091.14	69	475,4	Aprueba	Figura 3.7
P4V1	M19.091.15	67,2	463,2	Aprueba	Figura 3.8
P4V2	M19.091.16	68,2	470,3	Aprueba	Figura 3.9

(Fuente: Propia)



Figura 3.2 Probeta P1V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)



Figura 3.3 Probeta P1V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)



Figura 3.4 Probeta P2V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)



Figura 3.5 Probeta P2V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)



Figura 3.6 Probeta P3V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)



Figura 3.7 Probeta P3V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)



Figura 3.8 Probeta P4V1, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)



Figura 3.9 Probeta P4V2, sometida a ensayo de tracción. Fractura dúctil.
(Fuente: Propia)

3.2.2.2. Resultados del ensayo Nick Break

En la Tabla 3.9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el Ensayo Nick Break. En el ANEXO XIV se presenta a detalle el informe del Ensayo.

Tabla 3.9 Resultados del Ensayo Nick Break.

Codificación	Codificación del LAEV	Observación	Calificación	Imagen
P1W1	M19.091.01	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.10
P1W2	M19.091.02	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.11
P2W1	M19.091.03	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.12
P2W2	M19.091.04	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.13
P3W1	M19.091.05	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.14
P3W2	M19.091.06	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.15
P4W1	M19.091.07	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.16
P4W2	M19.091.08	Sin discontinuidades	Aprueba	Figura 3.17

(Fuente: Propia)



Figura 3.10 Probeta P1W1, sometida a ensayo Nick Break.
(Fuente: Propia)



Figura 3.11 Probeta P1W2, sometida a ensayo Nick Break.
(Fuente: Propia)



Figura 3.12 Probeta P2W1, sometida a ensayo Nick Break.
(Fuente: Propia)



Figura 3.13 Probeta P2W2, sometida a ensayo Nick Break.
(Fuente: Propia)



Figura 3.14 Probeta P3W1, sometida a ensayo Nick Break.
(Fuente: Propia)



Figura 3.15 Probeta P3W2, sometida a ensayo Nick Break
(Fuente: Propia)



Figura 3.16 Probeta P4W1, sometida a ensayo Nick Break.
(Fuente: Propia)








Figura 3.17 Probeta P4W2, sometida a ensayo Nick Break.
(Fuente: Propia)

3.2.2.3. Resultados del ensayo de doblado de cara y raíz

A continuación, en la Tabla 3.10 y en la Tabla 3.11 se detalla los resultados del ensayo de Doblado de Cara y el Doblado de Raíz respectivamente. La calificación se la hace de acuerdo a los estándares de la norma API 1104 en la sección 5.6.4.3

Tabla 3.10 Resultados del Ensayo de Doblado de Cara.

Id.	Imagen	Observación	Calificación
P1Y1		No existen Indicaciones	Aprueba
P1Y2		No existen indicaciones	Aprueba
P2Y1		No existen Indicaciones	Aprueba
P2Y2		No existen Indica lones	Aprueba
P3Y1		No existen Indicaciones	Aprueba

P3Y2		No existen Indicaciones	Aprueba
P4Y1		Porosidad de 2 mm	Aprueba
P4Y2		No existen Indicaciones	Aprueba

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11 Resultados del Ensayo de Doblado de Raíz.

Id.	Imagen	Observación	Calificación
P1X1		No existen Indicaciones	Aprueba
P1X2		No existen Indicaciones	Aprueba
P2X1		No existen Indicaciones	Aprueba

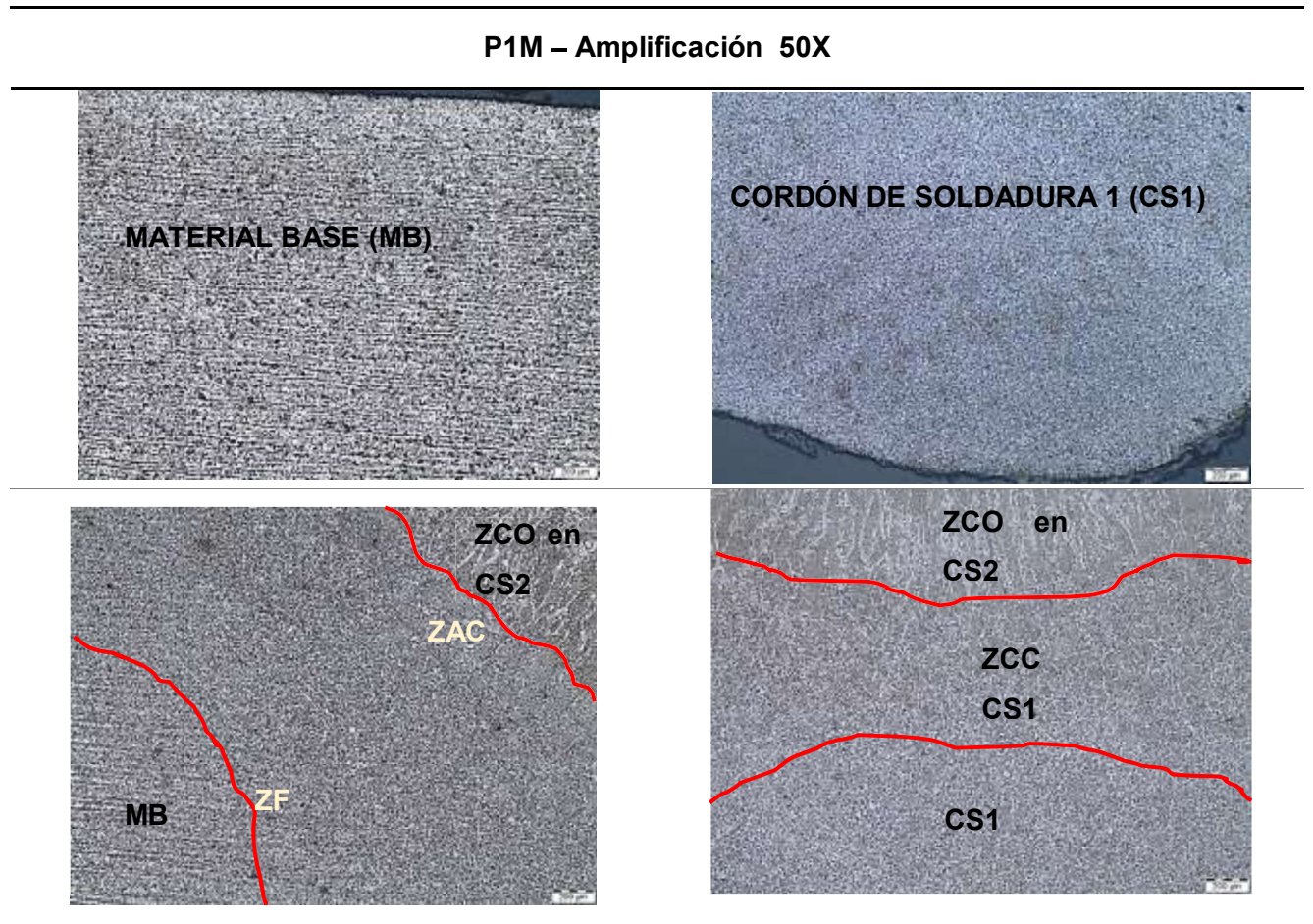
P2X2		No existen Indicaciones	Aprueba
P3X1		No existen Indicaciones	Aprueba
P3X2		No existen Indicaciones	Aprueba
P4X1		Porosidades con suma de 2,5 mm	Aprueba
P4X2		No existen Indicaciones	Aprueba

(Fuente: Propia)

3.2.3. Resultado de Metalografías

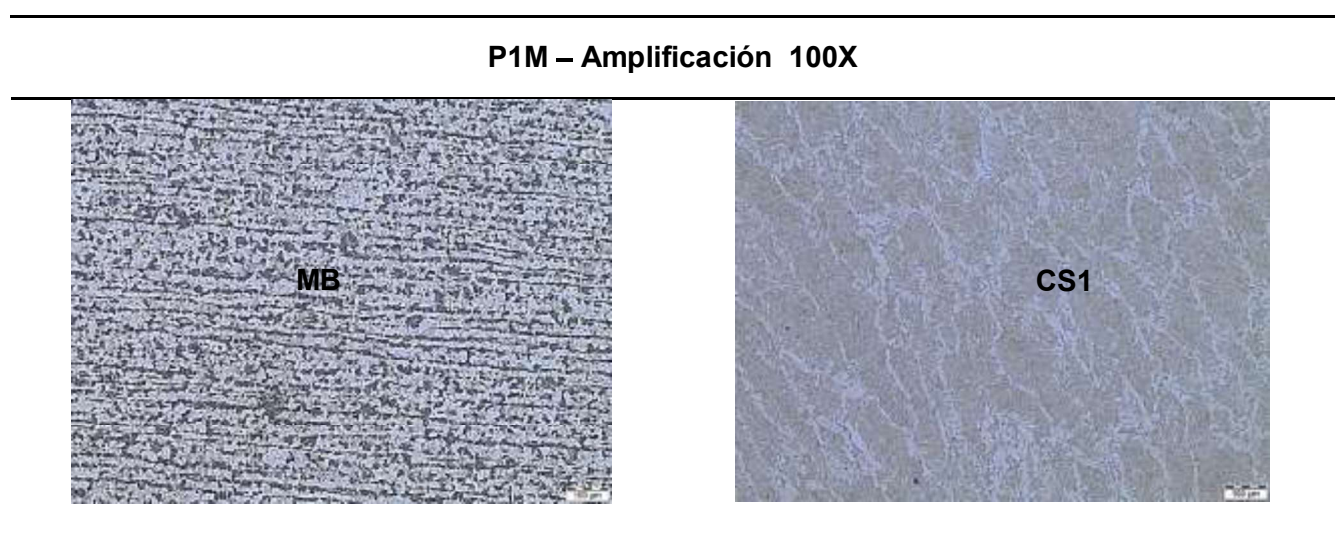
Los resultados de las macrografías y micrografías correspondientes a las probetas soldadas se las presenta en las siguientes Tablas: de la Tabla 3.12 a la Tabla 3.23. En cada metalografía se identifican: Material Base (MB), las zonas afectadas por el calor (ZAC) y el cordón de soldadura (CS), zona de crecimiento columnar (ZCO), zona de crecimiento celular (ZCC) y línea de fusión (ZF). Para la realización de las metalografías se atacó la probeta con Nital al 2%, estas se hacen con aumentos de 50X, 100X y 500X.

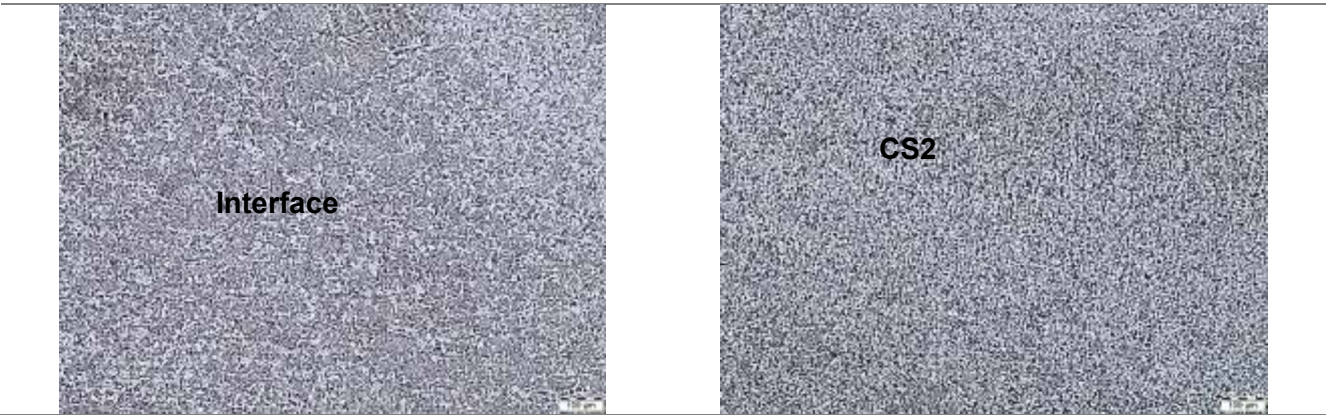
Tabla 3.12 Metalografías de P1M en 50X.



(Fuente: Propia)

Tabla 3.13 Metalografías de P1M en 100X.

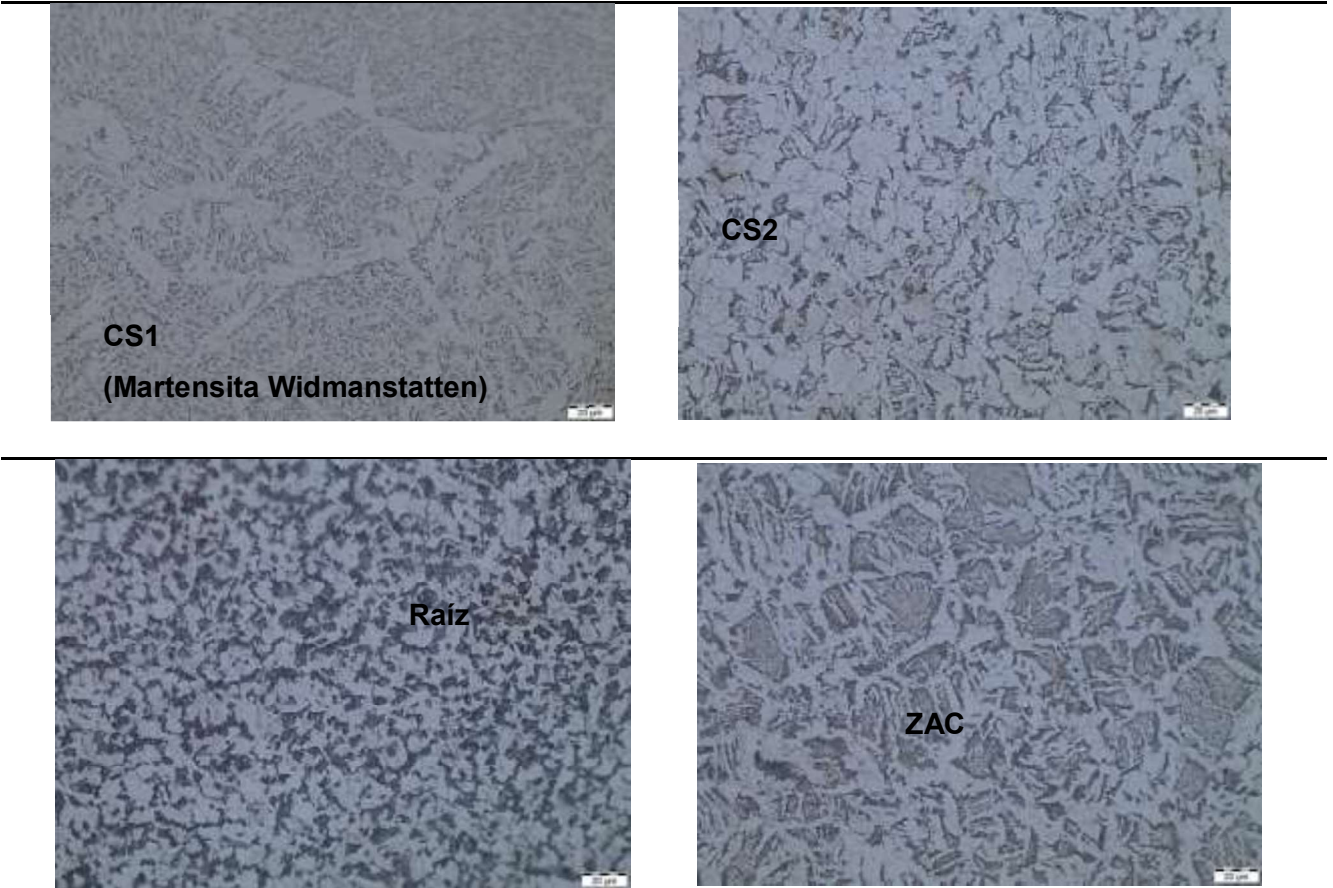




(Fuente: Propia)

Tabla 3.14 Metalografías de P1M en 500X.

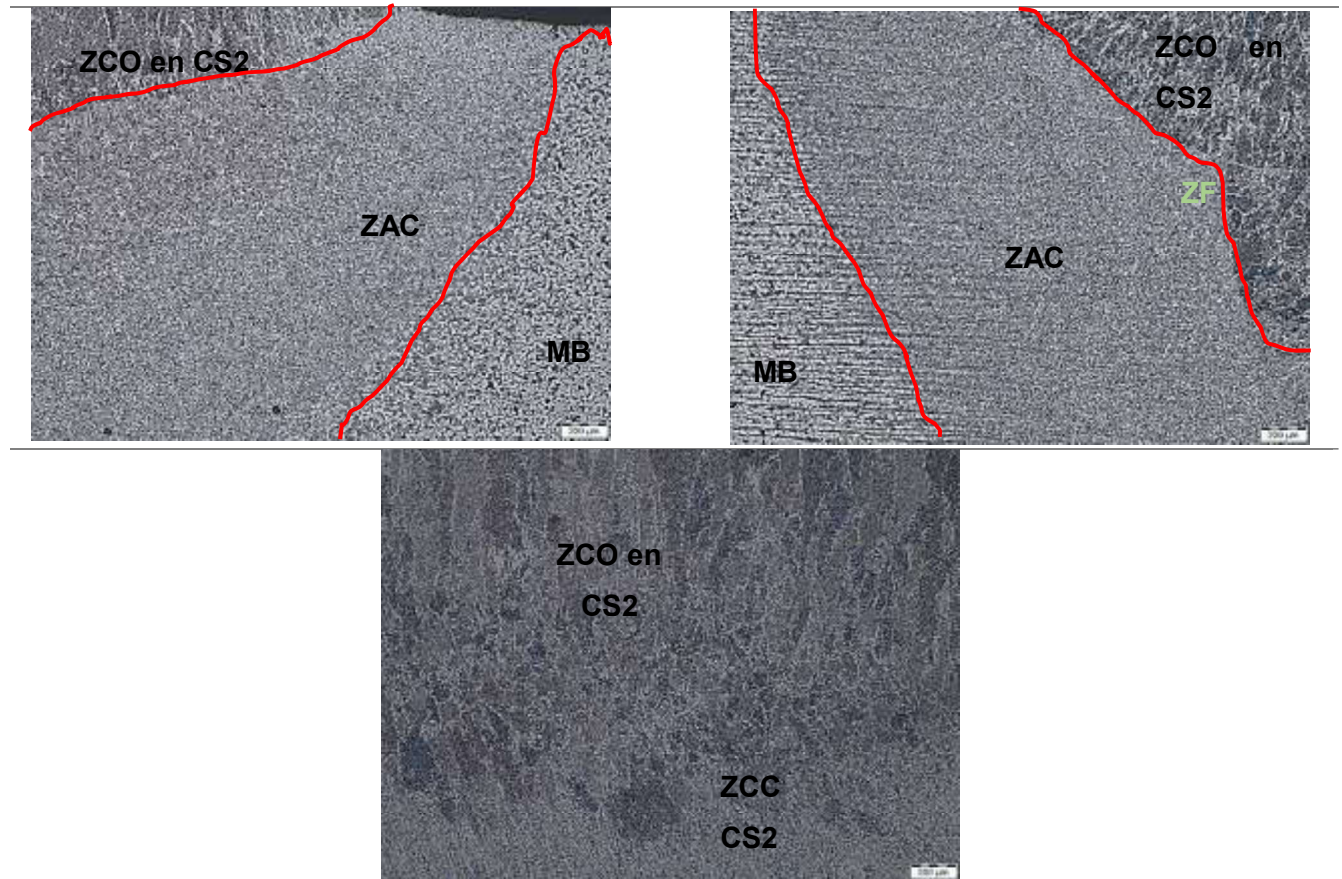
P1M – Amplificación 500X



(Fuente: Propia)

Tabla 3.15 Metalografías de P2M en 50X.

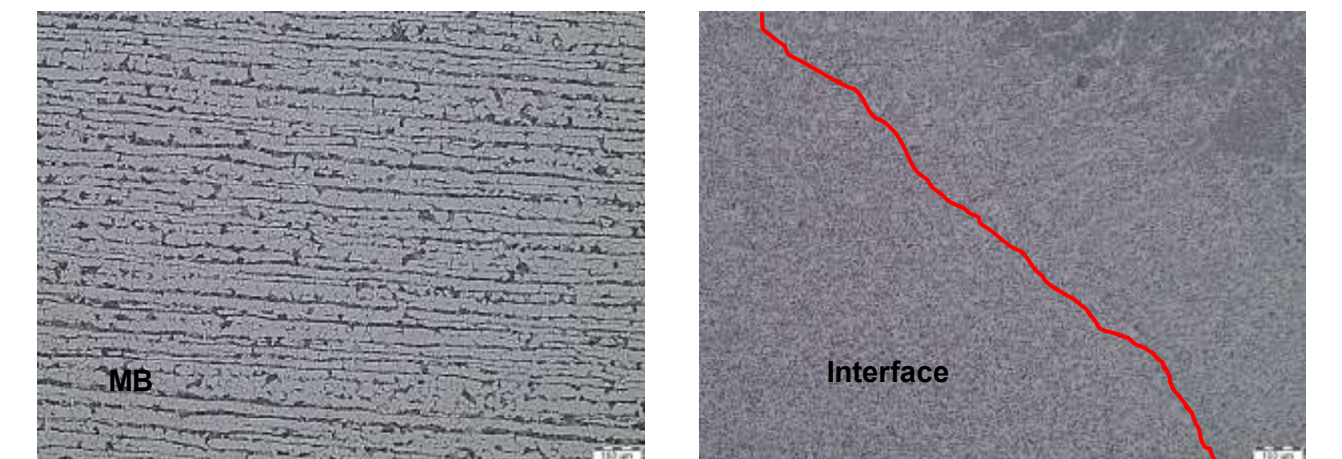
P2M – Amplificación 50X

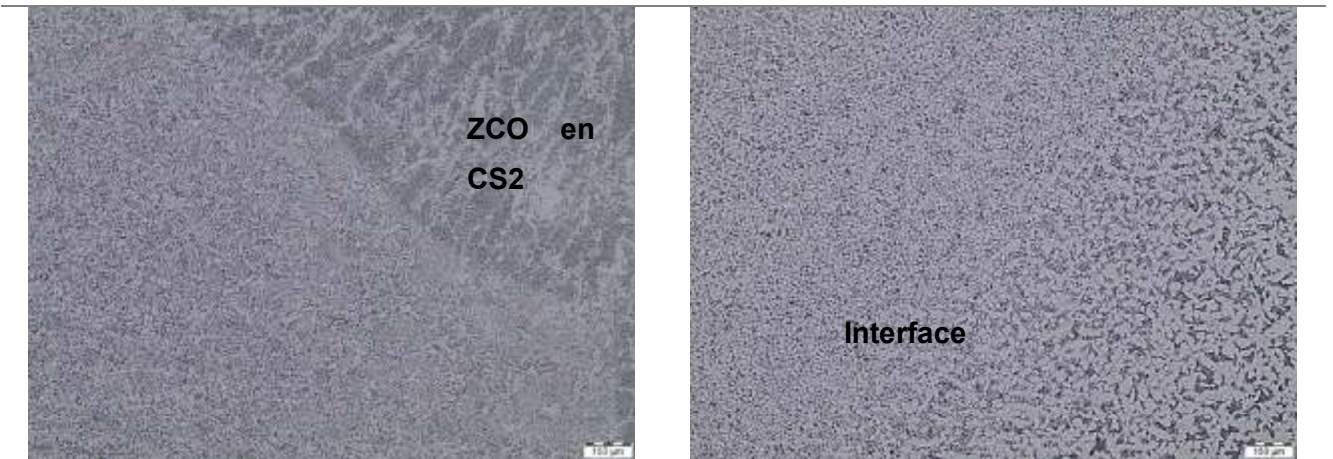


(Fuente: Propia)

Tabla 3.16 Metalografías de P2M en 100X.

P2M – Amplificación 100X

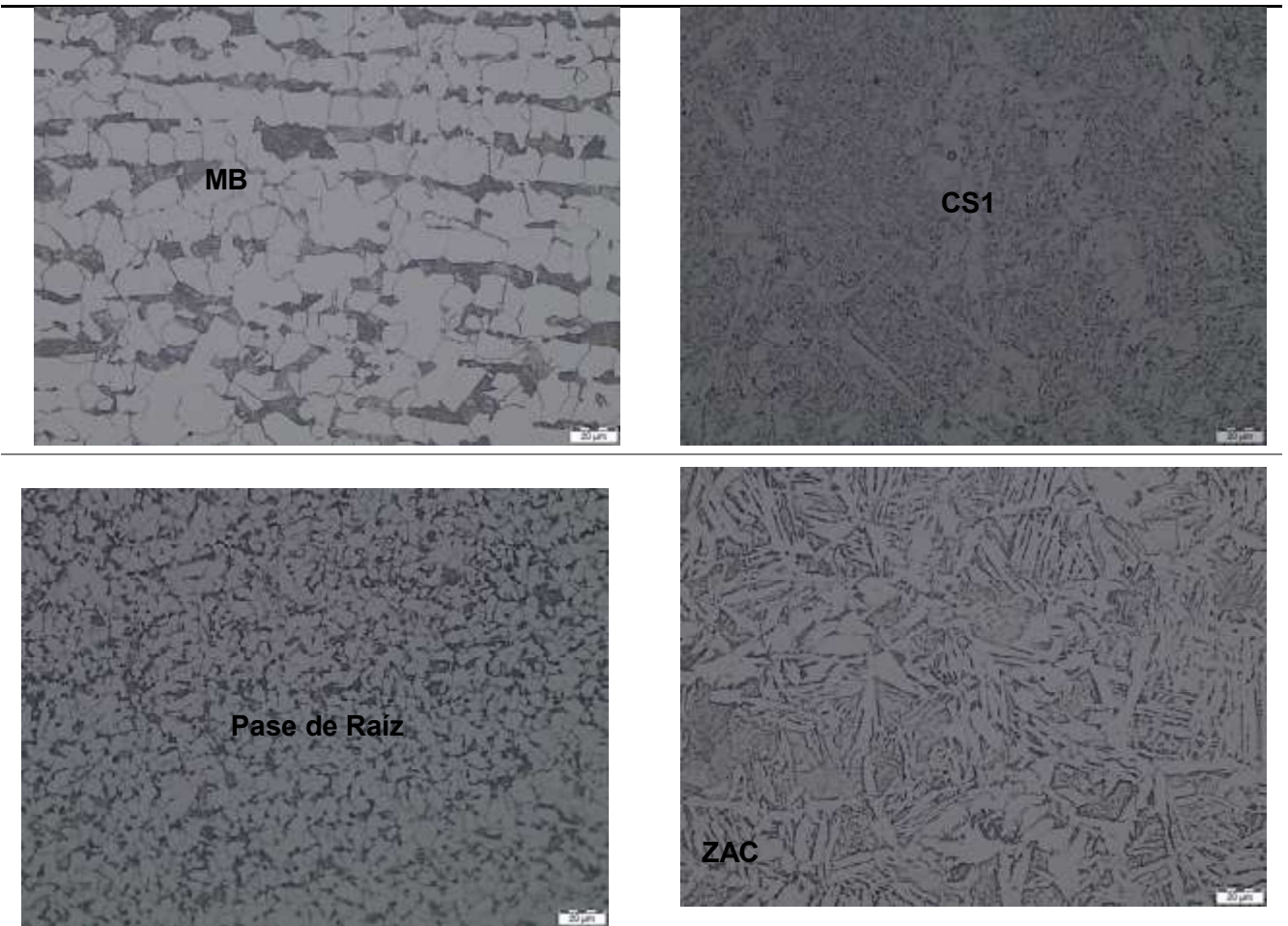




(Fuente: Propia)

Tabla 3.17 Metalografías de P2M en 500X.

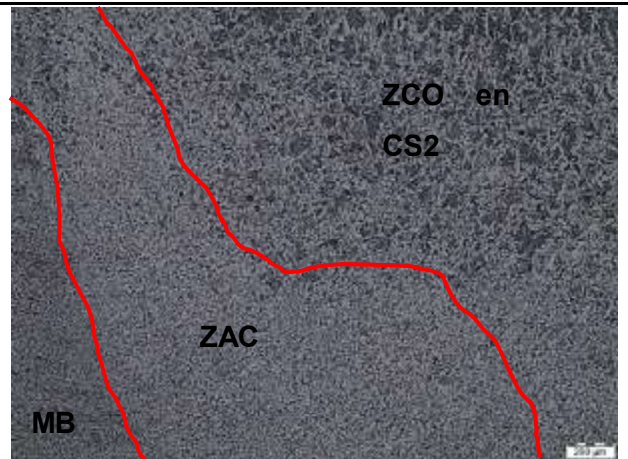
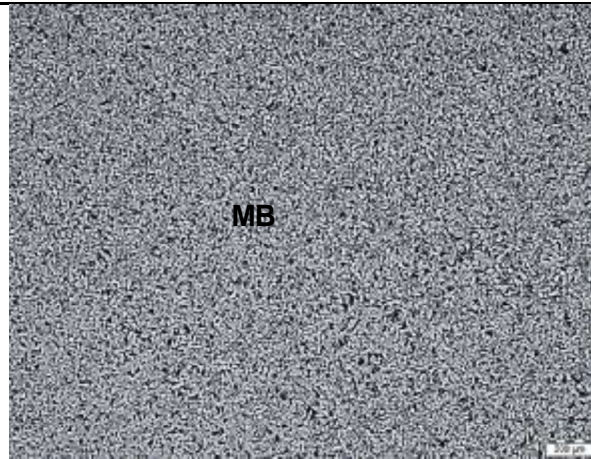
P2M – Amplificación 500X



(Fuente: Propia)

Tabla 3.18 Metalografías de P3M en 50X.

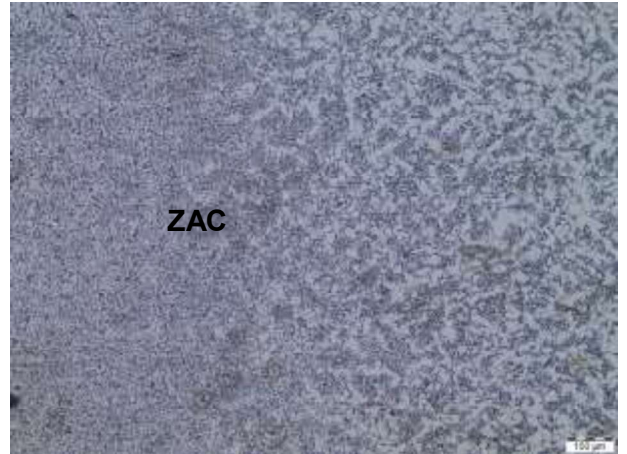
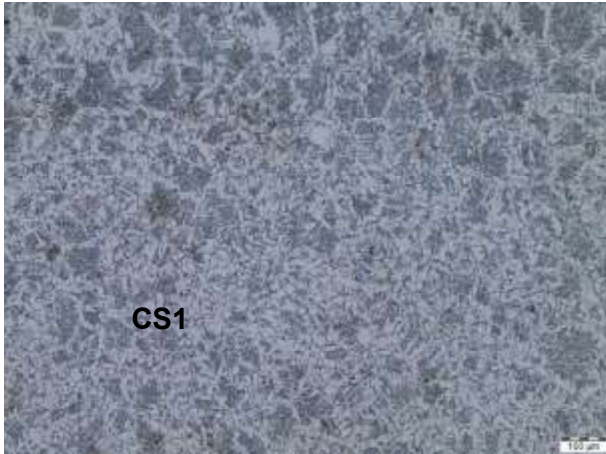
P3M – Amplificación 50X



(Fuente: Propia)

Tabla 3.19 Metalografía de P3M en 100X.

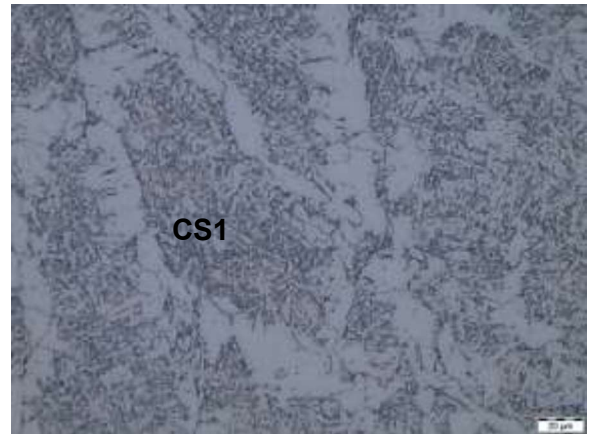
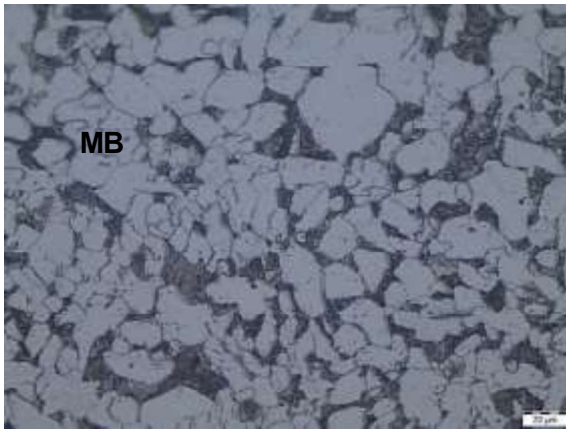
P3M – Amplificación 100X



(Fuente: Propia)

Tabla 3.20 Metalografía de P3M en 500X.

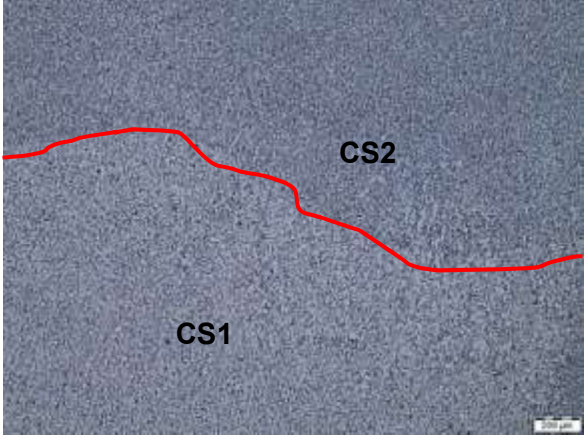
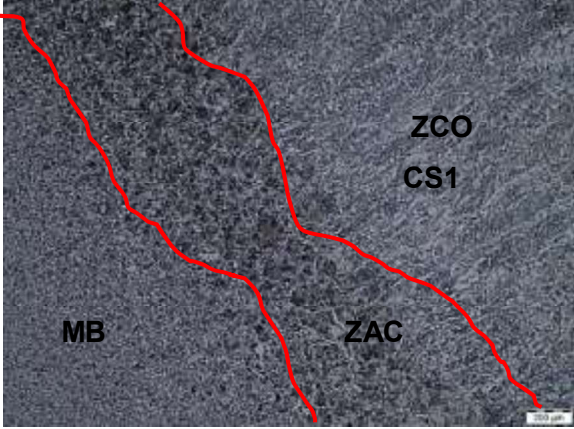
P3M – Amplificación 500X



(Fuente: Propia)

Tabla 3.21 Metalografía de P4M en 50X.

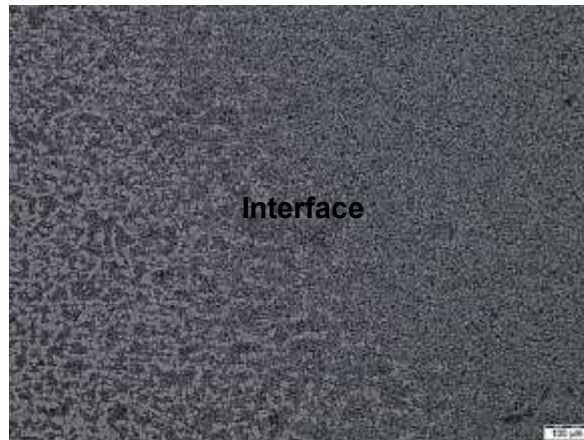
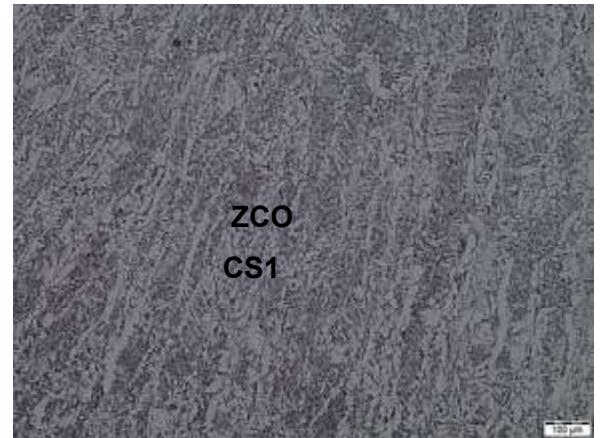
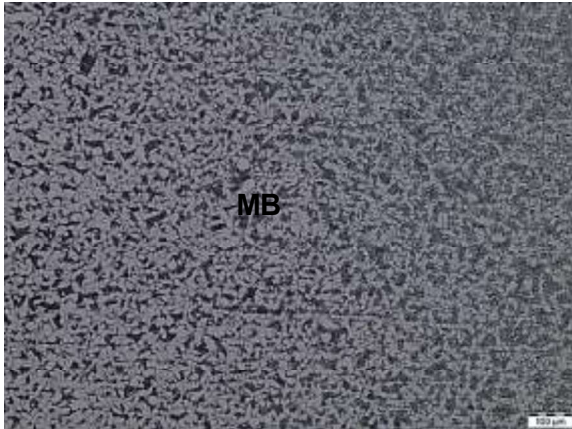
P4M – Amplificación 50X



(Fuente: Propia)

Tabla 3.22 Metalografía de P4M en 100X.

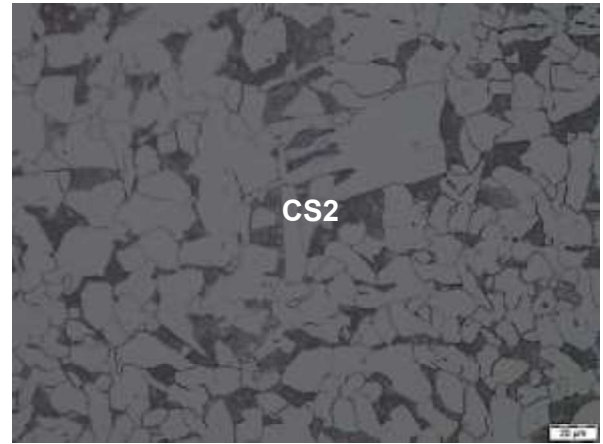
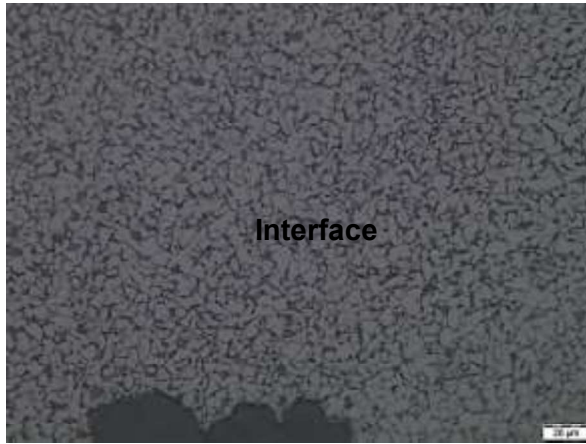
P4M – Amplificación 100X



(Fuente: Propia)

Tabla 3.23 Metalografía de P4M en 500X.

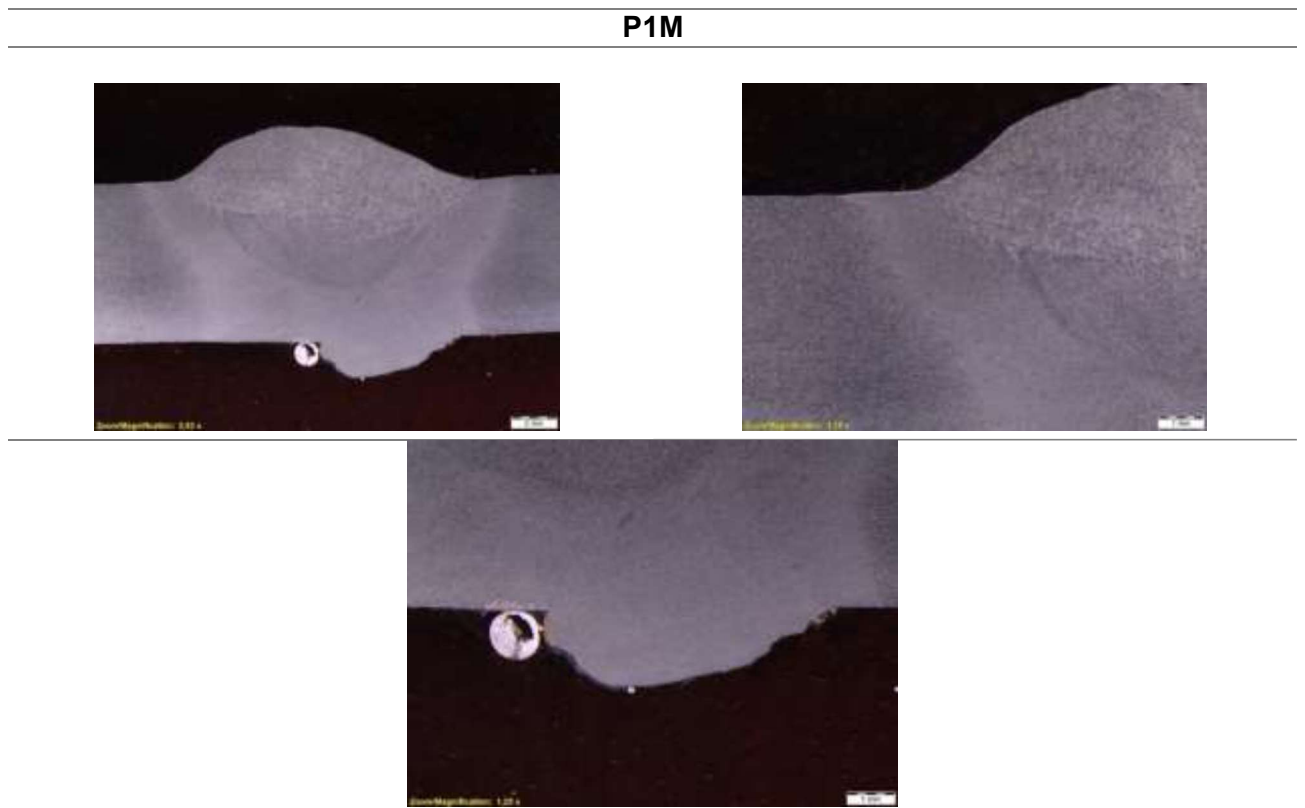
P4M – Amplificación 500X



(Fuente: Propia)

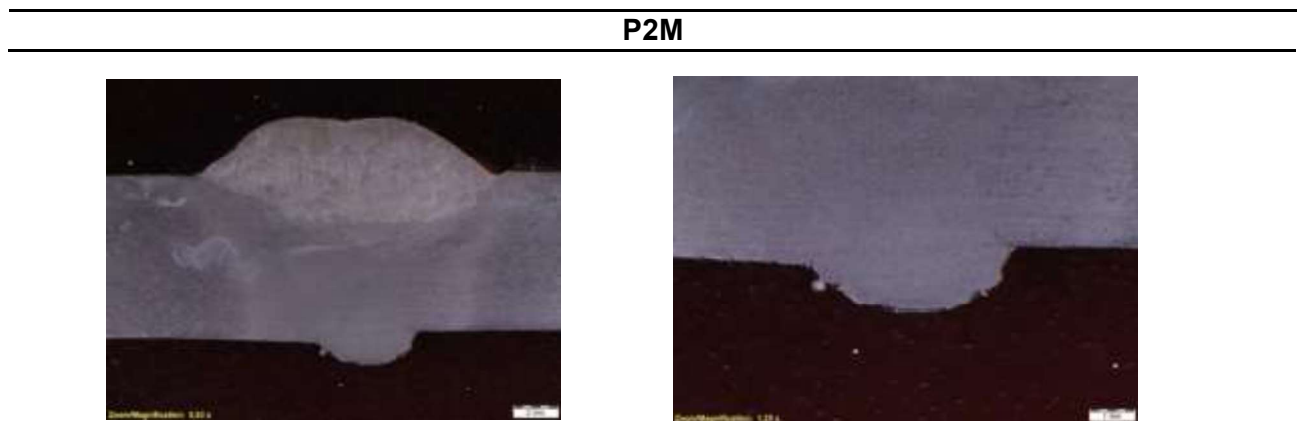
De la Tabla 3.24 a la Tabla 3.27 se puede observar los resultados obtenidos de las macrografías de las probetas soldadas, las cuales se observan al ser atacadas con Nital al 10%.

Tabla 3.24 Macrográficas de P1M.



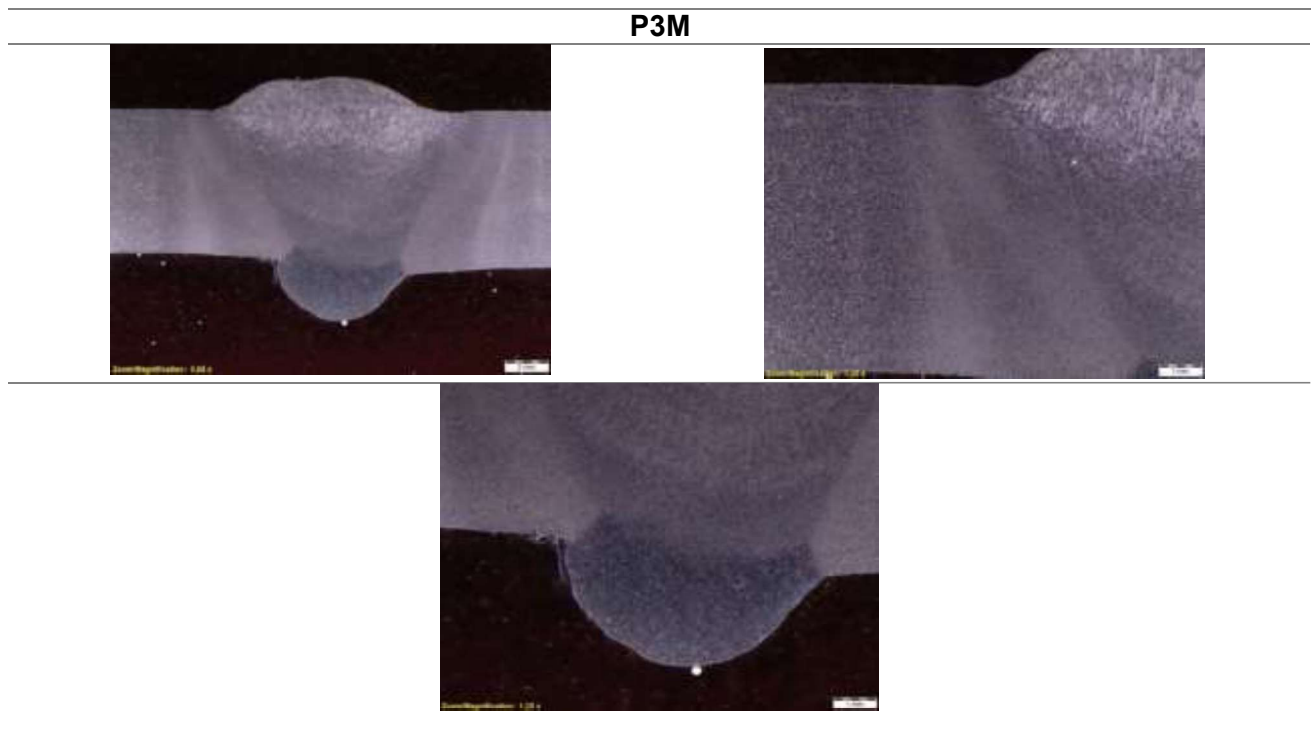
(Fuente: Propia)

Tabla 3.25 Macrográficas de P2M.



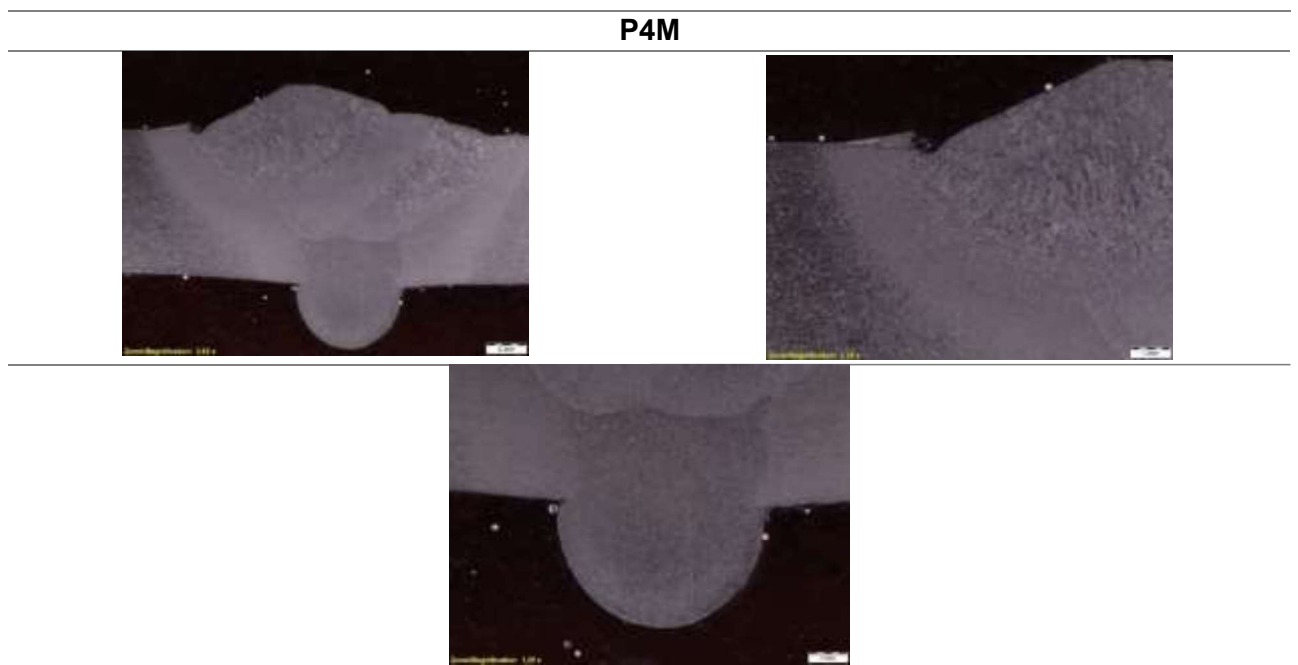
(Fuente: Propia)

Tabla 3.26 Macrografías de P3M.



(Fuente: Propia)

Tabla 3.27 Macrografías de P4M.



(Fuente: Propia)

3.2.4. Resultados del Ensayo de Dureza

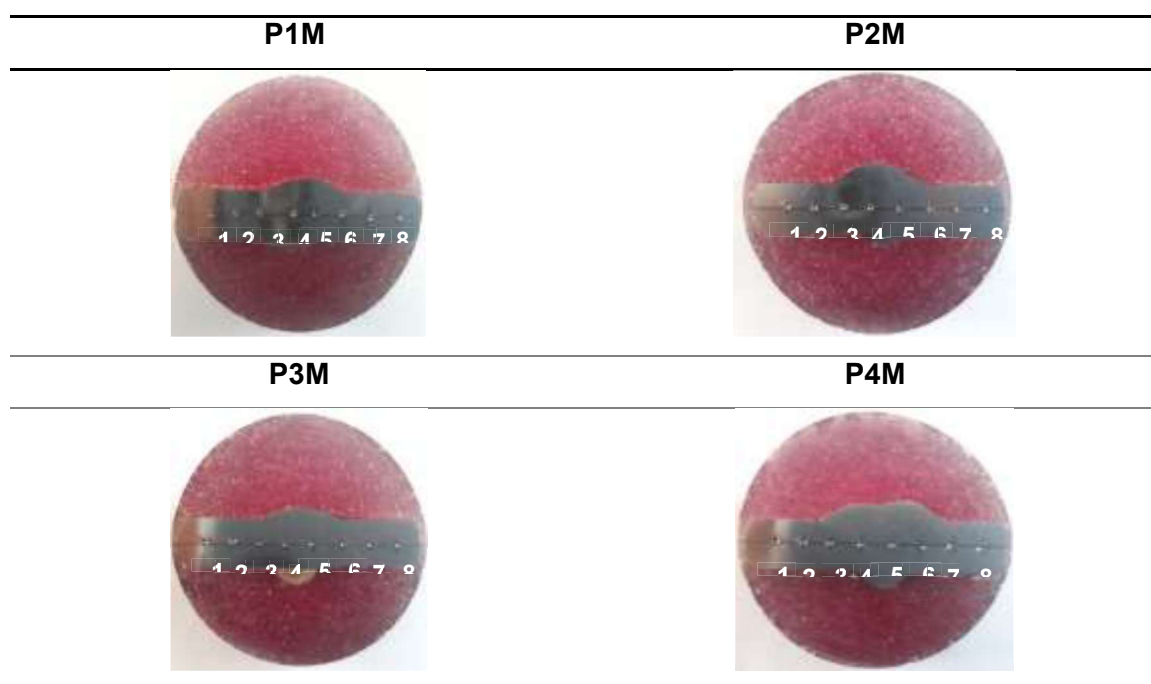
Los resultados obtenidos de probetas soldadas se presentan en la Tabla 3.28 a partir de las probetas que se muestran en la Tabla 3.29

Tabla 3.28 Ensayo de Dureza en probetas soldadas.

		P1M	P2M	P3M	P4M
1	MB[HRB]	80	85	84	83
2	MB [HRB]	84	83	82	84
3	ZAC [HRB]	86	84	86	88
4	SOLD. [HRB]	88	89	87	88
5	SOLD. [HRB]	88	89	88	90
6	ZAC [HRB]	85	83	87	94
7	MB [HRB]	82	79	82	88
8	MB [HRB]	78	82	80	87

(Fuente: Propia)

Tabla 3.29 Probetas de ensayo de dureza.



(Fuente: Propia)

En el Figura 3.18 se puede observar los resultados del ensayo de barrido de dureza comparados en una gráfica, evidenciando un incremento en la dureza en la zona del cordón de soldadura.

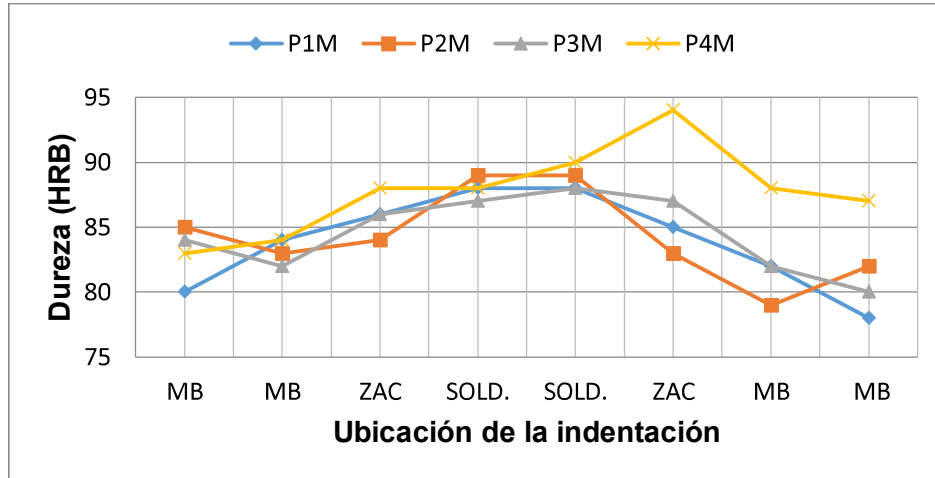


Figura 3.18 Dureza vs. Ubicación de la indentación.
(Fuente: Propia)

3.3. Resultados de los costos involucrados en cada procedimiento

Los resultados de los costos de soldadura se detallan a continuación por cada cupón soldado. La recopilación de datos que se tomaron en cada proceso de soldadura se encuentra en el ANEXO XV.

3.3.1. Costos de Materia Prima y Mano de Obra

La materia prima utilizada es un acero API 5L X52, que, según costos referenciales, el tubo de 6 metros de longitud tiene un costo de \$5000 aproximadamente. Por lo tanto, el costo por metro es el siguiente:

$$CMP \left[\frac{USD}{m} \right] = \frac{5000}{6} = 833,33 \left[\frac{USD}{m} \right]$$

Asumiendo un uso de 1 metro de materia prima se tiene un costo de

$$CMP[USD] = 833,33$$

El costo de materia prima será el mismo para los cuatro procedimientos.

Para el costo de mano de obra se conoce que el sueldo del soldador es de \$900 mensuales, con un horario de trabajo de 8 horas diarias. Por lo tanto:

$$SS = 5,625 \left[\frac{\$}{h} \right]$$

Para el cálculo del Costo de la mano de obra se utiliza la Ecuación 2.4 y la información presentada en el ANEXO XVI. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla 3.30:

Tabla 3.30 Costos de Mano de Obra.

	SMAW	SMAW – FCAW	GTAW-SMAW	GTAW-FCAW
CMO [USD]	7,99	6,75	10,80	8,61

(Fuente: Propia)

3.3.2. Costo de Equipos y Maquinaria

Para el cálculo de la depreciación del Equipo se utiliza la Ecuación 2.5 tomando en cuenta que la soldadora es Lincoln Electric Invertec V350- PRO. El tiempo de vida útil es de 15 años y el costo según precios referenciales es \$6950 y un valor de desecho de \$0 debido a que los equipos de la Escuela Politécnica Nacional no se pueden vender. Por lo tanto:

$$Da \left[\frac{USD}{año} \right] = \frac{6950 - 0}{15}$$

$$Da = 463,30 \left[\frac{USD}{año} \right]$$

Para calcular el costo hora de la máquina soldadora se usa la Ecuación 2.6. Por lo tanto:

$$Cu \left[\frac{USD}{hora} \right] = \frac{432,44 \text{ USD} * 1 \text{ año} * 1 \text{ día}}{1 \text{ año} * 240 * 3 \text{ horas}}$$

$$Cu \left[\frac{USD}{hora} \right] = 0,644$$

Tomando en cuenta el tiempo de trabajo total de 1,42 horas se tiene un costo de:

$$Cu[USD] = 0,914$$

Para el proceso FCAW se tiene la Soldadora Lincoln Electric Invertec V350-PRO, además de un alimentador de alambre LN-7 GMA, se conoce que el tiempo de vida útil es de 10 años y el costo aproximado es de \$1500 y el valor de desecho de 0\$. Por lo tanto:

$$Da = 150 \left[\frac{USD}{año} \right]$$

$$Cu \left[\frac{USD}{hora} \right] = 0,137$$

Para el costo hora total de cada procedimiento se toma en cuenta el tiempo total de uso de la máquina tomando en cuenta los procesos combinados.

Tabla 3.31 Costo hora de la máquina.

	SMAW	SMAW-FCAW	GTAW- SMAW	GTAW- FCAW
Cuh	0,914	0,886	1,236	1,103

(Fuente: Propia)

3.3.3. Costo de Consumibles

3.3.3.1. Costo de Material de Aporte (CMA)

El cálculo del material de aporte se detalla a continuación por procedimiento. Para el cálculo se conoce: la densidad aproximada del material de aporte, como la densidad del acero, $\rho_a = 7850 \frac{Kg}{m^3}$, el total de metros donde se deposita el material de aporte es 0,479 [m] siendo el diámetro de la tubería. Se utiliza la Ecuación 2.10 y la Ecuación 2.7,

- **PROCESO SMAW (E6010-E7018)**

Para conocer el área del material de aporte depositado en la junta se utilizó el software Solidworks y los resultados se presentan en la Figura 3.19.

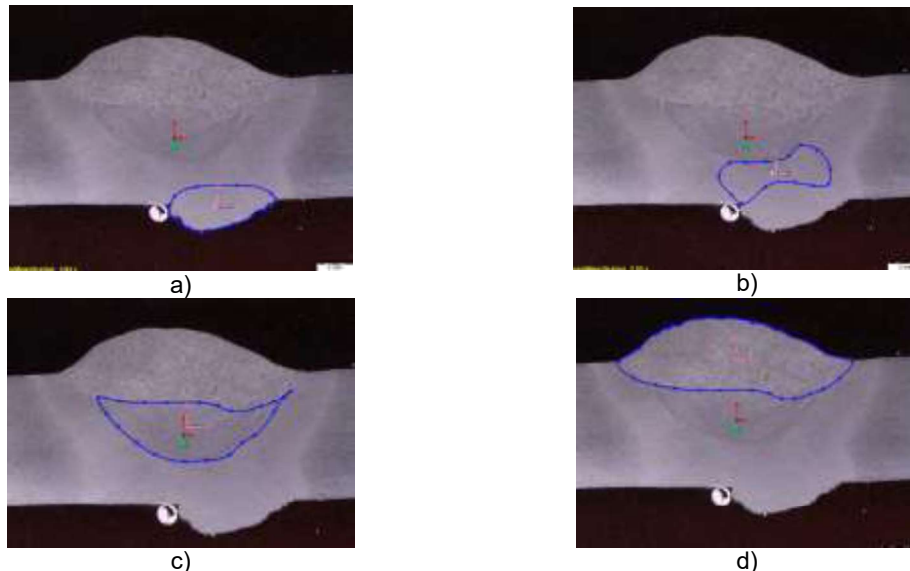


Figura 3.19 Áreas proceso SMAW. a) Área del pase raíz (E6010). b) Área pase 1 (E6010). c) Área pase 2 (E7018). d) Área pase 3 (E7018). (Fuente: Propia)

La siguiente Tabla 3.32, nos muestra los resultados de las áreas de los pases mostrados en las figuras anteriores

Tabla 3.32 Áreas de los pases en P1.

Pase	Área [mm²]	Área [m²]	Sumas [m²]
Raíz (E6010)	11,29	$1,13 \times 10^{-5}$	$2,19 \times 10^{-5}$
Primero(E6010)	10,57	$1,06 \times 10^{-5}$	
Segundo(E7018)	19,97	$1,99 \times 10^{-5}$	$5,82 \times 10^{-5}$
Tercero (E7018)	38,23	$3,82 \times 10^{-5}$	

(Fuente: Propia)

Además, en la Tabla 3.33 se presenta el precio unitario de los electrodos, estos precios han sido tomados de una cotización, presentada en el ANEXO XVI.

Tabla 3.33 Precio unitario de electrodos.

Material de Aporte	Costo Unitario [USD/kg]
E6010	9,30
E7018	8,81

(Fuente: Propia)

Tabla 3.34 Peso del depósito de soldadura proceso SMAW.

PDS_{raiz,1} [Kg/m]	0,17
PDS_{2,3} [Kg/m]	0,46

(Fuente: Propia)

Tabla 3.35 Costo del material de aporte proceso SMAW.

MA1 [USD/m]	0,72
MA2 [USD/m]	2,86
CMA_{total}[USD/m]	3,58

(Fuente: Propia)

El costo total del material de aporte es el siguiente:

$$CMA_{total}[USD] = 3,58 * 0,479$$

$$CMA_{total}[USD] = 1,71$$

- **PROCESO SMAW – FCAW**

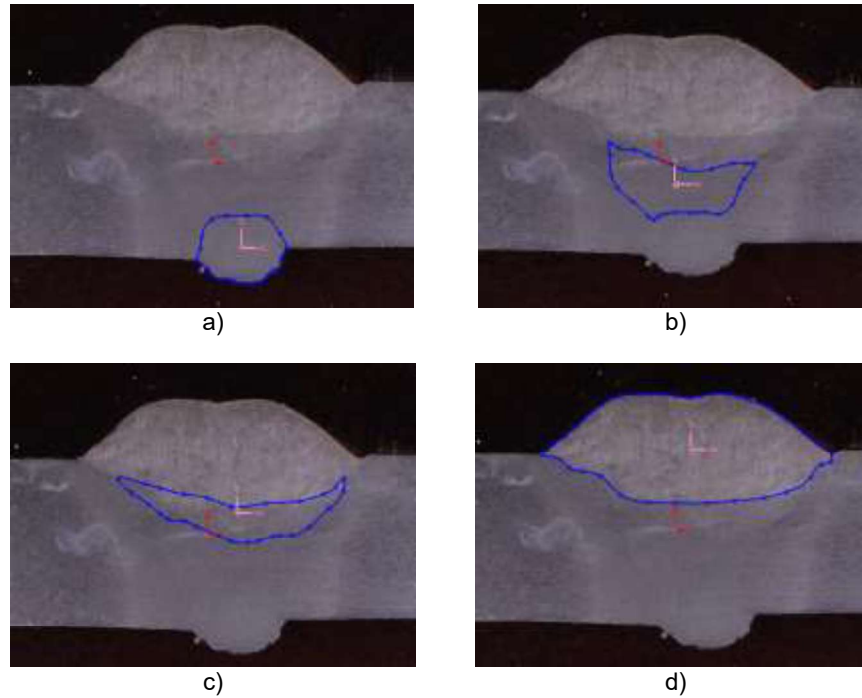


Figura 3.20 Áreas proceso SMAW-FCAW. a) Área del pase raíz (E6010). b) Área de pase 1 (E71T-1). c) Área del pase 2 (E71T-1). d) Área del pase 3 (E71T-1). (Fuente: Propia)

Los resultados de las áreas de los pases mostrados en las figuras anteriores se detallan en la Tabla 3.36.

Tabla 3.36 Áreas de los pases en P2.

Pase	Área [mm ²]	Área [m ²]	Sumas [m ²]
Raíz (E6010)	10,04	$1,004 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$
Primero (E6010)	12,98	$1,298 \times 10^{-5}$	
Segundo (E71T1)	12,58	$1,258 \times 10^{-5}$	$5,73 \times 10^{-5}$
Tercero (E71T1)	44,67	$4,467 \times 10^{-5}$	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.37 se presenta el precio unitario de los electrodos, precios tomados del ANEXO XVI

Tabla 3.37 Precio unitario de electrodos.

Material de Aporte	Costo Unitario [USD/kg]
E6010	9,31
E71T1	4,24

(Fuente: Propia)

Tabla 3.38 Peso del depósito de soldadura proceso SMAW – FCAW.

PDS_{raíz,1} [Kg/m]	0,18
PDS_{2,3} [Kg/m]	0,45

(Fuente: Propia)

Tabla 3.39 Costo del material de aporte proceso SMAW – FCAW.

MA1 [USD/m]	0,75
MA2 [USD/m]	2,07
CMA [USD/m]	2,82

(Fuente: Propia)

Por lo tanto, el costo total del material de aporte es el siguiente:

$$CMA_{total}[USD] = 2,82 * 0,479$$

$$CMA_{total} [USD] = 1,35$$

- **PROCESO GTAW-SMAW**

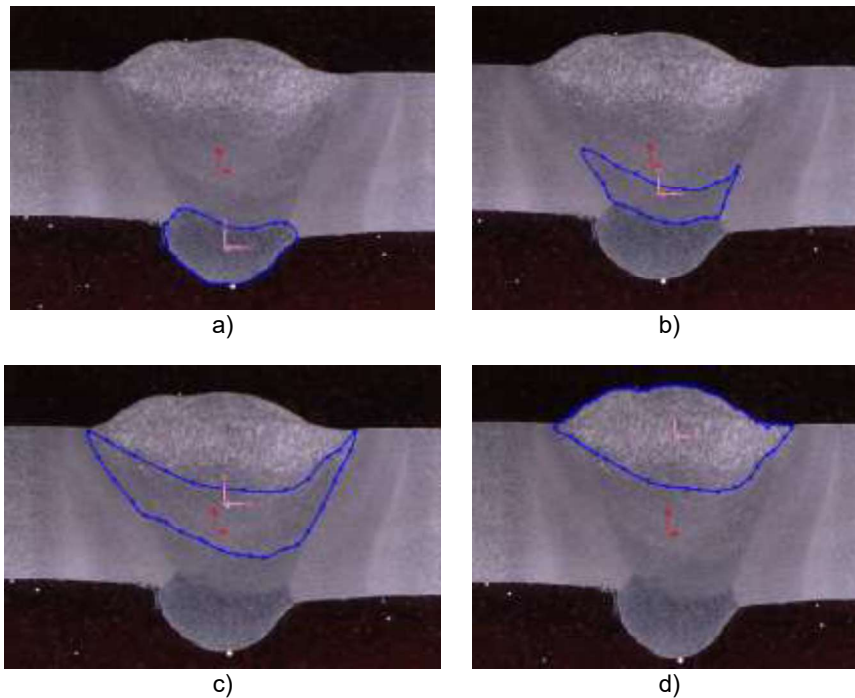


Figura 3.21 Áreas proceso GTAW-SMAW. a) Área del pase raíz (ER60S-6). b) Área de pase 1 (E7018). c) Área del pase 2 (E7018). d) Área del pase 3 (E7018).

(Fuente: Propia)

Tabla 3.40 Áreas de los pases en P3.

Pase	Área [mm²]	Área [m²]	Sumas[m²]
Raíz (ER70S-6)	13,19	1,32 x 10 ⁻⁵	2,26 x 10 ⁻⁵
Primero (ER70S-6)	9,48	9,48 x 10 ⁻⁵	
Segundo (E7018)	24,27	2,43 x 10 ⁻⁵	5,57 x 10 ⁻⁵
Tercero(E7018)	31,47	3,15 x 10 ⁻⁵	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.41 se presenta el precio unitario de los electrodos, según las cotizaciones del

ANEXO XVI

Tabla 3.41 Precio unitario de electrodos.

Material de Aporte	Costo Unitario [USD/kg]
ER70S-6	9,46
E7018	8,81

(Fuente: Propia)

Tabla 3.42 Peso del depósito de soldadura proceso GTAW – SMAW.

PDS_{raíz, 1} [Kg/m]	0,18
PDS_{2,3} [Kg/m]	0,44

(Fuente: Propia)

Tabla 3.43 Costo del material de aporte proceso GTAW – SMAW.

MA1 [USD/m]	1,98
MA2 [USD/m]	5,67
CMA [USD/m]	7,65

(Fuente: Propia)

Por lo tanto, el costo total del material de aporte es el siguiente.

$$CMA_{total}[USD] = 7,65 * 0,479$$

$$CMA_{total} [USD] = 3,66$$

- PROCESO GTAW – FCAW

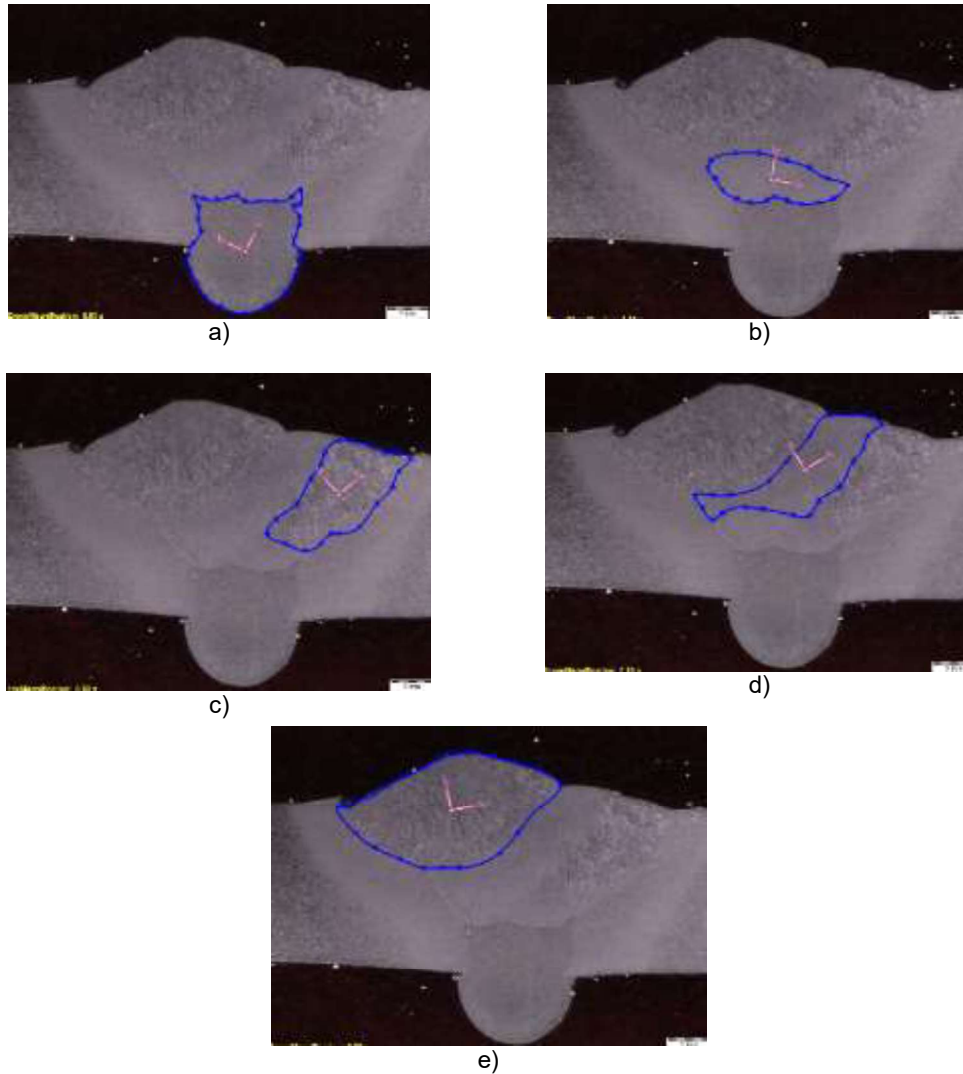


Figura 3.22 Áreas proceso GTAW-FCAW. Área del pase raíz (ER60S-6). b) Área de pase 1 (E71T-1). c) Área del pase 2 (E71T-1). d) Área del pase 3 (E71T-1). e) Área del pase 4 (E71T-1). (Fuente: Propia)

Tabla 3.44 Áreas de los pases en P4.

Pase	Área [mm ²]	Área [m ²]	Sumas [m ²]
Raíz (ER70S-6)	13,4	0,0000134	0,0000134
Primero (E71T-1)	6	0,000006	
Segundo (E71T-1)	9,53	0,00000953	
Tercero (E71T-1)	8,88	0,00000888	4,321E-05
Cuarto (E71T-1)	18,8	0,0000188	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.45 se presentan el precio unitario de los electrodos, tomados de la cotización del ANEXO XVI

Tabla 3.45 Precio unitario de electrodos.

Material de Aporte	Costo Unitario [USD/kg]
ER70S-6	9,46
E71T1	4,24

(Fuente: Propia)

Tabla 3.46 Peso del depósito de soldadura proceso GTAW – FCAW.

PDS [Kg/m]	0,11
PDS [Kg/m]	0,34

(Fuente: Propia)

Tabla 3.47 Costo del material de aporte proceso GTAW – FCAW.

MA1 [USD/m]	1,17
MA2 [USD/m]	1,56
CMA [USD/m]	2,73

(Fuente: Propia)

El Costo total del material de aporte es:

$$CMA_{total}[USD] = 2,73 * 0,479$$

$$CMA_{total}[USD] = 1,31$$

3.3.3.2. Costo de Gases de Protección

Para el cálculo de los consumibles, se debe tener en cuenta el uso de la Tabla 2.24, y la Ecuación 2.11. Además, que los procesos que usan gas de protección son GTAW y FCAW, el costo del argón y el CO₂ aproximadamente 17,45 [USD/kg] y 2,20 [USD/kg], respectivamente según la cotización adjunta en el ANEXO XVI. El cálculo de consumibles se describe a continuación:

- **PROCESO SMAW - FCAW**

Tabla 3.48 Consumo de CO2 para proceso SMAW - FCAW

Flujo de gas [lt/min]	Tiempo de consumo de gas [seg]	Cantidad de gas consumida [lt]	Cantidad de gas total consumida [lt]	Cantidad de Gas total consumida [kg]
70,00	44,00	51,33	226,33	1,28
	61,00	71,17		
	39,00	45,50		
	50,00	58,33	423,50	
	100,00	116,67		
	101,00	117,83		
	57,00	66,50		
	105,00	122,50		

(Fuente: Propia)

Por lo tanto, el costo del argón consumido es:

$$CCO [USD] = 2,82$$

- **PROCESO GTAW - SMAW**

Tabla 3.49 Consumo de Argón para proceso GTAW – SMAW.

Flujo de gas [lt/min]	Tiempo de consumo de gas [min]	Cantidad de gas consumida [lt]	Cantidad de gas total consumida [lt]	Consumo Ar [kg]
60,00	1,42	85	2157	3,85
	0,97	58		
	1,37	82		
	1,17	70		
	4,02	241		
	3,02	181		
	2,17	130		
	4,75	285		
	1,67	100		
	5,52	331		
	4,68	281		
	1,83	110		
	3,38	203		

(Fuente: Propia)

Por lo tanto, el costo del argón consumido es:

$$CCO [USD] = 67,15$$

- **PROCESO GTAW – FCAW**

Tabla 3.50 Consumo de Argón para proceso GTAW – FCAW.

Flujo de gas [lt/min]	Tiempo de consumo de gas [min]	Cantidad de gas consumida [lt]	Cantidad de gas total consumida [lt]	Consumo Ar[kg]
70,00	5,63	394,33	1877,17	3,35
	2,48	173,83		
	1,52	106,17		
	3,92	274,17		
	3,95	276,50		
	2,58	180,83		
	1,68	117,83		
	1,30	91,00		
	3,75	262,50		

(Fuente: Propia)

Tabla 3.51 Consumo de CO2 para proceso GTAW-FCAW

Flujo de gas [lt/min]	Tiempo de consumo de gas [min]	Cantidad de gas consumida [lt]	Cantidad de gas total consumida [lt]	Consumo Ar[kg]
70,00	0,57	39,67	1095,5	2,164708
	0,50	35,00		
	0,97	67,67		
	1,93	135,33		
	0,75	52,50		
	1,23	86,33		
	0,8	56,00		
	0,77	53,67		
	0,5	35,00		
	0,7	49,00		
	0,7	49,00		
	0,87	60,67		
	0,83	58,33		

1,35	94,50
1,30	91,00
1,88	131,83

(Fuente: Propia)

Por lo tanto, el costo del argón y CO2 consumidos en el proceso es:

$$CCO [USD] = 63,20$$

3.3.3.3. Costo de Energía y Eficiencia de la Fuente

Para evaluar los costos de energía se toma en cuenta los períodos de uso de la máquina. Se conoce que la tarifa eléctrica (TE), según el pliego tarifario 2019, es de 0,063 [USD/KWh]. Utilizando la Ecuación 2.13 se tiene:

- **PROCESO SMAW**

Tabla 3.52 Costo de energía eléctrica por períodos, proceso SMAW.

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Tiempos parciales de arco [seg]	t [h]	CEE [USD]
22	71	65	0,018	0,0009
22	60	58	0,016	0,0007
22	60	90	0,025	0,0010
22	61	75	0,021	0,0009
23	66	15	0,004	0,0002
23	65	55	0,015	0,0007
22	64	67	0,019	0,0008
23	66	83	0,023	0,0011
23	66	66	0,018	0,0009
29,5	85	86	0,024	0,0019
29,5	85	36	0,010	0,0008
30,0	85	27	0,008	0,0006
22,5	105	74	0,021	0,0015
22,5	105	79	0,022	0,0016
21,15	103,5	77	0,021	0,0015
21,15	103,5	58	0,016	0,0011
20,25	75	33	0,009	0,0004

20,25	75	66	0,018	0,0009
20,25	75	62	0,017	0,0008
20,25	75	68	0,019	0,0009
20,25	75	71	0,020	0,0009
20,25	75	74	0,021	0,0010
20,25	75	73	0,020	0,0010
20,25	75	69	0,019	0,0009
20,25	75	48	0,013	0,0006

(Fuente: Propia)

Por lo que el costo de la energía eléctrica total utilizada es:

$$CEE_{total} \text{ [USD]} = 0,023$$

- **PROCESO SMAW-FCAW**

Tabla 3.53 Costo de energía eléctrica por períodos, proceso SMAW – FCAW.

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Tiempos parciales de arco [seg]	t [h]	CEE [USD]
22,7	53	63	0,0175	0,00066
22,7	57	14	0,0039	0,00016
24,0	54	30	0,0083	0,00034
22,5	60	44	0,0122	0,00052
23,9	61	90	0,0250	0,00115
24,0	77	20	0,0056	0,00032
23,0	72	12	0,0033	0,00017
26,0	64	49	0,0136	0,00071
15,8	95	57	0,0158	0,00075
25,95	64,5	80	0,0222	0,00117
22,7	77	33	0,0092	0,00050
25,5	62	22	0,0061	0,00030
29,25	85	45	0,0125	0,00098
29,45	85	29	0,0081	0,00064
29,4	82	21	0,0058	0,00044
27,3	82	29	0,0081	0,00057
18,8	148	43	0,0119	0,00105
18,8	152	60	0,0167	0,00150
18,4	144	38	0,0106	0,00088
18,4	148	49	0,0136	0,00117
20,25	75	99	0,0275	0,00132

20,25	75	100	0,0278	0,00133
20,25	75	56	0,0156	0,00074
20,25	75	104	0,0289	0,00138

(Fuente: Propia)

Por lo que el costo de la energía eléctrica total utilizada es:

$$CEE_{total} \text{ [USD]} = 0,018$$

- **PROCESO GTAW- SMAW**

Tabla 3.54 Costo de energía eléctrica por períodos, proceso GTAW – SMAW.

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Tiempos parciales de arco [seg]	t [h]	CEE [USD]
9,8	61	84	0,0233	0,00044
10,7	61	57	0,0158	0,00033
9,75	61	81	0,0225	0,00042
9,95	61	69	0,0192	0,00037
9,45	64	240	0,0667	0,00127
10,4	66	180	0,0500	0,00108
9,85	66	129	0,0358	0,00073
10,2	66	284	0,0789	0,00167
9,8	66	99	0,0275	0,00056
9,4	69	330	0,0917	0,00187
10,3	100	280	0,0778	0,00252
10,3	108	109	0,0303	0,00106
11,2	108	202	0,0561	0,00214
21,6	104	66	0,0183	0,00130
20,6	103	63	0,0175	0,00117
21,7	103	77	0,0214	0,00151
20,4	109	79	0,0219	0,00154
20	108	81	0,0225	0,00153
22	103	15	0,0042	0,00030
20,8	70	72	0,0200	0,00092
21,35	72	59	0,0164	0,00079
21,45	72	72	0,0200	0,00097
20,65	72	50	0,0139	0,00065
20,45	72	29	0,0081	0,00037
21,2	72	64	0,0178	0,00085
20,8	72	68	0,0189	0,00089

(Fuente: Propia)

Por lo que el costo de la energía eléctrica total utilizada es:

$$CEE_{total} [\text{USD}] = 0,027$$

- **PROCESO GTAW - FCAW**

Tabla 3.55 Costo de energía eléctrica por periodos, proceso GTAW – FCAW.

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Tiempos parciales de arco [seg]	t [h]	CEE [USD]
10	64	337	0,09361	0,00189
10,5	67	148	0,04111	0,00091
11	67	90	0,02500	0,00058
10	67	234	0,06500	0,00137
10,5	67	236	0,06556	0,00145
10	99	154	0,04278	0,00133
10,8	99	100	0,02778	0,00094
10,5	99	77	0,02139	0,00070
11,2	99	224	0,06222	0,00217
21	100	33	0,00917	0,00061
24	110	29	0,00806	0,00067
21	102	57	0,01583	0,00107
20,5	103	115	0,03194	0,00212
20,9	111	44	0,01222	0,00089
20	128	73	0,02028	0,00164
20,1	120	47	0,01306	0,00099
21,2	128	45	0,01250	0,00107
21	120	29	0,00806	0,00064
22	119	41	0,01139	0,00094
21,6	120	41	0,01139	0,00093
21,6	120	51	0,01417	0,00116
21,4	126	49	0,01361	0,00116
21,4	120	80	0,02222	0,00180
21,9	126	77	0,02139	0,00186
21,9	124	112	0,03111	0,00266

(Fuente: Propia)

Por lo que el costo de la energía eléctrica total utilizada es:

$$CEE_{total} [\text{USD}] = 0,032$$

3.3.3.4. Costos Generales

Para determinar los costos generales se utiliza la Ecuación 2.14 y el sueldo del soldador determinado en el apartado 3.3.1.

- **PROCESO SMAW**

Tabla 3.56 Costos generales proceso SMAW.

Actividades	tiempo [h]	Costo General [USD]
Posicionamiento	0,024	0,13
Preparación de la junta	0,060	0,34
Limpieza	0,036	0,20
Limpieza con amoladora	0,204	1,15
Limpieza con grata	0,082	0,46
Limpieza con piqueta	0,003	0,02
Disco de desbaste para siguiente pase	0,092	0,52
Limpieza con cepillo	0,001	0,01
Pruebas con soldadora	0,020	0,11

(Fuente: Propia)

Por lo que el Costo general total es el siguiente:

$$CG [USD] = 2,94$$

- **PROCESO SMAW - FCAW**

Tabla 3.57 Costos generales proceso SMAW – FCAW.

Actividad	Tiempo [hr]	Costo General [USD]
Posicionamiento	0,02	0,13
Preparación de la junta	0,03	0,19
Limpieza con amoladora	0,16	0,88
Limpieza con grata	0,07	0,39
Limpieza con martillo	0,04	0,20
Disco de desbaste para siguiente pase	0,08	0,45
Pruebas con soldadora	0,06	0,36

(Fuente: Propia)

Por lo que el Costo general total es el siguiente:

$$CG [USD] = 2,60$$

- **PROCESO GTAW – SMAW**

Tabla 3.58 Costos generales proceso GTAW – SMAW.

Actividad	Tiempo [hr]	Costo General [USD]
Posicionamiento	0,02	0,10
Preparación de la junta	0,03	0,15
Limpieza	0,26	1,44
Limpieza con amoladora	0,04	0,22
Limpieza con grata	0,06	0,33
Limpieza con martillo	0,004	0,02
Disco de desbaste para siguiente pase	0,07	0,39
Limpieza con cepillo	0,01	0,05
Pruebas con soldadora	0,08	0,46

(Fuente: Propia)

Por lo que el Costo general total es el siguiente:

$$CG [USD] = 3,16$$

- **PROCESO GTAW - FCAW**

Tabla 3.59 Costos generales proceso GTAW – FCAW.

Actividad	Tiempo [hr]	Costo General [USD]
Posicionamiento	0,03	0,142
Preparación de la junta	0,03	0,152
Limpieza	0,04	0,245
Limpieza con amoladora	0,12	0,661
Limpieza con grata	0,05	0,286
Disco de desbaste para siguiente pase	0,01	0,077
Limpieza con cepillo	0,00	0,023

(Fuente: Propia)

Por lo que el Costo general total es el siguiente:

$$CG [USD] = 1,59$$

3.3.3.5. Costo total de Soldadura

El costo total es la suma de todos los costos calculados anteriormente como se muestra en la Ecuación 2.15, como se muestra en la Tabla 3.60.

Tabla 3.60 Costo total de cada proceso.

	SMAW	SMAW - FCAW	GTAW- SMAW	GTAW- FCAW
CMO [USD]	7,99	6,75	10,80	8,61
CMP [USD]	833,33	833,33	833,33	833,33
CUH [USD]	0,91	0,89	1,24	1,10
CMA[USD]	3,18	1,35	3,66	1,31
CCO [USD]	0,00	1,28	67,15	63,20
CEE [USD]	0,02	0,02	0,03	0,03
CG [USD]	2,94	2,60	3,16	1,59
Costo total [USD]	848,37	846,22	919,37	909,17

(Fuente: Propia)

3.4. Discusión de la caracterización del material base

En este punto se detalla la caracterización del material base, el cual fue donado por la Empresa ACINDEC, como una tubería de especificación API 5L X52 por lo que, para validar dicha especificación dentro de la Norma API 5L se realizaron ensayos de composición química y de resistencia a la tracción.

3.4.1. Comportamiento Mecánico del material base

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción al material base se presentan en la Tabla 3.61, y su comparación con la Norma API 5L. Se evidencia que los resultados de la probeta al material base son:

Tabla 3.61 Comparación (ensayo de tracción) del material base y material de la Norma API 5L.

Valores determinados	Límite de fluencia, MPA	Resistencia a la tracción, MPA	% elongación en 50 mm
API 5L x 52 (mínimo)	359	455	---
Probetas ensayadas de material base (promedio)	440,5	503,5	30,75

(Fuente: Propia)

Al ser un material donado, no se tienen una certeza de si éste fue tratado térmicamente o si se realizó sobre este algún otro tratamiento que haya producido el cambio de las propiedades mecánicas. El límite de fluencia difiere en un 18,50% y la resistencia a la tracción en un 9,63%; por lo tanto, se concluye que el material base cumple con el requerimiento de las propiedades mecánicas.

3.4.2. Composición del Material Base

La comparación con la composición química que establece la Norma API 5L se presenta en la Tabla 3.62.

Tabla 3.62 Comparación (composición química) del material base y material de la Norma API 5L.

Componente	Norma API 5L X52, % (máx)	Ensayo de chispa, % M1
Carbono (C)	0,24	0,140
Manganeso (Mn)	1,30	0,352
Fósforo (P)	0,25	0,019
Azufre (S)	0,015	0,014
Titanio (Ti)	0,04	---

(Fuente: Propia)

Los componentes más importantes para la comparación, son el Carbono (C) el cuál, en la muestra 1 se diferencia del máximo del requerimiento en un 41,66%. El Manganeso en la muestra 1 se diferencia en un 72,92% al requerimiento. El fósforo en la muestra 1 se diferencia en un 92,4 % del requerimiento. Se analizan estos componentes debido a que son los más

representativos y se observa que los valores de las muestras son menores a los valores máximos que nos dicta la norma; por lo tanto, se verifica el material base como un API 5L X52

3.5. Discusión de soldadura

En esta sección se discute los resultados obtenidos tanto en los ensayos no destructivos como destructivos en cada combinación de procesos de soldadura.

3.5.1. Discusión de los ensayos no destructivos

En base a los resultados de la **Inspección Visual**, se determina:

- Los nepllos soldados P1, P2 y P3 presentan una mejor apariencia superficial en comparación a los nepllos P4 y P5, esto debido seguramente a que en la soldadora utilizada para el pase raíz y de relleno de cada proceso se pudo controlar de mejor manera el voltaje y amperaje. El neplo P4 presenta superficialmente la presencia de salpicaduras en el material base además de 2 poros en diferentes secciones del neplo.
- El neplo P3 es el de mejor apariencia superficial y además es el que cuenta con un ancho de cordón más homogéneo. En el neplo P5 se tiene una mordedura de aproximadamente 7 cm de largo entre los pases finales, debido a la dificultad de controlar el arco durante el proceso de soldadura FCAW ya que, al no existir una conexión eléctrica adecuada en el laboratorio, la energía necesaria usada en este proceso es más elevada. Este defecto se evidencia en el Ensayo Radiográfico.

Con los resultados obtenidos en el **Ensayo de Tintas Penetrantes**, se determina lo siguiente:

- De manera general en todos los nepllos soldados se evidencia la presencia de poros en el último pase, al igual que posibles mordeduras que serán evidenciadas posteriormente en el ensayo radiográfico.
- El cupón soldado P4 correspondiente a los procesos GTAW (pase raíz) y FCAW (pases de relleno), se rechaza debido a que presenta mordeduras y porosidades superficiales que se convierten en concentradores de esfuerzos y que según la Norma API 1104 no se aceptan si la suma de dichas discontinuidades es mayor a 2 pulg. (50 mm) en un rango de 12 pulg. (300 mm) como se define en el punto 1.6., siendo la suma de todas las discontinuidades de 145 mm, y a pesar de tomar secciones de 300 mm como indica la Norma no cumple con la suma menor a 50 mm, por esta razón este cupón queda rechazado.

En base a los resultados obtenidos en el **Ensayo Radiográfico**, se obtiene:

- El cupón soldado P4 correspondiente a los procesos GTAW (pase raíz) y FCAW (pases de relleno), se rechaza debido a que presenta inclusiones de escoria que según la Norma API 1104 no se aceptan si el largo o la suma de inclusiones de escoria en una longitud de 12 pulgadas, excede las 2 pulgadas (50 mm). La suma de las inclusiones en el perímetro de 12 pulgadas nos da 52.5 mm.
- Es necesario recalcar que debido a la cantidad de imperfecciones que se presentaron en el cupón soldado P4 (Procesos GTAW-FCAW) fue necesario realizar otra soldadura con los mismos procesos en nuevos nepllos de tubería, siendo esta el neplo 5 que se presenta en el informe.
- Defectología: con este punto se compara cada combinación de procedimientos y se determinará cuál o cuáles fueron los procedimientos con mayor cantidad de defectos tanto superficiales como internos, mediante los ensayos adecuados, destructivos y no destructivos. En la Tabla 3.63 se presentan los defectos superficiales de cada neplo soldado y en la Tabla 3.64 se presentan los defectos internos en cada neplo soldado.

Tabla 3.63 Defectos superficiales de cada neplo soldado.

DEFECTOS DE SOLDADURA SUPERFICIALES				
Procedimiento	Defectos (suma en mm)			
	Poros	% respecto a la longitud soldada	Mordeduras	% respecto a la longitud soldada
SMAW 6010 - 7018	18	0,038	10	0,021
SMAW 6010 - FCAW	67	0,140	45	0,094
GTAW - SMAW 7018	12,8	0,027	0	0,000
GTAW - FCAW	22	0,046	56	0,117

(Fuente: Propia)

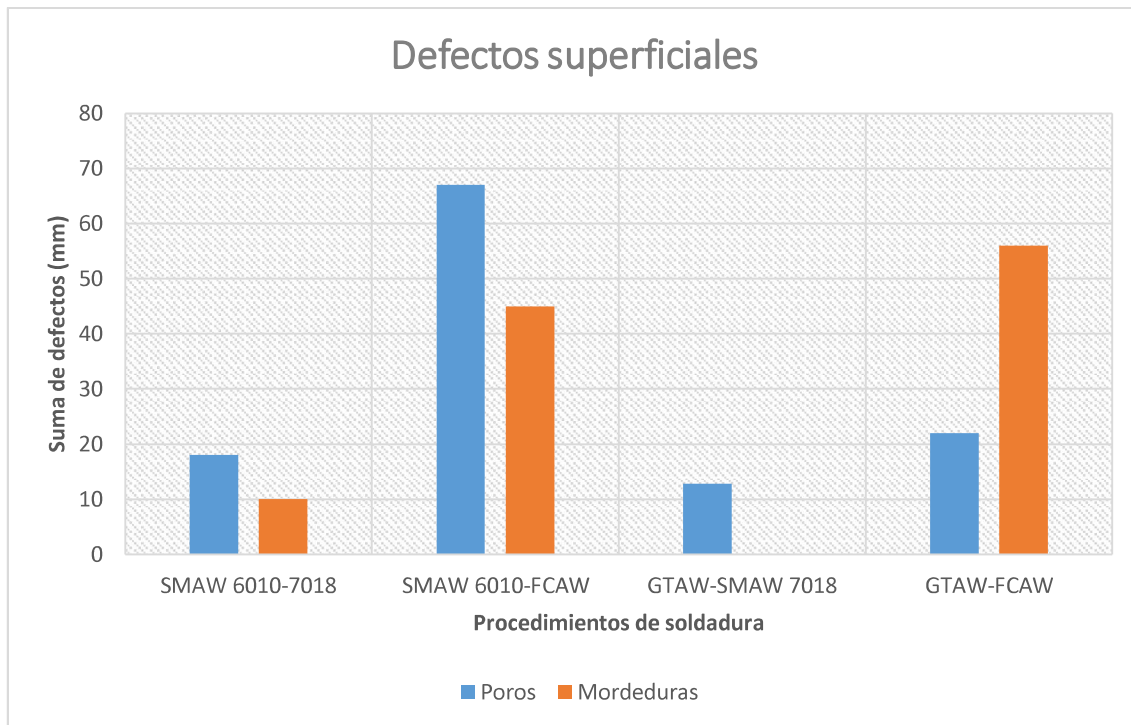


Figura 3.23 Gráfico comparativo de defectos superficiales, de cada neplo soldado.
(Fuente: Propia)

En el gráfico de barras de la Figura 3.23 se observa que la mayor cantidad de defectos superficiales corresponde a la combinación de procesos SMAW (6010) – FCAW, siendo la existencia de poros la predominante en este neplo, debido a un mal control de las variables (voltaje y amperaje) o también a que existieron corrientes de aire fuertes el momento de realizar la soldadura. Tomando en consideración que la longitud a ser soldada es de 47,85 cm en todos los neplos, en la misma Tabla 3.63 se presenta una comparación entre la longitud soldada y la suma de defectos. Se evidencia que el mayor porcentaje de defectos con respecto a la longitud soldada corresponde a poros del proceso SMAW 6010 – FCAW con un 0,14%, además que el proceso GTAW – SMAW (7018) es el que tiene un porcentaje mínimo de defectos, con el 0,027% de poros y 0% de mordeduras, siendo los menores porcentajes entre todos los procesos, corroborando lo definido en el gráfico de barras de la Figura 3.23.

Tabla 3.64 Defectos internos de cada neplo soldado.

Procedimiento	Defectos de Soldadura Internos							
	Defectos (suma en mm)							
	Poros	% respecto a la longitud soldada	Mordeduras	% respecto a la longitud soldada	Inclusiones de escoria	% respecto a la longitud soldada	Penetración excesiva	% respecto a la longitud soldada
SMAW 6010-7018	21	0,044	2	0,004	29	0,061	0	0,000
SMAW 6010-FCAW	0	0,000	4	0,008	78,5	0,164	0	0,000
GTAW-SMAW 7018	5	0,010	1,5	0,003	59,3	0,124	0	0,000
GTAW-FCAW	0	0,000	132,5	0,277	31,3	0,065	5	0,010

(Fuente: Propia)

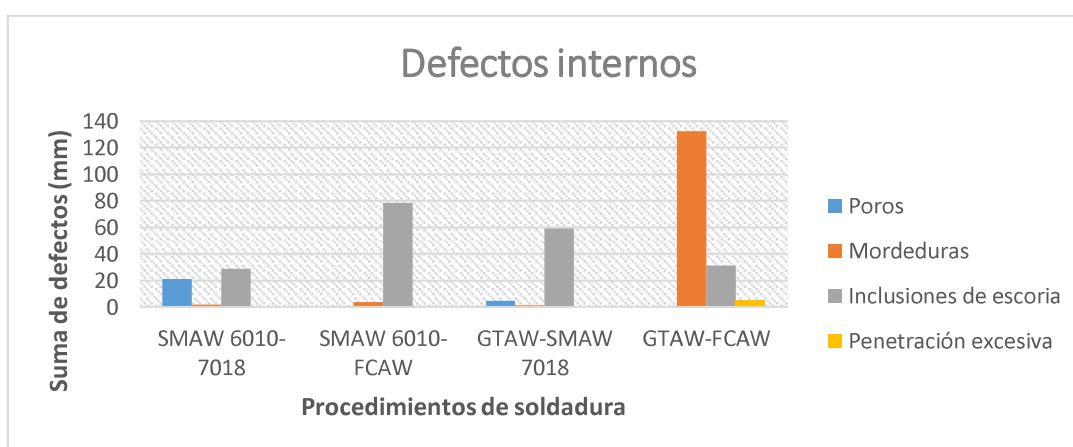


Figura 3.24 Gráfico comparativo de defectos superficiales, de cada neplo soldado.
(Fuente: Propia)

En el gráfico de barras de la Figura 3.24 se observa que la mayor cantidad de defectos internos corresponde a la combinación de procesos GTAW – FCAW, siendo la existencia de mordeduras la predominante en este neplo, debido principalmente a que el control del amperaje no fue al adecuado, produciendo un arco no uniforme el momento de soldar a causa de una conexión eléctrica inadecuada, en el laboratorio. Si se considera que la longitud a ser soldada es de 47.85 cm en todos los neplos, en la misma Tabla 3.64 se presenta una comparación entre la longitud soldada y la suma de defectos.

Se evidencia que el mayor porcentaje de defectos con respecto a la longitud soldada corresponde a poros del proceso GTAW – FCAW con un 0,277%, además realizando una comparación entre los porcentajes del proceso GTAW – SMAW (7018) y los demás procesos, éste tiene los menores porcentajes siendo un 0,010% de poros, 0,003% de mordeduras, 0,124% de inclusiones de escoria y 0% de penetración excesiva, valores que corroboran lo descrito en el gráfico de barras de la Figura 3.24.

3.5.2. Discusión de los ensayos destructivos

Con los resultados obtenidos en el **Ensayo de Tracción**, se tiene:

- Cada una de las Figuras desde la Figura 3.2 hasta la Figura 3.9 evidencian la falla de cada probeta en el material base; es decir, que se aprueban todas las probetas y por lo tanto la aprobación de todos los procesos de soldadura utilizados en el presente trabajo.
- En general en algunas de las probetas como se determinó en los ensayos no destructivos existían discontinuidades, pero que no sobrepasaban los límites establecidos en la Norma API 1104 por lo tanto es una causa para que en este ensayo las probetas no fallen en el cordón de soldadura.
- Propiedades mecánicas: éstas permitirán conocer cuál o cuáles de los procedimientos utilizados en el presente trabajo presentan propiedades mecánicas similares a las del material base.

Tabla 3.65 Resultados de ensayos de tracción de las probetas soldadas.

Codificación	Procedimientos de soldadura	Resistencia a la tracción	
		ksi	MPa
P1V1	SMAW 6010-7018	68	471,9
P1V2	SMAW 6010-7018	69	474,9
P2V1	SMAW - FCAW	68	469,2
P2V2	SMAW - FCAW	68	469,3
P3V1	GTAW - SMAW 7018	67	460,8
P3V2	GTAW - SMAW 7018	69	475,4
P4V1	GTAW - FCAW	67	463,2
P4V2	GTAW - FCAW	68	470,3

(Fuente: Propia)

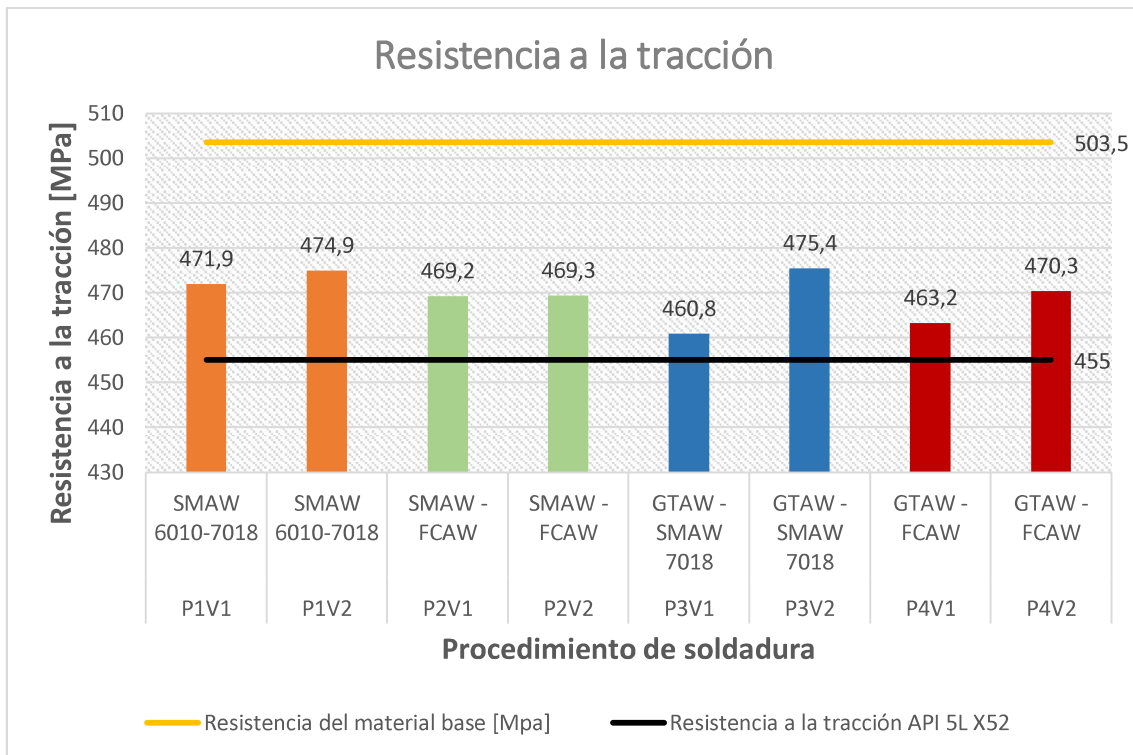


Figura 3.25 Gráfico comparativo del ensayo de tracción a las probetas soldadas, comparado con el material base y tubería X52 de la Norma API 5L.
(Fuente: Propia)

En base al requerimiento de la Norma API 1104, el cual se encuentra en la sección 3.4.1.2, se puede determinar que todas las probetas ensayadas tienen valores superiores al mínimo especificado de tracción (455 MPa) y por lo tanto cumplen con el requerimiento c) de dicha sección. Además, en la sección d) especifica que si la muestra se rompe fuera de la soldadura o de la ZAC a una resistencia a la tracción inferior del 95% de la resistencia a la tracción mínima especificada del material base (teórica, 455 MPa) se considera que la soldadura cumple con los requisitos. Considerando que la resistencia a la tracción es de 455 MPa, el 95% de la misma es 432,25 MPa y si se compara este valor con los obtenidos en cada probeta ensayada se observa que todas son mayores al mismo y por lo tanto la soldadura cumple con los requerimientos.

En base a los resultados obtenidos en el **Ensayo Nick Break**, se obtuvo que:

- Cada una de las Figuras desde la Figura 3.10 hasta la Figura 3.17 evidencian la aprobación de todas y cada una de las probetas.

- En la probeta P4W1 se realizó el entalle con moladora como una prueba para determinar si el uso de esta herramienta sería conveniente en todas las probetas. A pesar de que el entalle no tenía una mala apariencia, no se pudo realizar los entalles de las demás probetas con la misma herramienta, ya que al ser un total de 16 probetas se tendría un gasto elevado en discos de corte. Además, esta herramienta produce calor, pudiendo cambiar algunas de las propiedades de las probetas.

Como resumen de todos los ensayos destructivos y no destructivos en las probetas soldadas se presenta en el ANEXO XVII los PQRs correspondientes

3.6. Discusión de Metalografías

El contenido de carbono que nos muestra el ensayo de composición del material base en la Tabla 3.2, nos da a notar que es un acero hipoeutectoide, por lo tanto, se muestra en las metalografías del material base en la Tabla 3.4 la presencia de una matriz ferrítica-perlítica que es común en este tipo de aceros. Se puede observar que la tubería elegida, API 5L X52 PSL1, tuvo un proceso de laminado en caliente como se puede notar en las marcas transversales que forman la microestructura ferrítica-perlítica.

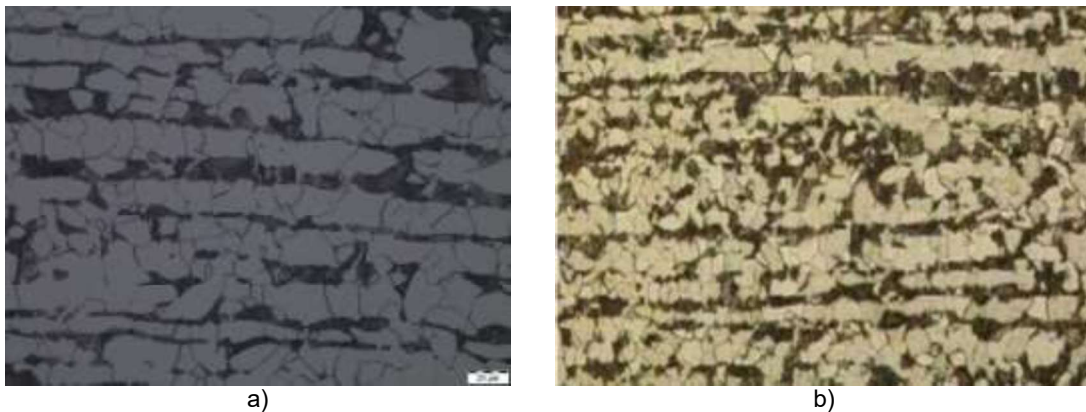


Figura 3.26 a) Material Base donde se muestra matriz ferrítica-perlítica, laminado en frío. (Fuente: Propia).
b) Matriz Ferrítica-Perlítica de un acero laminado en frío. (Fuente: Universidad de Barcelona, Materials).

En la zona entre el material de aporte 1, el material de aporte 2 y la ZAC de cada proceso existe en común entre los 4 procesos una zona de crecimiento columnar y crecimiento celular. En la zona del Material de Aporte en las cuatro probetas soldadas, aparece una microestructura conocida como Martensita Widmanstätten, que se presenta en la Figura 3.27, siendo esta una estructura no circular, que proporciona fragilidad. La ferrita aparece alrededor

del grano formando ramificaciones características de dicha estructura. Esta estructura aparece por altas temperaturas en el material de aporte y la velocidad de enfriamiento es muy alta para que se forme ferrita intergranular.

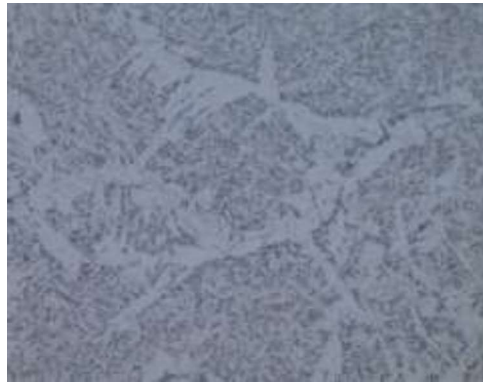


Figura 3.27 Martensita Widmanstätten.
(Fuente: Propia)

Adicionalmente, se realizaron mediciones del área de la ZAC en las macrográficas de cada una de las probetas soldadas, estos valores se presentan en la Tabla 3.66, esto con la finalidad de conocer cuál es el proceso donde el calor atrapado ha sido el mayor, es decir, donde este no pueda ser disipado rápidamente y por lo tanto produzca una mayor área de ZAC.

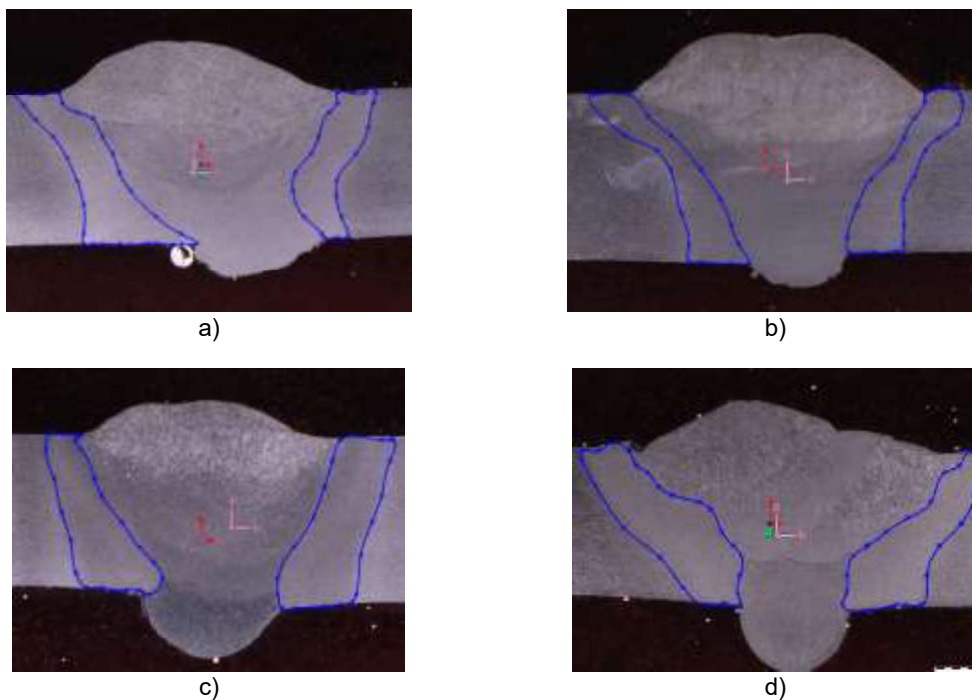


Figura 3.28 ZAC de los procesos realizados a) ZAC de proceso SMAW (E6010 – E7018). b) ZAC de proceso SMAW – FCAW. c) ZAC de proceso GTAW – SMAW. d) ZAC de proceso GTAW – FCAW.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.66 Áreas de la ZAC en cada proceso de soldadura.

Probetas	Área de la ZAC [mm²]
P1	31,21
P2	27,72
P3	36,94
P4	47,28

(Fuente: Propia)

Se determina que el proceso donde el área de la ZAC es mayor, es la combinación GTAW-FCAW, que concuerda con los resultados de dureza donde ésta es mayor que en las otras probetas soldadas, debido a que el calor atrapado es mayor y probablemente el tamaño de grano más pequeño en la ZAC en relación a las otras probetas soldadas, por lo que la dureza es mayor también.

3.7. Discusión de la dureza

Se puede observar los resultados por zonas físicamente señaladas en la Tabla 3.29 y en los valores en la Tabla 3.28. Para la obtención de cada valor de dureza fue necesario un solo barrido de cada probeta soldada, con la finalidad de ser comparadas con el material base y ver en cuanto fue afectada esta propiedad en relación al valor teórico obtenido para el material base en la sección 2.3.3.3.7.

En la Figura 3.28 se puede observar la comparación de durezas entre todas las probetas. Por lo tanto, tenemos:

- Los valores obtenidos en cada probeta, en la zona del material base es cercana a la obtenida teóricamente, siendo 94 HRB el valor más alto de dureza en la ZAC, lo cual ratifica los resultados obtenidos en la Tabla 3.66.
- La dureza a partir de la ZAC aumenta, lo cual indica la descomposición de la matriz ferrítico-perlítica y cuyo grano es más pequeño, produciendo una elevación en el grado de dureza de la misma.

3.8. Discusión de los costos involucrados en cada procedimiento

- **COSTO DE MANO DE OBRA Y MATERIA PRIMA**

Para la mano de obra se consideró el sueldo hora del soldador. Los cuatro procedimientos, fueron realizados por un mismo soldador, por lo que la única diferencia en los costos de los procedimientos fue el tiempo que se tomó en la soldadura. Por lo que se puede notar en la Figura 3.29 que el procedimiento más caro es el proceso GTAW-SMAW con un costo de \$10,80 debido a que es un procedimiento que involucra mayor calidad, el costo de este procedimiento es un 25% mayor al procedimiento GTAW-FCAW, un 35% mayor al procedimiento SMAW y finalmente un 60% al procedimiento SMAW-FCAW que es donde el soldador se demora menos tiempo.

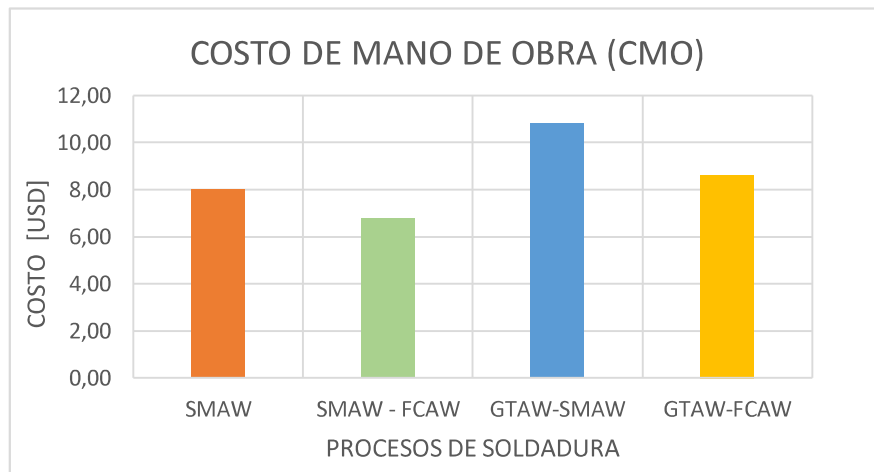


Figura 3.29 Costo de mano de Obra en los cuatro procedimientos.
(Fuente: Propia)

Si consideramos los sueldos referenciales reales aproximados de un soldador GTAW, SMAW y FCAW con sueldos de \$3500, \$3000 y \$1000 respectivamente, con una jornada de 14 días y 7 horas, el sueldo por hora se presenta en la Tabla 3.67. Realizando el cálculo con los tiempos de operación correspondientes, los resultados se muestran en la Figura 3.29.

Tabla 3.67 Sueldo por hora del Soldador.

Soldador	Sueldo [USD/hora]
SMAW	35,71
FCAW	11,90
GTAW	41,66

(Fuente: Propia)

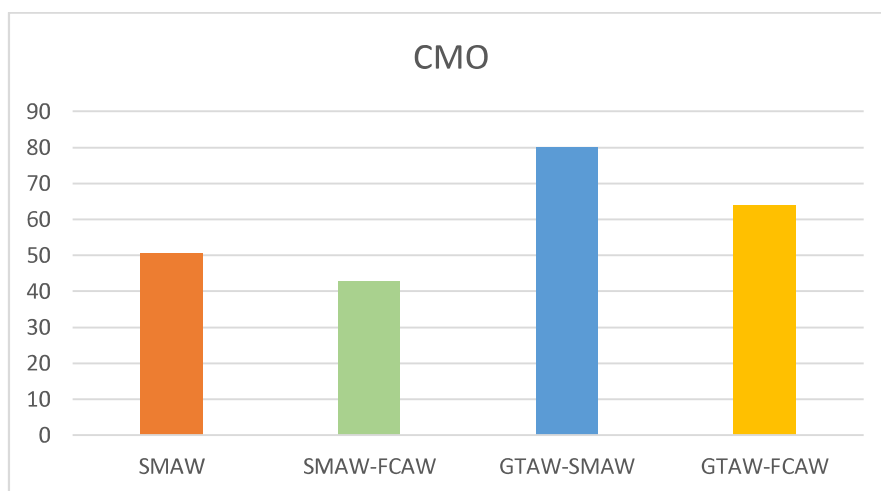


Figura 3.30 Costo de mano de obra en los cuatro procedimientos.
(Fuente: Propia)

Como se puede observar el costo de los procesos GTAW- SMAW y GTAW-FCAW son los procesos más caros en base al costo de mano de obra, como se observa en la Figura 3.30. Aunque en este caso donde la remuneración de los soldadores es diferente se nota que existe la misma diferencia proporcional entre procesos, debido a los tiempos de operación y a que los procesos más caros coinciden con la remuneración más alta.

- **COSTO DE EQUIPOS Y MAQUINARIA**

Se puede notar en la Figura 3.31, que existe un mayor costo hora de la máquina o soldadora utilizada en el proceso GTAW-SMAW debido al mayor tiempo de uso de la misma, el segundo proceso más caro en cuestión de maquinaria utilizada es el proceso GTAW-SMAW con un costo de \$0,81 con un 12% encima del proceso GTAW-FCAW, un 35% encima del proceso SMAW y un 39% encima del proceso SMAW-FCAW debido mayoritariamente al tiempo de operación y al alimentador de alambre que se usa con el procedimiento FCAW.

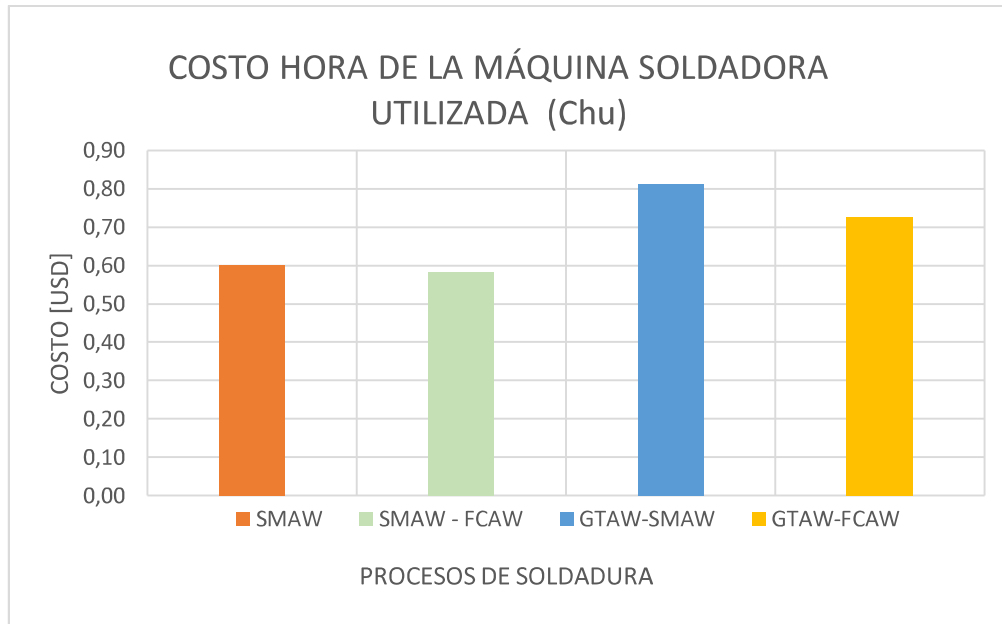


Figura 3.31 Costo de máquina soldadora utilizada en cada proceso.
(Fuente: Propia)

- **COSTO DE MATERIAL DE APORTE**

Como se puede observar en la Figura 3.32 el costo de material de aporte del procedimiento GTAW-SMAW es el más elevado siendo de \$3.66 superando el costo al procedimiento SMAW en un 15%, al proceso SMAW-FCAW con un 171% y al proceso GTAW-FCAW con un 180%. Todo esto es debido al costo elevado del electrodo E7018 como se muestra en la cotización del ANEXO XVI.

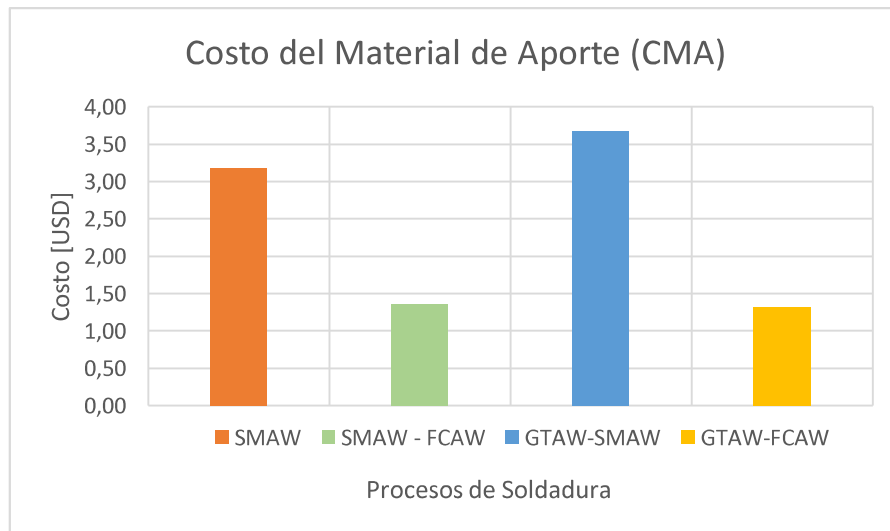


Figura 3.32 Costo de material de aporte utilizado en cada proceso.
(Fuente: Propia)

Los resultados anteriores son en base a mediciones de áreas y cálculos de densidad. A continuación, se hace una comparación de acuerdo a los electrodos consumidos realmente en el proceso como indica la Tabla 3.68, en esta misma tabla se indica la cantidad en masa de consumo que se conoce debido a que se pesó en una balanza los electrodos utilizados, con el fin de conocer el valor del kilogramo que pesa cada electrodo y el kilogramo por metro en el caso del electrodo E71T1.

Tabla 3.68 Consumo y Costo de Material de aporte.

Proceso	Electrodo	Número o longitud [m] de Electrodo consumidos	Material de Aporte Consumido [kg]	Costo por electrodo [USD]	Costo total por proceso [USD]
SMAW	E6010	9	0,252	0,72	5,96
	E7018	17	0,595	5,24	
SMAW-FCAW	E6010	17	0,595	1,69	2,68
	E71T1	48,9 [m]	0,233	0,99	
GTAW-SMAW	ER70S6	5	0,165	1,56	5,57
	E7018	13	0,455	4,01	
GTAW-FCAW	ER70S6	3	0,099	0,94	2,07
	E71T1	56,13 [m]	0,267	1,13	

(Fuente: Propia)

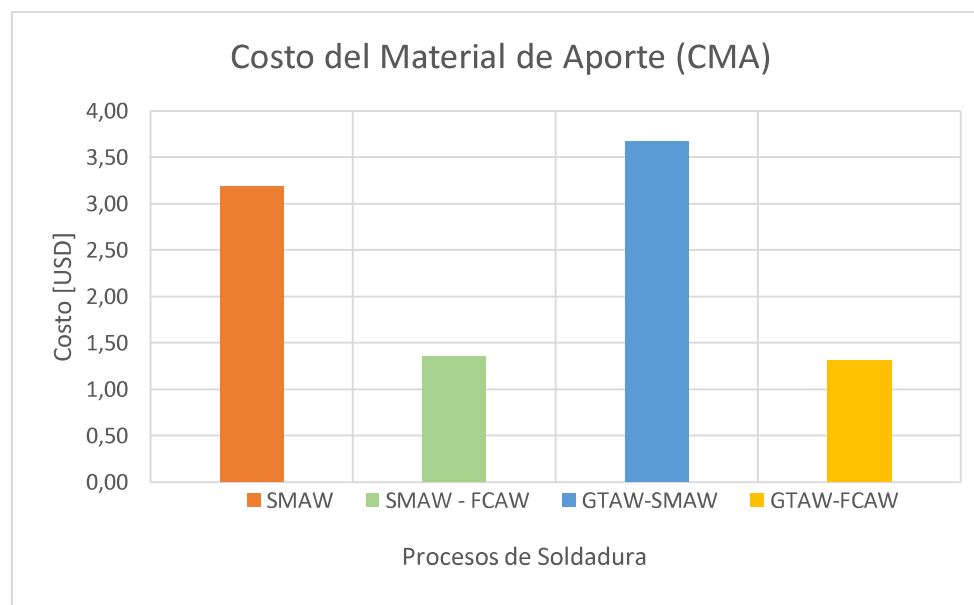


Figura 3.33 Costo de material de aporte medida.
(Fuente: Propia)

Se puede observar en la Figura 3.33 que los costos reales refiriéndonos al costo tomando en cuenta el número o metros de electrodos contados y consumidos al costo cuando se mide el consumo en masa mediante áreas en la junta soldada. Por lo tanto, con respecto a la medición teórica o de áreas, el proceso SMAW tiene un aumento del 47%, el procedimiento SMAW-FCAW tiene un aumento del 50%, el proceso GTAW-SMAW con un 34% y el procedimiento GTAW-FCAW con un 37%. La menor diferencia en cuestión de costos se da en el proceso GTAW-SMAW. En cuestión de masa, se tienen los siguientes índices de desperdicio de material de aporte del teórico o de mediciones de áreas con respecto al real o al realizado por conteo de electrodos utilizados, en estos porcentajes no se toma en cuenta el metal que ha sido depositado y luego retirado por procesos de limpieza. Los datos nombrados anteriormente se presentan en la Tabla 3.69

Tabla 3.69 Índice de desperdicio de Material.

Proceso	Electrodo	Índice
SMAW	E6010	67%
	E7018	63%
SMAW-FCAW	E6010	85%
	E71T1	8%
GTAW-SMAW	ER70S6	48%
	E7018	54%
GTAW-FCAW	ER70S6	49%
	E71T1	61%

(Fuente: Propia)

Se puede notar que donde se da la mayor pérdida es en el procedimiento SMAW-FCAW donde se da un 83% pérdida en el electrodo E6010 de SMAW debido a que es el pase de raíz y este debe ser desbastado para los pases de relleno. El desperdicio de electrodos se puede dar también por fallas del operador, el cual mientras manipula el electrodo, éste puede quedar fusionado con la unión soldada, por lo que debe ser desechado completo luego de la fusión, o debido a un amperaje no adecuado.

- **COSTO DE GASES DE PROTECCIÓN**

En cuanto a los gases de protección, como se observa en la Figura 3.34 el mayor costo se da en el proceso GTAW-SMAW, el gas usado fue el argón con una diferencia del 13% en cuestión

de costos al proceso GTAW-FCAW, la cual no es muy elevada, debido a que el gas de protección solo fue usado en el pase de raíz de los dos procedimientos.

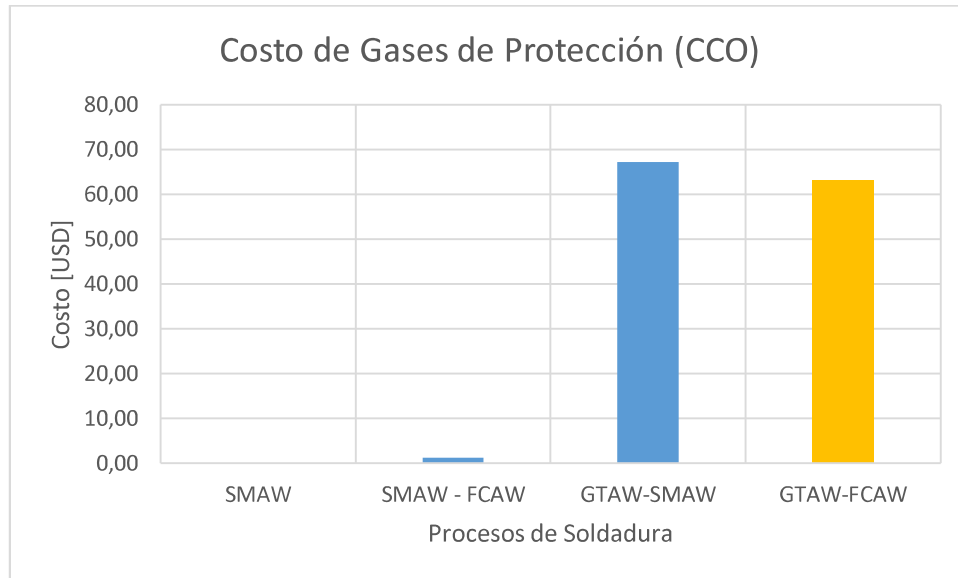


Figura 3.34 Costo de gases de protección en cada proceso.
(Fuente: Propia)

- **COSTO DE ENERGÍA Y EFICIENCIA DE LAS FUENTES**

El costo más alto en cuanto a eficiencia de las fuentes se da en el proceso GTAW-FCAW debido a que los dos procesos de manera independiente consumen más energía que el proceso SMAW. El tiempo de arco también tienen mucha influencia en el costo de la energía, mientras más alto el tiempo más costo se obtiene.

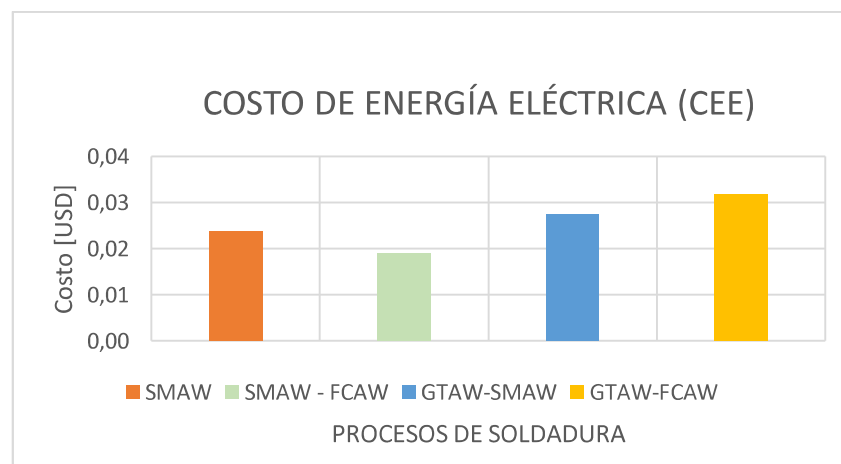


Figura 3.35 Costo de energía eléctrica en cada proceso.
(Fuente: Propia)

- **COSTOS GENERALES**

El proceso que más alto costo general tiene es el proceso GTAW-SMAW con un valor de \$3,16 y con una diferencia de costo en un 8% con el proceso SMAW el cual al igual que el proceso GTAW representa más calidad y por lo tanto se invierte más tiempo en la limpieza de la junta, un 22% con el proceso SMAW-FCAW y un 50% con el proceso GTAW-FCAW. En los dos últimos procesos mencionados, se toma en cuenta que el proceso FCAW que es de relleno en los dos, es un proceso que tiene mucha escoria y muy rápido, no se puede realizar limpieza entre pases.

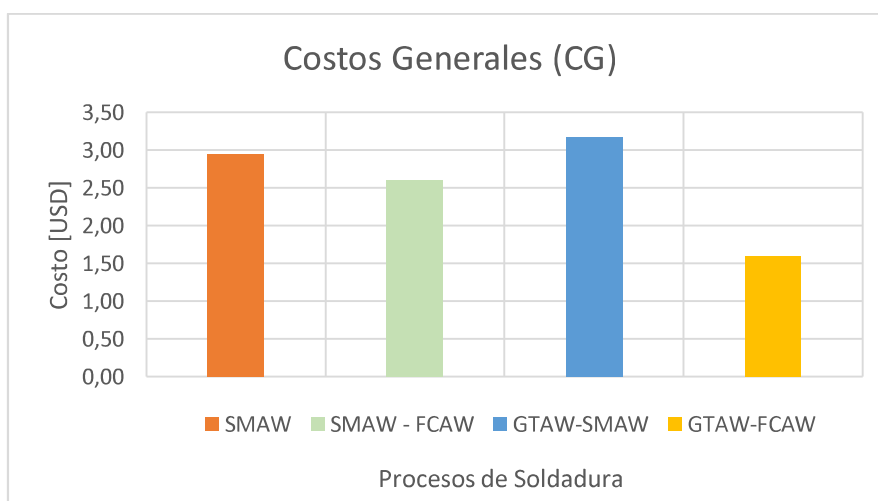


Figura 3.36 Costos generales de cada proceso.
(Fuente: Propia)

- **COSTO TOTAL**

Basándonos en los resultados obtenidos y con la suma de los costos anteriores. Se puede notar observando la Figura 3.37 que el proceso más costoso es el proceso GTAW – SMAW este tipo de combinación se suele destinar para procesos en tubería delgada, donde se requieren más para trabajos en estaciones y por lo tanto de más calidad. El proceso GTAW-SMAW supera en costo en un 8% al proceso SMAW, en 9% del proceso SMAW-FCAW y un 2% al proceso GTAW-FCAW

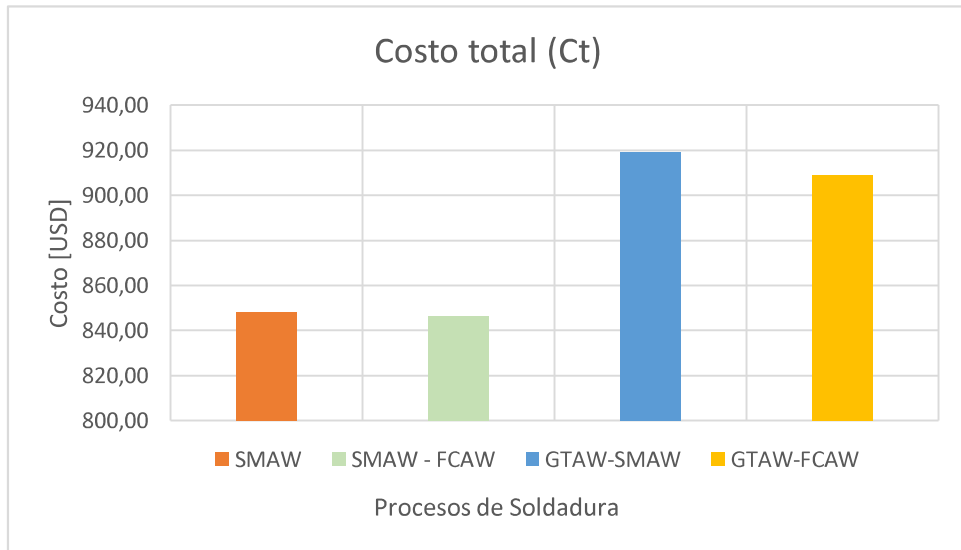


Figura 3.37 Costo total de cada procedimiento de soldadura utilizado.
(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. Conclusiones

- La tubería donada para el presente trabajo fue caracterizada, química y mecánicamente y cumplió con todos los requerimientos establecidos para una tubería API 5L X52 – PSL 1.
- Los procedimientos que tomaron más tiempo en ser realizados fueron GTAW – SMAW (1 hora y 55 minutos), lo que en la práctica si ocurre al ser el procedimiento GTAW más minucioso y que requiere mayor habilidad del soldador, así como valores más altos en los parámetros de voltaje y amperaje.
- El proceso FCAW tiene mayor productividad que SMAW y a pesar de que se necesita retirar la escoria, no presenta mayor cantidad de defectos, pero en el presente proyecto presentó mayor defectología (GTAW – FCAW) a causa del golpeteo que existió el momento de realizarse la soldadura por no existir una estabilidad en el voltaje del suministro eléctrico.
- Al usar amperajes elevados en los procesos GTAW y FCAW el tiempo de arco, así como el tiempo total de trabajo disminuyen, y como consecuencia estos procesos se realizan en un menor tiempo comparados con el proceso SMAW que es manual y requiere mayor control por parte del soldador para que el arco eléctrico sea uniforme y constante.
- El mayor esfuerzo de tracción se da en la probeta de GTAW-SMAW, de entre todas las probetas, esta combinación es la más resistente. Para un oleoducto es importante que la soldadura tenga una resistencia a la tracción apropiada, pero además también un esfuerzo de fluencia apropiado. Esta combinación de procesos (GTAW – SMAW) evidencia que es el mejor para oleoductos.
- La eficiencia del depósito en cuanto al material de aporte no se puede determinar de una manera exacta, por lo que en el presente trabajo se la menciona como índice de pérdida de masa, ya que al existir una gran cantidad de pérdidas de material entre pases (uso de amoladora para el siguiente pase) o cuando el electrodo no se consume por completo el momento de soldar y se desecha, esa cantidad de material no se toma en cuenta para el cálculo pertinente.
- Las macrográficas analizadas de cada proceso de soldadura estudiado muestran que la ZAC (Zona Afectada por el Calor) con mayor área es GTAW – SMAW, esto debido a que es el proceso de soldadura en el que se generó más calor. Una mayor área en la ZAC

genera también una mayor dureza, por lo que disminuye la resistencia a la tracción. Esta puede ser perjudicial en el momento en el que el oleoducto soporte cargas dinámicas.

4.2. Recomendaciones

- Para trabajos de investigación futuros, se recomienda medir la influencia del amperaje y voltaje de soldadura reales en las pérdidas de material de aporte depositado en la junta soldada.
- Los resultados obtenidos en el presente trabajo son netamente de laboratorio, pero es importante tomar en cuenta todos los cálculos realizados aquí y usarlos en proyectos industriales de campo.
- Se debe estudiar más a fondo la influencia del esfuerzo de fluencia en los procesos de soldadura, debido a la existencia de cargas dinámicas que actúan en el proceso de soldadura de un oleoducto.
- Una comparación de los procesos realizados en el presente trabajo con una tubería de mayor diámetro, puede servir para verificar o no si las combinaciones de procesos tienen el mismo impacto en tuberías con mayor diámetro y como se ve influenciada por los costos, defectología y propiedades mecánicas.
- Al realizar montajes de tubería en campo con combinaciones de procesos como las del presente trabajo, es necesario considerar que FCAW se realiza como Inershield (sin protección de CO₂), pero al realizarse este tipo de procesos en laboratorio se trabaja con Outershield (con protección de CO₂), por lo tanto, se debe escoger adecuadamente los procesos en función de las necesidades o requerimientos del trabajo a realizarse (en campo o en laboratorio).

Referencias bibliográficas

- [1] API 5L (2004). *Specification for line Pipe*. Washington: American Petroleum Institute.
- [2] API 1104 (2016). *Welding of Pipelines and Related Facilities*.
- [3] ASTM E8 / E8M-16a, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [4] AWS A5.18 (2005). *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*.
- [5] AWS A5.20 (2015). *Specification for Carbon Steel. Electrodes for Flux. Cored Arc Welding*.
- [6] AWS A5.1 (2004). *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*.
- [7] ASTM E94/E94M (2017). *Guide for Radiographic Examination Using Industrial Radiographic Film*.
- [8] ASTM E165/E165M (2018). *Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry*.
- [9] ASTM E18 (2019). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.
- [10] Lincoln Electric, (1999-2018). *Soldadura de tubería de alto rendimiento*. México. Recuperado: <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/support/process-and-theory/Pages/high-yield-pipe-detail.aspx>
- [11] Horwitz, H., (1997), *Soldadura Aplicaciones y Práctica*, México D.F., México, Alfaomega Grup Editor, S.A. de C.V.
- [12] Ashby Michael F./Jones David R. H., (2008), *Materiales para ingeniería 1 – Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*, España, Editorial Reverté, S. A.
- [13] Groover, Mikell, (2007), *Fundamentos de manufactura moderna*, 3ra. Edición, México, McGraw-Hill Interamericana.
- [14] Jeffus Larry, (2012), *Welding Principles and Applications*, 7th edition, NY USA, Delmar, Cengage Learning.
- [15] Espinosa Julian, (2013), *Manual práctico de carpintería metálica*, 1ra. Edición, Madrid, España, Visión libros.
- [16] Tecnología de Soldadura, Laboratorio de Soldadura, (2012), Quito - Ecuador.

- [17] Remache, N. (2016). *Modelos basados en inteligencia artificial para el análisis y simulación de WPS, PQR y WPQ de tubería API 5L X70 de transporte de crudo*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [18] World Iron and Steel, (2016). *¿Cuál es la diferencia entre API X42 y X52 Pipe?* Baqiao, China. Recuperado: <http://es.worldironsteel.com/news/what-s-the-difference-between-api-x42-and-x52-15162903.html>
- [19] Universidad de Barcelona. (2015). *Materials*. Barcelona, China. Recuperado: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/acero-al-carbono-035-c-laminado-en-frio>
- [20] Jenney, C. L., & O'Brien, A. (2001). *Welding science and technology*. Welding Handbook, American Welding Society, Welding Handbook Committee.
- [21] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 5ta Edición. México. Pearson Educación.
- [22] Ringegni P. (2013). *Cálculo de uniones soldadas*. Mecanismos y elementos de máquina. 6ta. Edición. Departamento de Aeronáutica, U.N.L.P.
- [23] AGA (2018). *Catálogo de electrodos comunes, especiales & Gases para corte y soldadura*. Versión Digital 2.0
- [24] Soldexa (2000). *Manual de soldadura & catálogo de productos*. 7ma Edición. Lima, Peru. Oerlikon. www.soldexa.com.pe
- [25] Castro J., Serrano C., (2016). *Influencia del tamaño de las discontinuidades en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas bajo la Norma API 1104 (Tesis de Maestría)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [26] Criollo S., (2011). *Determinación de los costos de soldadura por arco sumergido, en la producción de elementos estructurales (Tesis de Pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [27] Carvajal J., Romero J., (2011). *Análisis y evaluación de las propiedades mecánicas de resistencia en juntas soldadas bajo el proceso Fcaw afectadas por elevadas temperaturas (incendios), aplicando métodos de ultrasonido y ensayos mecánicos (Tesis de Pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [28] Andrade J., (2007). *Elaboración de un manual para prácticas de la materia de soldadura de mantenimiento (Tesis de Pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [29] Saenz J., & Ramirez S, C. (2010). *Diseño y Calibración de un WPS, PQR y WPQ de Soldadura Según Norma API 1104 Para la Estación de Recolección Campo Escurla Colorado*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

- [30] Yescas Gonzales, M. (1998). *Estudio en Soldaduras de Tuberías de Acero al Carbono (Tesis de Maestría)*. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- [31] Mancheño M., Fernández C., (2017). *Manual de prácticas de soldadura con electrodo revestido*. Paraninfo. España.
- [32] Cembrero Cil J., Ferrer Giménez C., Pacual Guillamón M., Pérez Puig M.A., (2005). *Ciencia y tecnología de materiales. Problemas y cuestiones*. Pearson Prentice Hall. Madrid, España.
- [33] Marcos C. A., (2017). *Soldadura TIG de acero carbono UF1626*. Paraninfo. Alcalá de Henares, Madrid, España.
- [34] Domínguez E., Ferrer J., (2014). *Mecanizado y soldadura*. Editex. Madrid, España.
- [35] Lobjois Ch. (2004). *Uniones y soldaduras. Provisionales y permanentes*. Ceac técnico mecánica. Barcelona, España.
- [36] Sánchez Marchante M. J., (2017). *Soldadura en el montaje de tuberías*. ic editorial. Málaga, España.

ANEXOS

ANEXO I: FICHA TÉCNICA ELECTRODO E6010

ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

Lincoln® 6010 AS

Acero Dulce, Celulósico • AWS E6010

Características Principales

- ▶ Buena Penetración.
- ▶ Escoria suave con mínima interferencia de arco.
- ▶ Buen desempeño en todas las posiciones.

Conformidad

AWS A5.1/A5.1M: 2012 E6010

Aplicaciones Típicas

- ▶ Aceros con presencia de contaminantes en la superficie
- ▶ Soldadura de uniones a tope y pasos de raíz.
- ▶ Soldadura de aceros galvanizados.

Posiciones de Soldadura

Todas.

DIÁMETROS / EMPAQUE

Diámetro pulg. (mm)	Longitud pulg. (mm)	Capsula 11 lb (5 kg.) Caja Master 44 lb (20 kg.)
3/32 (2.4)	14 (350)	503203
1/8 (3.2)	14 (350)	503204
5/32 (4.0)	14 (350)	503205

PROPIEDADES MECÁNICAS⁽¹⁾. De acuerdo con AWS A5.1/A5.1M: 2012

	Resistencia a la Cedencia ⁽²⁾ Mpa (ksi)	Resistencia a la Tensión Mpa (ksi)	Elongación %	Charpy V-Notch J(ft*lb) @ -20°C (-30°F)
Requerimiento AWS E6010	330 (48) mín.	430 (60) mín.	22 mín.	(20)
Resultados Típicos ⁽³⁾ . Tal como se soldó, Diámetro del Electrodo 1/8" (3.2 mm)	560 (80)	620 (90)	25	(30)

COMPOSICIÓN QUÍMICA⁽¹⁾. De acuerdo con AWS A5.1/A5.1M: 2012

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr
Requerimiento AWS E6010	0.20 máx.	1.20 máx.	1.00 máx.	0.30 máx.	0.20 máx.
Resultados Típicos ⁽³⁾ .	0.14	0.35	0.17	0.03	0.02
	%Mo	%V	%P	%S	
Requerimiento AWS E6010	0.30 máx.	0.08 máx.	No especificado	No especificado	
Resultados Típicos ⁽³⁾ .	0.00	0.008	0.012	0.010	

PROCEDIMIENTOS TÍPICOS DE OPERACIÓN

Polaridad ⁽⁴⁾	3/32 pulg. (2.4mm)	1/8 pulg. (3.2mm)	5/32 pulg. (3.2mm)
DC+	40-70	70-120	90-160
DC-	50-80	80-130	100-175

(1) Típico todo metal de soldadura. (2) Medido a un 0.2% (3) Ver notas de resultados de prueba abajo. (4) Polaridad sugerida aparece en primer lugar.

LINCOLN ELECTRIC COMPANY

ANEXO II: FICHA TÉCNICA ELECTRODO E7018

ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

Lincoln® 7018-1

Acero Dulce, Bajo Hidrógeno • AWS E7018-1

Características Principales

- ▶ Diseñado para aplicaciones críticas fuera de posición.
- ▶ Le proporciona al soldador un charco de soldadura excelente y limpio, con muy buen seguimiento de la escoria y afinado superior sin socavaciones.
- ▶ Óptimo desempeño para la soldadura de aceros con soldabilidad marginal.

Posiciones de Soldadura

Todas.

Conformancia

AWS A5.1/A5.1M: 2004

E7018-1

Aplicaciones Típicas

- ▶ Excelente para empalmar paredes laterales sin socavaciones, especialmente apropiado para aplicaciones críticas fuera de posición.
- ▶ Soldadura de aceros estructurales y puentes, aceros suaves, algunos aceros de alta resistencia y aceros de baja aleación; aceros de difícil soldabilidad tales como aceros con alto contenido de azufre y silicio.
- ▶ Soldadura de tuberías, conexiones y empalmes en las industrias petroquímicas y generadoras de energía.
- ▶ Soldaduras donde se requieren propiedades de tenacidad a -50°F.

DIÁMETROS / EMPAQUE

Diámetro in (mm)	Longitud in (mm)	Lata 38.5 lb (17.5 kg.)	Lata 39.7 lb (18 kg.)	Lata 48.5 lb (22 kg.)	Lata 53 lb (24kg.)
3/32 (2.4)	14 (350)		3078771		
1/8 (3.2)	14 (350)	3078772			
5/32 (4.0)	18 (457)				307808733
3/16 (4.8)	18 (457)			307808734	

PROPIEDADES MECÁNICAS⁽¹⁾. De acuerdo con AWS A5.1/A5.1M: 2004

	Resistencia a la Cedencia ⁽²⁾ Mpa (ksi)	Resistencia a la Tensión Mpa (ksi)	Elongación %	Charpy V-Notch J (ft*lb) @ -46°C (-50°F)
Requerimiento AWS E7018-1	400 (58) mín.	483 (70) mín.	22 mín.	(20)
Resultados Típicos ⁽³⁾ . Tal como se soldó, Diámetro del Electrodo 1/8" (3.2 mm)	543 (79)	600 (87)	34	(130)

COMPOSICIÓN QUÍMICA⁽¹⁾. De acuerdo con AWS A5.1/A5.1M: 2004

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr
Requerimiento AWS E7018-1	0.15 máx.	1.60 máx.	0.75 máx.	0.30 máx.	0.20 máx.
Resultados Típicos ⁽³⁾ .	0.045	0.97	0.32	0.03	0.03
	%Mo		%V		
Requerimiento AWS E7018-1	0.30 máx.		0.08 máx.		
Resultados Típicos ⁽³⁾ .	0.01		0.009		

PROCEDIMIENTOS TÍPICOS DE OPERACIÓN

Polaridad ⁽⁴⁾	3/32 in. (2.4 mm)	Corriente (Amps) 1/8 in (3.2 mm)	5/32 in (4.0 mm)	3/16 in (4.8 mm)
C.A	80 – 120	100 – 160	140 – 210	200 – 300
C.D +	70 – 110	90 – 160	130 – 210	180 – 300

(1) Típico todo metal de soldadura. (2) Medido con un 0.2% de desviación. (3) Ver notas de resultados de prueba abajo. (4) Datos de Especificación de Industria (AWS no obligatorio). (5) Polaridad sugerida aparece en primer lugar.

LINCOLN ELECTRIC COMPANY

ANEXO III: FICHA TÉCNICA ELECTRODO E71T-1



UltraCore® 71A85

Mild Steel, All Position • AWS E71T-1M-H8, E71T-9M-H8

Key Features

- ▶ Fast freezing slag for out-of-position welding
- ▶ Designed for welding with 75 - 85% Argon/ balance CO₂ shielding gas
- ▶ Premium arc performance and bead appearance
- ▶ Meets AWS D1.8 seismic lot waiver requirements

Conformances

AWS A5.20/A5.20M: 2005	E71T-1M-H8, E71T-9M-H8
ASME SFA-A5.20:	E71T-1M-H8, E71T-9M-H8
ABS:	3YSA H10
Lloyd's Register:	3YS H10
DNV Grade:	III YMS H10
CWB/CSA W48-06:	E491T-9M H8
EN ISO 17632-B:	T493T1-1MA-H10
FEMA 353	
AWS D1.8	

Typical Applications

- ▶ Shipbuilding
- ▶ Seismic structural fabrication
- ▶ General fabrication

Welding Positions

All

Shielding Gas

75% - 85% Argon / Balance CO₂
Flow Rate: 40 - 50 CFH

DIAMETERS / PACKAGING

Diameter in (mm)	15 lb (6.8 kg) Plastic Spool 60 lb (27.2 kg) Master Carton	33 lb (15 kg) Spool*	50 lb (22.7 kg) Fiber Spool	500 lb (227 kg) Accu-Trak® Drum
0.045 (1.1)	ED031885	ED031663	ED031847	ED032047
0.052 (1.3)	ED031886	ED031664	ED031848	ED032048
1/16 (1.6)	ED031887	ED031665	ED031849	ED032049

*Spool may be plastic or fiber

MECHANICAL PROPERTIES⁽¹⁾ – As Required per AWS A5.20/A5.20M: 2005

	Yield Strength ⁽²⁾ MPa (ksi)	Tensile Strength MPa (ksi)	Elongation %	Charpy V-Notch J (ft•lbf)	
				@ -18°C (0°F)	@ -29°C (-20°F)
Requirements⁽⁴⁾ AWS E71T-1M-H8, AWS E71T-9M-H8	400 (58) min.	480-655 (70-95)	22 min.	27 (20) min. Not Specified	Not Specified 27 (20) min.
Typical Results⁽¹⁾ As-Welded with 75%-85% Ar/balance CO ₂	550-600 (80-88)	600-650 (87-94)	24 - 26	64-115 (47-85)	43-95 (32-70)

UltraCore[®] 71A85
(AWS E71T-1M-H8, E71T-9M-H8)

DEPOSIT COMPOSITION⁽¹⁾ – As Required per AWS A5.20/A5.20M: 2005

	%C	%Mn	%Si	%S	%P	Diffusible Hydrogen (mL/100g weld deposit)
Requirements⁽¹⁾ AWS E71T-1M-H8, E71T-9M-H8	0.12 max.	1.75 max.	0.90 max.	0.03 max.	0.03 max.	8.0 max.
Typical Results⁽²⁾ As-Welded with 75%-85% Ar/balance CO ₂	0.03-0.04	1.43-1.56	0.52-0.59	<0.01	0.01	6-8

TYPICAL OPERATING PROCEDURES

Diameter, Polarity Shielding Gas	CTWD ⁽³⁾ mm (in)	Wire Feed Speed m/min (in/min)	Voltage (volts)	Approx. Current (amps)	Melt-Off Rate kg/hr (lb/hr)	Deposition Rate kg/hr (lb/hr)	Efficiency (%)	
0.045 in (1.1 mm), DC+ 75%-85% Ar/ balance CO ₂	25 (1)	All Position						86-88
		4.4 (175)	21-26	125	1.8 (4.0)	1.6 (3.5)		
		6.4 (250)	22-27	150	2.6 (5.7)	2.3 (5.0)		
		7.6 (300)	23-28	165	3.1 (6.8)	2.7 (6.0)		
		8.9 (350)	23-29	190	3.6 (8.0)	3.2 (7.0)		
		10.2 (400)	25-30	205	4.1 (9.1)	3.6 (8.0)		
		11.4 (450)	26-31	225	4.7 (10.3)	4.1 (9.0)		
		Flat & Horizontal						
		12.7 (500)	27-32	245	5.2 (11.4)	4.5 (10.0)		
		14.0 (550)	28-33	265	5.7 (12.5)	5.0 (10.9)		
15.2 (600)	28-34	280	6.2 (13.7)	5.4 (11.9)				
0.052 in (1.3 mm), DC+ 75%-85% Ar/ balance CO ₂	25 (1)	All Position						86-88
		3.8 (150)	21-26	150	2.0 (4.5)	1.8 (3.9)		
		5.1 (200)	21-27	165	2.7 (6.0)	2.4 (5.2)		
		6.4 (250)	22-27	190	3.4 (7.5)	2.9 (6.5)		
		7.6 (300)	23-28	215	4.1 (9.0)	3.5 (7.8)		
		8.9 (350)	24-29	235	4.7 (10.5)	4.1 (9.1)		
		9.5 (375)	25-30	255	5.1 (11.2)	4.4 (9.8)		
		Flat & Horizontal						
		10.8 (425)	26-31	275	5.8 (12.7)	5.0 (11.1)		
		12.1 (475)	27-32	295	6.4 (14.2)	5.6 (12.4)		
12.7 (500)	27-33	315	6.8 (15.0)	5.9 (13.0)				
1/16 in (1.6 mm), DC+ 75%-85% Ar/ balance CO ₂	25 (1)	All Position						86-88
		3.2 (125)	20-25	185	2.4 (5.3)	2.1 (4.6)		
		4.4 (175)	21-26	215	3.3 (7.4)	2.9 (6.4)		
		5.1 (200)	22-27	235	3.8 (8.4)	3.3 (7.3)		
		5.7 (225)	23-28	265	4.3 (9.5)	3.7 (8.2)		
		6.4 (250)	24-29	285	4.8 (10.5)	4.2 (9.2)		
		7.6 (300)	25-30	315	5.7 (12.6)	5.0 (11.0)		
		Flat & Horizontal						
		8.3 (325)	26-31	335	6.2 (13.7)	5.4 (11.9)		
		8.9 (350)	27-32	365	6.7 (14.7)	5.8 (12.8)		
10.2 (400)	28-33	385	7.6 (16.8)	6.6 (14.6)				

⁽¹⁾Typical all weld metal. ⁽²⁾Measured with 0.2% offset. ⁽³⁾See test results disclosure below. ⁽⁴⁾As-Welded with 75%-85% Argon/Balance CO₂. ⁽⁵⁾As estimate (50% additional 1/4 in. & 3/16 in. from CTWD).
NOTE: AWS E71T-1M and AWS E71T-9M are structural steel welding applications and data can be found on this product at www.lincolnelectric.com. NOTE: This product contains nickel-cadmium elements. Additional information available upon request.

ANEXO IV: FICHA TÉCNICA MATERIAL DE APORTE ER70S-6



VARILLAS TIG PARA SOLDADURA DE ACEROS AL CARBONO Y BAJA ALEACIÓN

Producto	Dimensiones Ø (mm)	Referencia	Paquete (Kg.)	Propiedades mecánicas típicas	
OK Tigrod 12.60 AWS A5.18.: ER70S-3 EN 636-A: W2Si DC -	1.60	126016R150	5.0	Límite Elástico (MPa)	420
	2.00	126020R150	5.0	Resistencia a la tracción (MPa)	515
	2.40	126024R150	5.0	Impacto Charpy V (J) @ -30 °C	90
	3.20	126032R150	5.0		
	Gas de Protección: Ar				

Aplicaciones: El OK Tigrod 12.60 es una varilla de acero suave con manganeso y silicio, revestida de cobre, para el soldeo TIG (GTAW) de aceros estructurales no aleados, con una resistencia mecánica hasta 500 MPa y para aceros al carbono de grano fino con un límite elástico hasta 400 MPa.

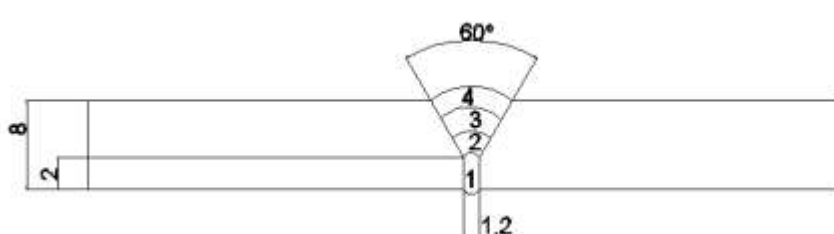
OK Tigrod 12.61 AWS A5.18.: ER70S-6 EN 636-A: W3Si1 DC -	1.60	126116R150	5.0	Límite Elástico (MPa)	470
	2.00	126120R150	5.0	Resistencia a la tracción (MPa)	560
	2.40	126124R150	5.0	Impacto Charpy V (J) @ -30 °C	70
	3.20	126132R150	5.0		
	Gas de Protección: Ar				

Aplicaciones: El OK Tigrod 12.61 es una varilla de acero suave cobreada, para soldeo TIG (GTAW) de aceros no aleados y de grano fino usados en estructuras, recipientes a presión, tuberías y construcción naval, con límites elásticos mínimos hasta 420 MPa.

ANEXO V: WPS PROCESO SMAW

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)							
Nombre Compañía: EPN PQR No.:			WPS No.: 1 Fecha: 8/4/2019 Realizado Por: Sara Rosero Organización:				
ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA			ARTÍCULO II. TÉCNICA DE SOLDADURA				
Tipo de Junta: A tope Abertura de Raíz: 1,2 mm (+0.4mm) Talón: 2,0 mm (+- 0,5mm) Ángulo de Ranura: 60° Placa de Respaldo: Si () No (X) Preparar bisel: Si (X) No () Método: Amolado			Proceso de Soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual (X) Semiautomática () Automática () Soldadura a: Un lado (X) Dos Lados () Cordón de respaldo: Si () No (X) Limpieza: Pase Raíz: Moladora Pases Siguietes: Cepillo Metálico y Grata				
ARTÍCULO III. METAL BASE			ARTÍCULO V. POSICIÓN DE SOLDADURA				
Especificación: ASTM A106 GrB Denominación API: API 5L X42 Espesor: 0,31 " / 7,92 mm Diámetro: 6" / 152,4 mm			Posición de soldadura: 6G Progresión: Descendente / Ascendente Técnica: Múltiples Pases				
ARTÍCULO IV. METAL DE APORTE			ARTÍCULO VI. NOTAS				
Proceso	SMAW	SMAW	Asegurar Limpieza de las Partes Verificar alineación de la Junta				
Denominación Comercial:	E6010	E7018					
Especificación	AWS A5.1	AWS A5.1					
Diámetro:	1/8" / 3,2mm	1/8" / 3,2mm					
Casa Comercial	Indura	Indura					
ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN							
Proceso	-	-					
Tipo de Gas	-	-					
Tasa de aporte	-	-					
DETALLE DE LA JUNTA							
No. De Pase	Metal de Aporte		Corriente		Tensión de Trabajo (Voltios)	Vel. De avance (m/min)	Técnica de Soldadura
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y Polaridad	Intensidad (Amperios)			
1-2	E6010	3,2	DC+	60 -105	20-30		Recto
3-4	E7018	3,2	DC+	75 -105	20-30		Oscilatorio

ANEXO VI: WPS PROCESO SMAW- FCAW

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) </div>							
Nombre Compañía: EPN PQR No.:			WPS No.: 1 Fecha: 8/4/2019 Realizado Por: Sara Rosero Organización:				
ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA			ARTÍCULO II. TÉCNICA DE SOLDADURA				
Tipo de Junta: A tope Abertura de Raíz: 1,2 mm (+0.4mm) Talón: 2,0 mm (+- 0,5mm) Ángulo de Ranura: 60° Placa de Respaldo: Si () No (X) Preparar bisel: Si (X) No () Método: Amolado			Proceso de Soldadura: SMAW - FCAW Tipo de Soldadura: Manual (X) Semiautomática (X) Automática () Soldadura a: Un lado (X) Dos Lados () Cordón de respaldo: Si () No (X) Limpieza: Pase Raíz: Moladora Pases Siguietes: Cepillo Metálico y Grata				
ARTÍCULO III. METAL BASE			ARTÍCULO V. POSICIÓN DE SOLDADURA				
Especificación: ASTM A106 GrB Denominación API: API 5L X42 Espesor: 0,31 " / 7,92 mm Diámetro: 6" / 152,4 mm			Posición de soldadura: 6G Progresión: Descendente / Ascendente Técnica: Múltiples Pases				
ARTÍCULO IV. METAL DE APORTE							
Proceso	SMAW	FCAW					
Denominación Comercial:	E6010	E71T-1					
Especificación	AWS A5.1	AWS A5.20					
Diámetro:	1/8" / 3,2mm	1,2mm					
Casa Comercial	Indura	Indura					
ARTÍCULO IV. GAS DE PROTECCIÓN			ARTÍCULO VI. NOTAS				
Proceso	SMAW	FCAW	Asegurar Limpieza de las Partes Verificar alineación de la Junta				
Tipo de Gas	-	CO2					
Pureza	-	100%					
Tasa de aporte	-	70 lt/min					
DETALLE DE LA JUNTA							
							
No. De Pase	Metal de Aporte		Corriente		Tensión de Trabajo (Voltios)	Vel. De avance (m/min)	Técnica de Soldadura
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y Polaridad	Intensidad (Amperios)			
1-2	E6010	3,2	DC+	60 -105	25-30		Recto
3-4	E71T-1	1,2	DC+	120-140	25-30	3,175	Oscilatorio

ANEXO VII: WPS PROCESO GTAW-SMAW

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)																				
Nombre Compañía: EPN PQR No.:			WPS No.: 1 Fecha: 08/04/2019 Realizado Por: Sara Rosero Organización:																	
ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA			ARTÍCULO II. TÉCNICA DE SOLDADURA																	
Tipo de Junta: A tope Abertura de Raíz: 4mm (+-0,4mm) Talón: Sin talón Ángulo de Ranura: 60° Placa de Respaldo: Si () No (X) Preparar bisel: Si (X) No () Método: Amolado			Proceso de Soldadura: GTAW – SMAW Tipo de Soldadura: Manual (X) Semiautomática () Automática () Soldadura a: Un lado (X) Dos Lados () Cordón de respaldo: Si () No (X) Limpieza: Pase Raíz: Moladora Pases Sigüientes: Cepillo Metálico y Grata																	
ARTÍCULO III. METAL BASE			ARTÍCULO VII. POSICIÓN DE SOLDADURA																	
Especificación: ASTM A106 GrB Denominación API: API 5L X42 Espesor: 0,31 " / 7,92 mm Diámetro: 6" / 152,4 mm			Posición de soldadura: 6G Progresión: Ascendente / Ascendente Técnica: Múltiples Pases																	
ARTÍCULO IV. ELECTRODO			ARTÍCULO V. METAL DE APORTE																	
Especificación: AWS A5.12 Tipo: EWTh2 (2% Thorio) Diámetro: 3/32" / 2,4 mm			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Proceso</th> <th style="width: 35%;">GTAW</th> <th style="width: 35%;">SMAW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Denominación Comercial:</td> <td>ER70S-6</td> <td>E7018</td> </tr> <tr> <td>Especificación</td> <td>AWS A5.18</td> <td>AWS A5.1</td> </tr> <tr> <td>Diámetro:</td> <td>3/32" / 2,4 mm</td> <td>1/8" / 3,2mm</td> </tr> <tr> <td>Casa Comercial</td> <td>Indura</td> <td>Indura</td> </tr> </tbody> </table>			Proceso	GTAW	SMAW	Denominación Comercial:	ER70S-6	E7018	Especificación	AWS A5.18	AWS A5.1	Diámetro:	3/32" / 2,4 mm	1/8" / 3,2mm	Casa Comercial	Indura	Indura
Proceso	GTAW	SMAW																		
Denominación Comercial:	ER70S-6	E7018																		
Especificación	AWS A5.18	AWS A5.1																		
Diámetro:	3/32" / 2,4 mm	1/8" / 3,2mm																		
Casa Comercial	Indura	Indura																		
ARTÍCULO VI. GAS DE PROTECCIÓN			ARTÍCULO VI. NOTAS																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Proceso</th> <th style="width: 35%;">GTAW</th> <th style="width: 35%;">SMAW</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tipo de Gas</td> <td>Ar</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Pureza</td> <td>100%</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Tasa de aporte</td> <td>70 lt/min</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>			Proceso	GTAW	SMAW	Tipo de Gas	Ar	-	Pureza	100%	-	Tasa de aporte	70 lt/min	-	Asegurar Limpieza de las Partes Verificar alineación de la Junta					
Proceso	GTAW	SMAW																		
Tipo de Gas	Ar	-																		
Pureza	100%	-																		
Tasa de aporte	70 lt/min	-																		
DETALLE DE LA JUNTA																				
No. De Pase	Metal de Aporte		Corriente		Tensión de Trabajo (Voltios)	Vel. De avance (m/min)	Técnica de Soldadura													
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y Polaridad	Intensidad (Amperios)																
1-2	ER70S-6	2,4	DC-	60 -105	9-20	0,04	Oscilatorio													
3-4	E7018	3,2	DC+	70-105	20-30		Oscilatorio													

ANEXO VIII: WPS PROCESO GTAW-FCAW

Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)							
Nombre Compañía: EPN PQR No.:			WPS No.: 1 Fecha: 08/04/2019 Realizado Por: Sara Rosero Organización:				
ARTÍCULO I. JUNTA UTILIZADA			ARTÍCULO II. TÉCNICA DE SOLDADURA				
Tipo de Junta: A tope Abertura de Raíz: 4mm (+0,4mm) Talón: Sin talón Ángulo de Ranura: 60° en V Placa de Respaldo: Si () No (X) Preparar bisel: Si (X) No () Método: Amolado			Proceso de Soldadura: GTAW – FCAW Tipo de Soldadura: Manual () Semiautomática (X) Automática () Soldadura a: Un lado (X) Dos Lados () Cordón de respaldo: Si () No (X) Limpieza: Pase Raíz: Moladora Pases Siguientes: Cepillo Metálico y Grata				
ARTÍCULO III. METAL BASE			ARTÍCULO VII. POSICIÓN DE SOLDADURA				
Especificación: ASTM A106 GrB Denominación API: API 5L X42 Espesor: 0,31 " / 7,92 mm Diámetro: 6" / 152,4 mm			Posición de soldadura: 6G Progresión: Ascendente / Ascendente Técnica: Múltiples Pases				
ARTÍCULO IV. ELECTRODO			ARTÍCULO VI. NOTAS				
Especificación: AWS A5.12 Tipo: E7T-1 (2% Thorio) Diámetro: 3/32" / 2.4 mm							
ARTÍCULO V. METAL DE APORTE							
Proceso		GTAW	FCAW	Asegurar Limpieza de las Partes Verificar alineación de la Junta			
Denominación Comercial:		ER70S-6	E71T-1				
Especificación		AWS A5.18	AWS A5.20				
Diámetro:		3/32" / 2,4 mm	1,2mm				
Casa Comercial		Indura	Indura				
ARTÍCULO VI. GAS DE PROTECCIÓN							
Proceso		GTAW	FCAW				
Tipo de Gas		Ar	CO2				
Pureza		100%	100%				
Tasa de aporte		70 lt/min	70 lt/min				
DETALLE DE LA JUNTA							
No. De Pase	Metal de Aporte		Corriente		Tensión de Trabajo (Voltios)	Vel. De avance (m/min)	Técnica de Soldadura
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y Polaridad	Intensidad (Amperios)			
1	ER70S-6	2,4	DC-	60-70	8-15	0,04	Recto
2-3	E71T-1	1,2	DC+	30-40	25-30	3,175	Oscilatorio



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 110 Low Alloy

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 3 mediciones en distintos puntos de los especímenes y finalmente se promedió sus valores.

Elemento	Muestra	
	M1	M2
	Valor [%]	Valor [%]
Carbono [C]	0,140	0,160
Silicio [Si]	0,237	0,297
Manganeso [Mn]	0,352	0,731
Fósforo [P]	0,019	0,028
Azufre [S]	0,014	---
Cromo [Cr]	---	0,144
Molibdeno [Mo]	---	0,016
Níquel [Ni]	0,028	0,155
Cobre [Cu]	0,0091	0,107
Aluminio [Al]	0,015	0,023
Cobalto [Co]	0,0035	0,014
Hierro [Fe]	99,18	98,31
Total	100,00	99,99


 Ing. Luis G. Huilca
Técnico Responsable


 Ing. Oscar Sotomayor Msc
Jefe del Laboratorio de Fundición.




Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración,

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 28.08.2019 09:13:57

Method: Fe110

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,140	0,237	0,352	0,019	0,014
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
∅	0,0077	<0,0050	0,028	0,0091	0,015
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]
∅	0,0035	<0,0050	<0,0020	<0,0030	<0,020
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]		
∅	0,0019	<0,0020	99,18		



A

ANEXO IX: INFORME DE ENSAYO DE TRACCIÓN DEL MATERIAL BASE



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M18.033

Quito, 11 de diciembre de 2018

Solicitado por: M.Sc. Galo Barragán
Persona de contacto: Andrés Estévez, Sara Rosero
Teléfono: 0995271688
Correo: sara.rosero@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 03/12/2018
Fecha de ejecución: 11/12/2018

ORDEN DE TRABAJO N°: N/A

1. **MUESTRAS:** Dos (2) probetas de material base para ensayo de tracción.

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: INFLUENCIA DEL PRECALENTAMIENTO Y DEL CONTROL DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA SOLDADURA DE UN OLEODUCTO CON TUBERÍA API 5L X70 EN CONDICIONES CLIMÁTICAS ADVERSAS COMO LA ZONA DE PAPALLACTA

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV
T1	M18.033.01
T2	M18.033.02

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $19,6 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $59,5 \pm 0,4\%$



Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec





4. ENSAYO DE TRACCION EN JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción

Tabla 2. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M18.033.01	12,50	6,93	9 843	43 785	63,4	437,1	73,4	505,4	29,7
M18.033.02	12,57	6,88	9 752	43 378	64,4	443,9	72,9	501,6	31,8

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



ANEXO X: INFORME TÉCNICO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Galo Homero Barragán Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 02 de septiembre del 2019

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de material metálico

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional dos probetas de material metálico.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de las probetas	Identificación Gráfica
MUESTRAS METÁLICAS	Sample M1	
	Sample M2	



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 110 Low Alloy

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 3 mediciones en distintos puntos de los especímenes y finalmente se promedió sus valores.

Elemento	Muestra	
	M1	M2
	Valor [%]	Valor [%]
Carbono [C]	0,140	0,160
Silicio [Si]	0,237	0,297
Manganeso [Mn]	0,352	0,731
Fósforo [P]	0,019	0,028
Azufre [S]	0,014	---
Cromo [Cr]	---	0,144
Molibdeno [Mo]	---	0,016
Niquel [Ni]	0,028	0,155
Cobre [Cu]	0,0091	0,107
Aluminio [Al]	0,015	0,023
Cobalto [Co]	0,0035	0,014
Hierro [Fe]	99,18	98,31
Total	100,00	99,99

Ing. Luis G. Huilca
Técnico Responsable

Ing. Oscar Sotomayor Msc.
Jefe del Laboratorio de Fundición.



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 28.08.2019 09:13:57



Method: Fe110




	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,140	0,237	0,352	0,019	0,014
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
∅	0,0077	<0,0050	0,028	0,0091	0,015
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]
∅	0,0035	<0,0050	<0,0020	<0,0030	<0,020
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]		
∅	0,0019	<0,0020	99,18		






A





ANEXO XI: INFORME TÉCNICO DE TINTAS PENETRANTES





REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES	
DATOS GENERALES	
Cientes: Andrés Estévez, Sara Rosero, estudiantes de titulación.	Reporte N°: LABEND-EPN-2019-R16-LP-07
Fecha: 06/05/2019	Lugar: Quito-Ecuador
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: 2019-R16-LP07-001: tubería de acero B de diámetro: 6 pulg, y espesor 0.31 pulg. 2019-R16-LP07-002: tubería de acero B de diámetro: 6 pulg, y espesor 0.31 pulg. 2019-R16-LP07-003: tubería de acero B de diámetro: 6 pulg, y espesor 0.31 pulg. 2019-R16-LP07-004: tubería de acero B de diámetro: 6 pulg, y espesor 0.31 pulg. 2019-R16-LP07-005: tubería de acero B de diámetro: 6 pulg, y espesor 0.31 pulg.	Identificación: 2019- R16-LP07-001 2019- R16-LP07-002 2019- R16-LP07-003 2019- R16-LP07-004 2019- R16-LP07-005
Material: Acero ASTM 106	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material
ESQUEMA DE LA PIEZA	
2019- R16-LP07-001	2019- R16-LP07-002
	




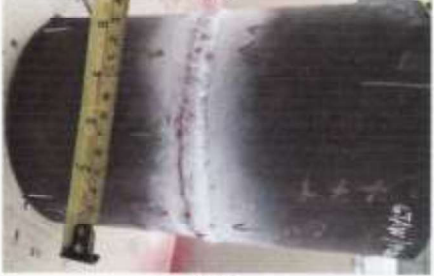
2019- R16-LP07-003	2019- R16-LP07-004
	
2019- R16-LP07-005	
	





R

MATERIALES Y EQUIPOS		
Líquidos:		
Limpiador / removedor: Met-L-check E-59A		Emulsificador: N/A
Penetrante Met-L-check VP-30	Revelador Met-L-check D-70	
CONDICIONES DE TRABAJO		
Procedimiento: Basado en ASTM E 165, Tipo II método A		Limpieza: Con solvente
Tiempos:		
Penetrante: 12 minutos	Emulsificador: N/A	Revelador: 5 minutos
Luz de observación: Visible (sobre los 1700 lux)		
RESULTADOS		
IDENTIFICACIÓN	IMAGEN	OBSERVACIONES
2019- R16-LP07-001	 <p>P1-A</p>	- Se observa manchas redondeadas de 5 mm, 4 mm, 4 mm , 2 mm, 3mm.
	 <p>P1-B</p>	- Se observa manchas alargadas de 4 mm y 6 mm.
	 <p>P1-C</p>	- No se observa discontinuidades.

	 <p>P1-D</p>	<p>- No se observa discontinuidades.</p>
<p>2019- R16-LP07-002</p>	 <p>P2-A</p>	<p>- Se observa manchas redondeadas de 11mm, 6 mm y 3 mm.</p>
	 <p>P2-B</p>	<p>- Se observa mancha redondeadas de 6mm.</p>
	 <p>P2-C</p>	<p>- Se observa manchas redondeadas de 5 mm, 3 mm, 4 mm, 4 mm, 2 mm y 2 mm.</p>


	 <p style="text-align: center;">P2-D</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 5 mm, 4 mm, 3 mm, 2mm, 3 mm y 4 mm. - Se observa manchas alargadas de 30 mm, 15 mm.
<p>2019- R16-LP07-003</p>	 <p style="text-align: center;">P3-A</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa mancha redondeada de 4 mm.
	 <p style="text-align: center;">P3-B</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas por salpicadura en el material base. - Se observa mancha redondeada de 3 mm en el cordón de soldadura.
	 <p style="text-align: center;">P3-C</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 3 mm y de 2,8 mm.

	 <p style="text-align: center;">P3-D</p>	<p>- No se observan indicaciones.</p>
<p>2019- R16-LP07-004</p>	 <p style="text-align: center;">P4-A</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 5 mm, 4 mm, 4 mm. - Se observan manchas alargadas de 30 mm.
	 <p style="text-align: center;">P4-B</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 5 mm, 3 mm. - Se observan manchas alargadas de 20 mm.
	 <p style="text-align: center;">P4-C</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 5 mm, 5 mm, 4,5 mm. - Se observan manchas alargadas de 17 mm y 25 mm.


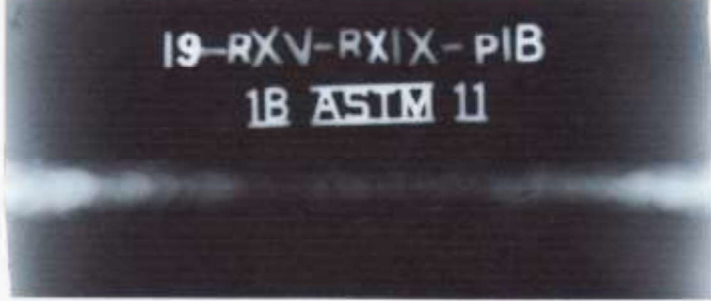

	 <p>P4-D</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 4 mm, 4 mm, 3,5 mm y 6 mm.
<p>2019- R16-LP07-005</p>	 <p>P5-A</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa mancha redondeada de 4 mm. - Se observa manchas alargadas de 20 mm, 9 mm, 5 mm y 7 mm.
	 <p>P5-B</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 3 mm. - Se observa manchas alargadas de 8 mm y 5 mm.
	 <p>P5-C</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa mancha redondeada de 10 mm.


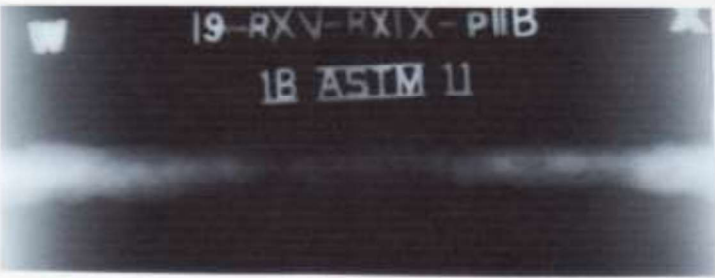
		<ul style="list-style-type: none"> - Se observa manchas redondeadas de 2 mm y 3 mm. - Se observa mancha alargada de 7 mm.
P5-D		
OPERADOR: Ing. Santiago Camacho		
Nivel: LÍQUIDOS PENETRANTES –ASNT NIVEL II		
<p style="text-align: center;">Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END</p> <p>Firma:  Ing. Santiago Camacho ASISTENTE DE ENSAYOS LAB-END</p> <p>Fecha: 11/07/2019</p> <p>Firma:  Ing. Verónica Sotomayor JEFE LAB-END</p> <p>Fecha: 11/07/2019</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p style="text-align: right;">Cliente</p> <p>Firma: </p> <p>Nombre: Sara Rosero Cargo: Estudiante titulación FIM Contacto: Correo: sara.rosero@epn.edu.ec</p> <p>Firma: </p> <p>Nombre: Andrés Estévez Cargo: Estudiante titulación FIM Contacto: Correo: andres.estevez@epn.edu.ec</p> <p>Fecha: 11/07/2019</p>	

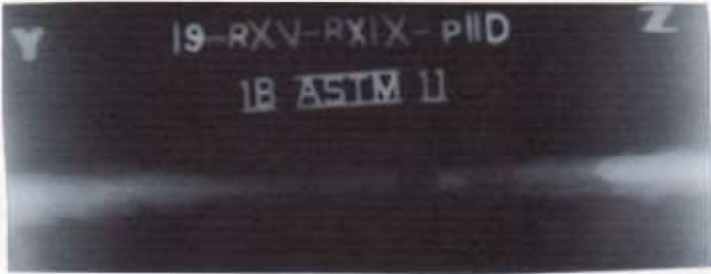

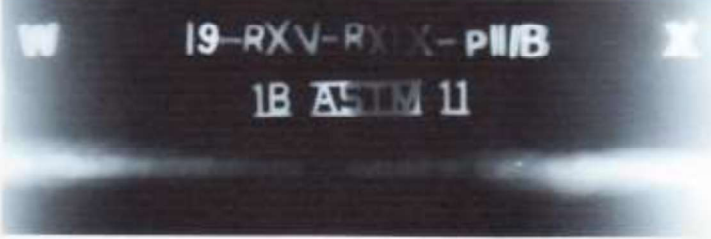
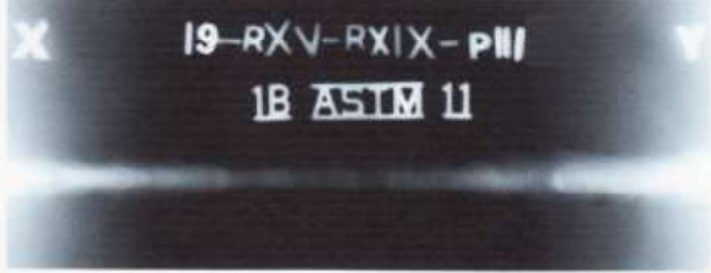
ANEXO XII: INFORME TÉCNICO DE RADIOGRAFÍA





			
Equipos y Materiales			
Equipo de RX			
Marca: Baltographe	Modelo: BF 200/10	kV: 200 kV	mA: 10 mA
Película			
Marca: Structurix	Tipo: II – D7		
Condiciones de Trabajo			
Normas de Referencia:			
Pieza: 2019-R15-RX09-001			
Tomas: 4	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 49 s	Distancia a la Fuente: 55 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 1B			
Pieza: 2019-R15-RX09-002			
Tomas: 4	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 49 s	Distancia a la Fuente: 55 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 1B			
Pieza: 2019-R15-RX09-003			
Tomas: 4	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 49 s	Distancia a la Fuente: 55 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 1B			
Pieza: 2019-R15-RX09-004			
Tomas: 4	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 49 s	Distancia a la Fuente: 55 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 1B			
Pieza: 2019-R15-RX09-005			
Tomas: 4	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 49 s	Distancia a la Fuente: 55 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 1B			
Procesamiento de Película			
Temp. Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parada: 1 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 1 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min



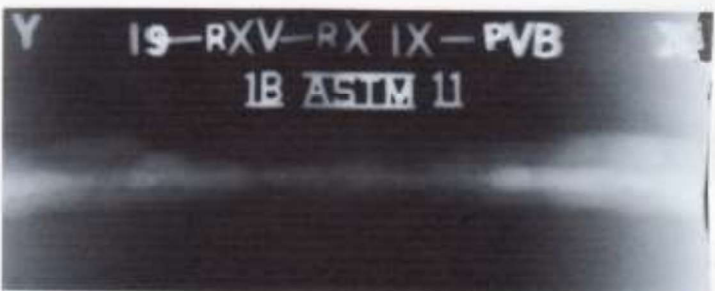
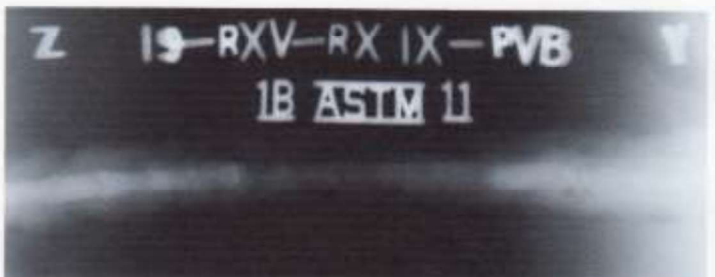
Imágenes Radiográficas

<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-001-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-001-B</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-001-C</p>	

<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-001-D</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-002-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-002-B</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-002-C</p>	

<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-002-D</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-003-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-003-B</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-003-C</p>	

<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-003-D</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-004-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-004-B</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-004-C</p>	

<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-004-D</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-005-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-005-B</p>	
<p>TOMA 1 2019-R15-RX09-005-C</p>	



Interpretación Radiográfica								
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019- R15- RX9- 001 A		TOMA 1 2019- R15- RX9- 001 B		TOMA 1 2019- R15- RX9- 001 C		TOMA 1 2019- R15- RX9- 001 D	
	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de Escoria	23,1	2	31	1				
	23	2	98	4				
	50	0,5	100	3				
	58	0,5	101	1,5	---	---	---	---
	65	1	106	4				
	68	0,5	127	6				
	113	1						
	115	2						
Porosidad	---	---	---	---	---	---	100	1
Poros tipo gusano	79	1						
	84	2						
	86	1	---	---	---	---	---	---
	86	2						
	88	1						
	90,5	1						
Nido de poros	95	4						
	111	4						
	108	2						
	111	2						
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	
Mordeduras	---	---	---	---	---	---	70	2
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	---	---
Quemón	---	---	---	---	---	---	---	---


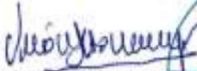



Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019- R15- RX9- 002 A		TOMA 1 2019- R15- RX9-002 B		TOMA 1 2019- R15- RX9- 002 C		TOMA 1 2019- R15- RX9- 002 D	
	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de Escoria			98	5			24	1
			123	4	55	5	51	4
	46	2,5	137	7	58	1	60	10
	56	4	128	3	95	7	91	9
			136	4	117	1	102	3
		148	6			119	2	
Salpicadura	---	---	---	---	---	---	---	---
Porosidad	---	---	---	---	---	---	---	---
Nido de poros	---	---	---	---	---	---	---	---
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	---
Mordeduras	---	---	---	---	135	4	---	---
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	---	---
Quemón	---	---	---	---	---	---	---	---

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019- R15- RX9- 003 A		TOMA 1 2019- R15- RX9- 003 B		TOMA 1 2019- R15- RX9- 003 C		TOMA 1 2019- R15- RX9- 003 D	
	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de Escoria							61	2
							79	0,2
							84	1
							91	2
	73	1	70	0,5			108	0,8
	102	2	80	0,3	55	15	110	3
	47	0,5	84	1			113	0,5
	54	0,5					115	1
							116	4
							131	4
						60	20	
Salpicadura	---	---	---	---	---	---	---	---
Porosidad	---	---	---	---	---	---	---	---
Nido de poros	134	5	---	---	---	---	---	---
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	---
Mordeduras	136	1,5	---	---	---	---	---	---
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	---	---
Quemón	---	---	---	---	---	---	---	---

Inclusiones de tungsteno	---	---	57 88 121 130(MB)	0,3 0,8 1,5 1	---	---		
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.								
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019- R15- RX9-004 A		TOMA 1 2019- R15- RX9- 004 B		TOMA 1 2019- R15- RX9-004 C		TOMA 1 2019- R15- RX9-004 D	
	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de Escoria	37 92 144 144 146 149 151	8 2 5 2 3 2 3	37 112 116 129 139	12 4 1 4 2	12 46 124 99 124 126 132 135 137 140 144	0,5 2 2 1 2 4 1 2 1 1 0,5	51 59 97 77 53	2 1,5 1 1 4
Salpicadura	---	---	---	---	---	---	---	---
Porosidad	---	---	---	---	90	0,5	---	---
Nido de poros	---	---	---	---	---	---	---	---
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	---
Mordeduras	---	---	---	---	---	---	---	---
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	---	---
Quemón	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de tungsteno	---	---	---	---	---	---	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.								
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019- R15- RX9-005 A		TOMA 1 2019- R15- RX9- 005 B		TOMA 1 2019- R15- RX9-005 C		TOMA 1 2019- R15- RX9-005 D	
	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	55	5	---	---

Inclusiones de Escoria	55	0.8	5	2	---	---	---	---
	57	0.5	16	4				
	62	1	23	4				
	63	0.5	30	3.5				
	66	1	42	3				
			58	3				
		103	4					
		112	4					
Salpicadura	---	---	---	---	---	---	---	---
Porosidad	---	---	---	---	---	---	---	---
Nido de poros	---	---	---	---	---	---	---	---
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	---
Mordeduras	35 68 42 58 74	26 27 0.5 4 11	---	---	---	---	11	5
							35	8
							62	12
							78	3
							89	3
							96	4
							107	5
							115	4
							37	7
							50	3
							55	2
60	3							
67	5							
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	---	---
Quemón	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de tungsteno	---	---	---	---	---	---	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.								
Laboratorio de E.N.D Firma:  Elaborado por: Ing. Santiago Camacho, ASNT Nivel II en Radiografía Limitada a la interpretación Asistente de Ensayos LAB-END Firma:  Revisado por: Ing. Verónica Sotomayor, Jefa de Laboratorio de Ensayos No Destructivos  Fecha: 11/07/2019					Cliente Firma:  Nombre: Sara Rosero Cargo: Estudiante titulación FIM Correo: sara.rosero@epn.edu.ec Firma:  Nombre: Andrés Estévez Cargo: Estudiante titulación FIM Correo: andres.estavez@epn.edu.ec Fecha: 11/07/2019			

ANEXO XIII Y XIV: INFORME DE ENSAYO DE TRACCIÓN Y NICK BREAK DE LAS PROBETAS SOLDADAS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M19.091

Quito, 17 de julio de 2019

Solicitado por: M.Sc. Galo Barragán
Persona de contacto: Andrés Estévez, Sara Rosero
Teléfono: 0995697734
Correo: andres.estvez@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 11/07/2019
Fecha de ejecución: 12/07/2019

ORDEN DE TRABAJO: N/A

1. **MUESTRAS:** Ocho (8) probetas de juntas soldadas para ensayo de nick break y ocho (8) probetas de juntas soldadas para ensayo de tracción para calificación de procedimiento de soldadura bajo la norma API 1104.

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE OLEODUCTOS EN EL ECUADOR.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV	Ensayo
P1W1	M19.091.01	Nick break
P1W2	M19.091.02	
P2W1	M19.091.03	
P2W2	M19.091.04	
P3W1	M19.091.05	
P3W2	M19.091.06	



Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec



Tabla 1. Identificación de las muestras (continuación).

Id. cliente	Id. del LAEV	Ensayo
P4W1	M19.091.07	Nick break
P4W2	M19.091.08	
P1V1	M19.091.09	Tracción
P1V2	M19.091.10	
P2V1	M19.091.11	
P2V2	M19.091.12	
P3V1	M19.091.13	
P3V2	M19.091.14	
P4V1	M19.091.15	
P4V2	M19.091.16	

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $23,1 \pm 1,6^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $40,2 \pm 4,9\%$

4. ENSAYO DE NICK BREAK PARA CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO BAJO LA NORMA API 1104

En la tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos de nick break realizados en las muestras.

Tabla 2. Resultados del ensayo de nick break realizados en las muestras.

Ensayo de nick break		
Identificación	Observaciones	Calificación
M19.091.01	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
M19.091.02	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
M19.091.03	Falla fuera del cordón de soldadura	-
M19.091.04	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
M19.091.05	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
M19.091.06	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
M19.091.07	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
M19.091.08	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba



Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
 Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
 Correo: laev@epn.edu.ec

5. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO BAJO LA NORMA API 1104



En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas. La resistencia a la tracción mínima especificada para el material API 5L X42 es de: 60 ksi (414 MPa).

Tabla 1. Resistencia a la tracción medida en las probetas

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.	Calificación
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa		
M19.091.09	23,97	7,23	18 386	81 786	68,4	471,9	FMB	Aprueba
M19.091.10	25,13	6,89	18 486	82 228	68,9	474,9	FMB	Aprueba
M19.091.11	24,79	7,05	18 436	82 007	68,1	469,2	FMB	Aprueba
M19.091.12	24,89	7,04	18 486	82 228	68,1	469,3	FMB	Aprueba
M19.091.13	25,20	7,31	19 082	84 879	66,8	460,8	FMB	Aprueba
M19.091.14	25,09	7,06	18 933	84 216	69,0	475,4	FMB	Aprueba
M19.091.15	25,00	7,33	19 082	84 879	67,2	463,2	FMB	Aprueba
M19.091.16	25,02	7,42	19 628	87 310	68,2	470,3	FMB	Aprueba

* FMB = Falla el material base

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro. M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



LAEV - M19.091

Página 3 de 3

Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec

ANEXO XV: COSTOS DE SOLDADURA

Individual o combinado	Procedimiento	Número de pase	Electrodo	Número de Electrodo	Número de electrodos por procedimiento	Número de Electrodo total usados en el procedimiento	Tiempos parciales de arco [seg]	Tiempo de pase [seg]	Tiempo de pase [hr]	Tiempo de arco por pase [hr]	Tiempo de arco total [hr]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Gas	Flujo de gas	Tiempo de consumo de gas	Cantidad de gas consumida	Cantidad de gas total consumida	Actividades adicionales																																		
																			Actividad	Tiempo [seg]	Tiempo [hr]	Tiempo total de actividades adicionales durante el procedimiento [hr]																															
A	SMAW	Pase raíz	E6010	9	9	26	65	574	0,16	0,16	0,44	22	71	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	0,52	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Actividad</th> <th>Tiempo [seg]</th> <th>Tiempo [hr]</th> <th>Tiempo total de actividades adicionales durante el procedimiento [hr]</th> </tr> <tr> <td>Posicionamiento</td> <td>85</td> <td>0,02</td> <td rowspan="12">0,52</td> </tr> <tr> <td>Preparación de la junta</td> <td>216</td> <td>0,06</td> </tr> <tr> <td>Limpieza</td> <td>128</td> <td>0,04</td> </tr> <tr> <td>Limpieza con moladora</td> <td>736</td> <td>0,20</td> </tr> <tr> <td>Limpieza con grata</td> <td>296</td> <td>0,08</td> </tr> <tr> <td>Limpieza con martillo</td> <td>10</td> <td>0,002778</td> </tr> <tr> <td>Disco de desbaste para siguiente pase</td> <td>332</td> <td>0,09</td> </tr> <tr> <td>Limpieza con cepillo</td> <td>4</td> <td>0,001111</td> </tr> <tr> <td>Pruebas con soldadora</td> <td>72</td> <td>0,02</td> </tr> </table>	Actividad	Tiempo [seg]	Tiempo [hr]	Tiempo total de actividades adicionales durante el procedimiento [hr]	Posicionamiento	85	0,02	0,52	Preparación de la junta	216	0,06	Limpieza	128	0,04	Limpieza con moladora	736	0,20	Limpieza con grata	296	0,08	Limpieza con martillo	10	0,002778	Disco de desbaste para siguiente pase	332	0,09	Limpieza con cepillo	4	0,001111	Pruebas con soldadora	72	0,02
							Actividad					Tiempo [seg]	Tiempo [hr]									Tiempo total de actividades adicionales durante el procedimiento [hr]																															
							Posicionamiento					85	0,02									0,52																															
							Preparación de la junta					216	0,06																																								
							Limpieza					128	0,04																																								
							Limpieza con moladora					736	0,20																																								
							Limpieza con grata					296	0,08																																								
							Limpieza con martillo					10	0,002778																																								
							Disco de desbaste para siguiente pase					332	0,09																																								
		Limpieza con cepillo	4	0,001111																																																	
		Pruebas con soldadora	72	0,02																																																	
		58	22	60																																																	
		90	22	60																																																	
		75	22	61																																																	
		15	23	66																																																	
		55	23	65																																																	
		67	22	64																																																	
		83	23	66																																																	
		66	23	66																																																	
		86	29,5	85																																																	
		36	29,5	85																																																	
		27	30	85																																																	
		74	22,5	105																																																	
		79	22,5	105																																																	
		77	21,15	103,5																																																	
		58	21,15	103,5																																																	
		33	20,25	75																																																	
		66	20,25	75																																																	
		62	20,25	75																																																	
		68	20,25	75																																																	
		71	20,25	75																																																	
		74	20,25	75																																																	
		73	20,25	75																																																	
		69	20,25	75																																																	
		48	20,25	75																																																	

Individual o combinado	Procedimiento	Número de pases	Electrodo	Número de Electrodos/Varillas	Número de electrodos/varillas por procedimiento	Número de Electrodos/Varillas total usados en el procedimiento	Tiempos parciales de arco [seg]	Tiempo de pase [seg]	Tiempo de pase [hr]	Tiempo de arco por pase [hr]	Tiempo de arco total [hr]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Gas	Flujo de gas [lt/min]	Tiempo de consumo de gas [seg]	Cantidad de gas consumida [lt]	Cantidad de gas total consumida [lt]	Actividades adicionales													
																			Actividad	Tiempo [seg]	Tiempo [hr]	Tiempo total de actividades adicionales durante el procedimiento [hr]										
C	PROCEDIMIENTO 1: TIG	Prueba con soldadora	ER70S-6	1	5	18	84	291	0,08	0,08	0,82	9,8	61	Argón 100%	60	85	85	2157	Actividad	Tiempo [seg]	Tiempo [hr]	0,55										
							57					10,7	61		60	58	58		Posicionamiento	65	0,02											
							81					9,75	61		60	82	82		Preparación de la junta	50	0,01											
							69					9,95	61		60	70	70		Limpieza	920	0,26											
							240					9,45	64		60	241	241		Limpieza con moladora	141	0,04											
		180	10,4	66			60	181	181	Limpieza con grata		213	0,06																			
		129	9,85	66			60	130	130	Limpieza con martillo		14	0,00																			
		284	10,2	66			60	285	285	Disco de desbaste para siguiente pase		251	0,07																			
		99	9,8	66			60	100	100	Limpieza con cepillo		29	0,01																			
		330	9,4	69			60	331	331	Pruebas con soldadora		295	0,08																			
		280	10,3	100			60	281	281																							
		109	10,3	108			60	110	110																							
		202	11,2	108			60	203	203																							
		66	21,6	104			No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		No aplica																				
		63	20,6	103																												
	77	21,7	103																													
	79	20,4	109																													
	81	20	108																													
	15	22	103																													
	72	20,8	70																													
	59	21,35	72																													
	72	21,45	72																													
	50	20,65	72																													
	29	20,45	72																													
	64	21,2	72																													
	68	20,8	72																													
																			Hora de inicio 1	Hora de salida 1	Intervalo 1	Horas de trabajo total										
																			14:45	16:40	1:55											
																			Hora de inicio 2	Hora de salida 2	Intervalo 2	1:55										
																			0	0	0											
																					Horas de trabajo total [hr]											
																					1,92											

ANEXO XVI: COTIZACIÓN DE ELECTRODOS Y GASES DE PROTECCIÓN



OFERTA

Indura Ecuador S.A.
Km. 14 1/2 Via a Daule
09-013489 Guayaquil
Ecuador
R.U.C.: 0990340900001
Phone: 593 986356547

Páginas: 1 de 2

CONSUMIDOR FINAL
MATRIZ GUAYAQUIL
KM 14.5 VIA A DAULE
0000 GUAYAQUIL-GUAYAS
Facturar a: 1681422

Enviar a: 1681422
CONSUMIDOR FINAL
MATRIZ GUAYAQUIL
KM 14.5 VIA A DAULE
0000 GUAYAQUIL-GUAYAS

N° de pedido:	21063669	
Fecha:	30.05.2019	
Fecha del pedido:		
N° de venta:	1681422	
R.U.C.:	99999999999999	
Cond. de la entrega:	FCA FREE CARRIER	
Condiciones de pago:	Contado por el total	
Divisa:	USD	
Persona de contacto:		
Cantidad - Unidades de medidas:		
TO = 1000 KG	KM = 1000 M3	KG = Kilogramo
H = Horas	L = Libros	M3 = Metro cúbico
CAU = Unidad	MM3 = Metros cúbicos normales	
LB = Pounds	FTS = 1scd (70F, 1atm) & FTU = 1000FTS	
	FTR = 1scd (60F, 1atm) & FTT = 1000FTR	

Detalles de la entrega					
Pos	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Unidad de medición	Importe
	N° pedido del cliente/Fecha: 0/ Posición: 0				
	N° pedido cliente: 0				
	Fecha de entrega solicitada: 30.05.2019				
10	103463 FR DIOXIDO DE CARBONO Industrial - K405 20.0K 1 X 20,000 KG HS-NO.: 2811210000 IVA	1 C/U	43,93	1 C/U	43,93
			12,000 %		5,27
	Fecha prevista de entrega	Cantidad			
	30.05.2019	1,000 C/U			
	N° pedido del cliente/Fecha: 0/ Posición: 0				
	N° pedido cliente: 0				
	Fecha de entrega solicitada: 30.05.2019				
20	103438 FR ARGON Industrial - X505 166.0B 1 X 14,633 KG HS-NO.: 2804210000 IVA	1 C/U	233,36	1 C/U	233,36
			12,000 %		30,65
	Fecha prevista de entrega	Cantidad			
	30.05.2019	1,000 C/U			
	N° pedido del cliente/Fecha: 0/ Posición: 0				
	N° pedido cliente: 0				
	Fecha de entrega solicitada: 30.05.2019				
30	2001300 EQ WCons ELECT 7018-AR 3/32 2.4MM_25K 1 X 25,000 KG IVA	1 C/U	106,50	1 C/U	106,50
			12,000 %		12,78

Los precios en la oferta son válidos hasta el próximo día laborable y de acuerdo a la oferta estándar del proveedor, a no ser especificado lo contrario.
Sujeto a las Condiciones Generales de Venta. Hasta el límite legalmente permitido, el Vendedor no responderá de ningún tipo de reclamación de daños i/o perjuicios que exceda del precio del producto suministrado o del servicio prestado que haya causado la reclamación. El Comprador puede anular su pedido si las condiciones antes indicadas son inaceptables para él, mediante la comunicación escrita de tal circunstancia al Vendedor inmediatamente después de disponer de este documento.



OFERTA

Indura Ecuador S.A.
 Rm. 13, 1/2 Vía a Daule
 09-015899 Guayaquil
 Ecuador
 R.U.C. 1 0990340900001
 Phone: 593 986356547

Divisa: USD N° de pedido: 21063669 Fecha: 30.05.2019 Páginas: 2 de 2

Detalles de la entrega					
Pos	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Unidad de facturación	Importe
	Fecha prevista de entrega	30.05.2019			
		<u>Cantidad</u>			
		1,000 C/U			
	N° pedido del cliente/Fecha: 0/ Posición: 0				
	N° pedido cliente: 0				
	Fecha de entrega solicitada: 30.05.2019				
40	2000364 EQ_WCons_ELECT VAR VIG 70S-6 1/16_10K	1 C/U	53,08	1 C/U	53,08
	1 X 10,000 KG				
	IVA		12,000 %		6,37
	Fecha prevista de entrega	30.05.2019			
		<u>Cantidad</u>			
		1,000 C/U			
	N° pedido del cliente/Fecha: 0/ Posición: 0				
	N° pedido cliente: 0				
	Fecha de entrega solicitada: 30.05.2019				
50	1034160 EQ_WCons_ALAMB TUB E7171C. 0.045" S-15KG	15 KG	4,24	1 KG	63,60
	150 X 0,100 KG				
	IVA		12,000 %		7,63
	Fecha prevista de entrega	30.05.2019			
		<u>Cantidad</u>			
		15,000 KG			
	Base Imponible				522,47
	Impuestos				62,70
					USD 585,17

Esto no es una factura. A menos que se convenga otra cosa por escrito, se aplicarán las condiciones de Venta estándar del Vendedor. (www.airproducts.com/conditionsforsale.asp). El precio está sujeto a posibles cambios y finalmente se determinará a la hora de facturar.

Los precios en la oferta son válidos hasta el próximo día laborable y de acuerdo a la oferta estándar del proveedor, a no ser especificado lo contrario. Sujeto a las Condiciones Generales de Venta. Hasta el límite legalmente permitido, el Vendedor no responderá de ningún tipo de reclamación de daños i/o perjuicios que exceda del precio del producto suministrado o del servicio prestado que haya causado la reclamación. El Comprador puede anular su pedido si las condiciones antes indicadas son inaceptables para él, mediante la comunicación escrita de tal circunstancia al Vendedor inmediatamente después de disponer de este documento.



Panamericana Norte KM 6 1/2 PARKENOR A-15
 Telf: (02) 2802-128 / 2473-892
 mail: ventas@inabras.com
 QUITO -ECUADOR

Señor: ROSERO SARA

Atencion : Sra Sara

Referencia

PROFORMA 191928

Fecha 09/07/2019

Forma de pago CONTADO

Válida por : 15 dias

Item	Num. Parte	Descripción	Entrega	Cant.	U/M	P. Uni.	Total
1	60105P+1/8	E 6010 FW 5P+ 1/8 LINCOLN EEUU (50 LBS)	1 semana	1	Cj	211.50	211.50T
2	7018JW1.8.44	E 7018 JW 1/8 LINCOLN EEUU (44 LBS)	Inmediata	1	Cj44	176.22	176.22T
3	ED034338	VARILLA ER70S-6 3/32 (10 lbs x 3) LINCOLN EEUU	Inmediata	10	Lb1	4.302	43.02T

Subtotal	\$430.74
IVA (12.0%)	\$51.69
Total	\$482.43

 Mirella Dussan



ANEXO XVII: PQRs

		Registro de Calificación de Procedimiento (PQR)					
Resultos de prueba							
Realizado por	Andrés Estévez	PQR No.	1	Fecha	04/08/2019		
Material Base		Procedimiento 1	SMAW	Material de aporte 1	E6010		
		Procedimiento 2	SMAW	Material de aporte 2	E7018		
Inspección Visual							
Característica	Acceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores	
Pase de raíz	X		Porosidad	No	Inclusión de escoria	No	
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No	
			Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí	
Observaciones	Posible existencia de discontinuidades. Se debe verificar con otros Ensayos No Destructivos.						
Radiografía							
Característica	Acceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores	
Pase de raíz	X		Porosidad	Uno	Inclusión de escoria	Sí	
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No	
			Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí	
Observaciones	Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe Radiográfico del ANEXO XII						
Tintas Penetrantes							
Característica	Indicador	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores		
Pase de raíz	Acceptable	Porosidad	Sí	Inclusión de escoria	No		
Sobremonta	Acceptable	Grietas	No	Fusión Incompleta	No		
		Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí		
Observaciones	Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe de Tintas Penetrantes del ANEXO XI						
Ensayo de Tracción							
Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima registrada, (lbf/MPa)	Resistencia a la tracción, (Ksi/Mpa)	Carácter de falla y localización	
P1V1/M19.091.09	23,97	7,23	173,3031	18 386 / 81 786	68,4 / 471,9	Dúctil / Material base	
P1V2/M19.091.10	25,13	6,89	173,1457	18 486 / 82 228	68,9 / 474,9	Dúctil / Material base	
Ensayo de doblez guiado							
Muestra N.	Tipo de doblado		Resultado	Observaciones			
P1X1	Doblado de raíz		Aprueba	No existen indicadores			
P1Y1	Doblado de cara		Aprueba	No existen indicadores			
P1X2	Doblado de raíz		Aprueba	No existen indicadores			
P1Y2	Doblado de cara		Aprueba	No existen indicadores			
Nick Break (Sanidad)							
Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Profundidad de entalla (mm)	Apariencia de la junta luego de la fractura	Defectos presentes en las superficies de fractura		
P1W1/M19.091.01	26,94	7,18	1,85	Fractura dúctil	Ninguno		
P1W2/M19.091.02	26,57	6,77	1,9	Fractura dúctil	Ninguno		



Registro de Calificación de Procedimiento (PQR)



Resultos de prueba						
Realizado por	Andrés Estévez	PQR No.	2	Fecha	04/08/2019	
Material Base		Procedimiento 1	SMAW	Material de aporte 1	E6010	
		Procedimiento 2	FCAW	Material de aporte 2	E71T-1	
Inspección Visual						
Característica	Aceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores
Pase de raíz	X		Porosidad	No	Inclusión de escoria	No
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No
			Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí
Observaciones	Posible existencia de discontinuidades. Se debe verificar con otros Ensayos No Destructivos.					
Radiografía						
Característica	Aceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores
Pase de raíz	X		Porosidad	No	Inclusión de escoria	Sí
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No
			Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí
Observaciones	Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe Radiográfico del ANEXO XII					
Tintas Penetrantes						
Característica	Indicador	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores	
Pase de raíz	Aceptable	Porosidad	Sí	Inclusión de escoria	No	
Sobremonta	Aceptable	Grietas	No	Fusión Incompleta	No	
		Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí	
Observaciones	Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe de Tintas Penetrantes del ANEXO XI					
Ensayo de Tracción						
Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima registrada, (lbf/MPa)	Resistencia a la tracción, (Ksi/MPa)	Carácter de falla y localización
P2V1/M19.091.11	24,79	7,05	174,7695	18 436 / 82 007	68,1 / 469,2	Dúctil / Material base
P2V2/M19.091.12	24,89	7,04	175,2256	18 486 / 82 228	68,1 / 469,2	Dúctil / Material base
Ensayo de doblado guiado						
Muestra N.	Tipo de doblado		Resultado	Observaciones		
P2X1	Doblado de raíz		Aprueba	No existen indicadores		
P2Y1	Doblado de cara		Aprueba	No existen indicadores		
P2X2	Doblado de raíz		Aprueba	No existen indicadores		
P2Y2	Doblado de cara		Aprueba	No existen indicadores		
Nick Break (Sanidad)						
Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Profundidad de entalla (mm)	Apariencia de la junta luego de la fractura	Defectos presentes en las superficies de fractura	
P2W1/M19.091.03	23,33	6,49	1,9	Fractura dúctil	Ninguno	
P2W2/M19.091.04	22,28	6,94	2,71	Fractura dúctil	Ninguno	



Registro de Calificación de Procedimiento (PQR)



Resultos de prueba

Realizado por	Andrés Estévez	PQR No.	3	Fecha	04/08/2019
Material Base		Procedimiento 1	GTAW	Material de aporte 1	ER70S-6
		Procedimiento 2	SMAW	Material de aporte 2	E7018

Inspección Visual

Característica	Aceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores
Pase de raíz	X		Porosidad	No	Inclusión de escoria	No
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No
			Exceso de penetración	No	Mordedura	Si

Observaciones Posible existencia de discontinuidades. Se debe verificar con otros Ensayos No Destructivos.

Radiografía

Característica	Aceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores
Pase de raíz	X		Porosidad	Si	Inclusión de escoria	Si
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No
			Exceso de penetración	No	Mordedura	Si

Observaciones Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe Radiográfico del ANEXO XII

Tintas Penetrantes

Característica	Indicador	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores
Pase de raíz	Aceptable	Porosidad	Si	Inclusión de escoria	No
Sobremonta	Aceptable	Grietas	No	Fusión Incompleta	No
		Exceso de penetración	No	Mordedura	No

Observaciones Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe de Tintas Penetrantes del ANEXO XI

Ensayo de Tracción

Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima registrada, (lbf/MPa)	Resistencia a la tracción, (Ksi/Mpa)	Carácter de falla y localización
P3V1/M19.091.13	25,2	7,31	184,212	19 082 / 84 879	66,8 / 460,8	Dúctil / Material base
P3V2/M19.091.14	25,09	7,06	177,1354	18 486 / 82 228	68,1 / 469,2	Dúctil / Material base

Ensayo de doblez guiado

Muestra N.	Tipo de doblado	Resultado	Observaciones
P3X1	Doblado de raíz	Aprueba	No existen indicadores
P3Y1	Doblado de cara	Aprueba	No existen indicadores
P3X2	Doblado de raíz	Aprueba	No existen indicadores
P3Y2	Doblado de cara	Aprueba	No existen indicadores

Nick Break (Sanidad)

Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Profundidad de entalla (mm)	Apariencia de la junta luego de la fractura	Defectos presentes en las superficies de fractura
P3W1/M19.091.05	23,78	7,08	1,97	Fractura dúctil	Ninguno
P3W2/M19.091.06	25,4	7,33	3,37	Fractura dúctil	Ninguno



Registro de Calificación de Procedimiento (PQR)



Resultos de prueba						
Realizado por	Andrés Estévez	PQR No.	4	Fecha	04/08/2019	
Material Base		Procedimiento 1	GTAW	Material de aporte 1	ER70S-6	
		Procedimiento 2	FCAW	Material de aporte 2	E71T-1	
Inspección Visual						
Característica	Aceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores
Pase de raíz	X		Porosidad	No	Inclusión de escoria	No
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No
			Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí
Observaciones	Posible existencia de discontinuidades. Se debe verificar con otros Ensayos No Destructivos.					
Radiografía						
Característica	Aceptable	No aceptable	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores
Pase de raíz	X		Porosidad	No	Inclusión de escoria	Sí
Sobremonta	X		Grietas	No	Fusión Incompleta	No
			Exceso de penetración	Sí	Mordedura	Sí
Observaciones	Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe Radiográfico del ANEXO XII					
Tintas Penetrantes						
Característica	Indicador	Defecto	N. Indicadores	Defecto	N. Indicadores	
Pase de raíz	Aceptable	Porosidad	Uno	Inclusión de escoria	No	
Sobremonta	Aceptable	Grietas	No	Fusión Incompleta	No	
		Exceso de penetración	No	Mordedura	Sí	
Observaciones	Los indicadores y sus dimensiones se encuentran especificados en el Informe de Tintas Penetrantes del ANEXO XI					
Ensayo de Tracción						
Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima registrada, (lbf/MPa)	Resistencia a la tracción, (Ksi/Mpa)	Carácter de falla y localización
P4V1/M19.091.15	25	7,33	183,25	19 082 / 84 879	67,2 / 463,2	Dúctil / Material base
P4V2/M19.091.16	25,02	7,42	185,6484	19 628 / 87 310	68,2 / 470,3	Dúctil / Material base
Ensayo de doblado guiado						
Muestra N.	Tipo de doblado		Resultado	Observaciones		
P4X1	Doblado de raíz		Aprueba	Existen porosidades que suman 2,5 mm		
P4Y1	Doblado de cara		Aprueba	Existe un poro de 2 mm		
P4X2	Doblado de raíz		Aprueba	No existen indicadores		
P4Y2	Doblado de cara		Aprueba	No existen indicadores		
Nick Break (Sanidad)						
Muestra N.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Profundidad de entalla (mm)	Apariencia de la junta luego de la fractura	Defectos presentes en las superficies de fractura	
P4W1/M19.091.07	25,33	7,38	2,18	Fractura dúctil	Ninguno	
P4W2/M19.091.08	26,59	7,55	2,94	Fractura dúctil	Ninguno	