



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: JUAN ANDRÉS MORALES DOMÍNGUEZ

**TEMA: DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA SIN POST-
CALENTAMIENTO PARA EL ACERO AISI 4130 BAJO LA NORMA API 6A Y
NORMA ASME SECCIÓN 9**

**DIRECTOR: ING. CARLOS NARANJO
CODIRECTOR: ING. XAVIER SÁNCHEZ**

SANGOLQUÍ, JULIO 2014

CERTIFICADO

El proyecto "**DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA SIN POST-CALENTAMIENTO PARA EL ACERO AISI 4130 BAJO LA NORMA API 6A Y NORMA ASME SECCIÓN 9**" fue realizado en su totalidad por el señor Juan Andrés Morales Domínguez como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Carlos Naranjo

DIRECTOR

Ing. Xavier Sánchez

CODIRECTOR

Sangolquí, 10 de Julio de 2014

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, JUAN ANDRÉS MORALES DOMÍNGUEZ

DECLARO QUE:

La tesis / proyecto de grado titulado "**DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA SIN POST-CALENTAMIENTO PARA EL ACERO AISI 4130 BAJO LA NORMA API 6A Y NORMA ASME SECCIÓN 9**" ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente. Este trabajo es mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/proyecto de grado en misión.

Sangolquí, 10 de Julio de 2014

Juan Andrés Morales Domínguez

171994127-8

AUTORIZACIÓN

Yo, Juan Andrés Morales Domínguez

Autorizó a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado "**DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA SIN POST-CALENTAMIENTO PARA EL ACERO AISI 4130 BAJO LA NORMA API 6A Y NORMA ASME SECCIÓN 9**", cuyo contenido ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad de autoría.

Sangolquí, 10 de Julio de 2014

Juan Andrés Morales Domínguez

171994127-8

DEDICATORÍA

El presente proyecto es dedicado a mi padre Marco Vinicio Morales y a mi madre Ana Cecilia Domínguez, quienes con su apoyo incondicional han estado en cada etapa de mi vida.

A mis hermanas Cristina y Natalia que siempre me han motivado a seguir adelante y superarme a mí mismo.

A todos mis familiares y amigos que han contribuido de una u otra forma para concluir este proyecto.

Juan Andrés Morales Domínguez

AGRADECIMIENTO

Agradezco ante todo a Dios que ha estado en cada etapa de mi vida cuidándome y brindándome su amor incondicional.

Agradezco a mi familia por el apoyo que me han brindado no solo a lo largo de la carrera sino a lo largo de toda mi vida.

A mis amigos y amigas que han estado apoyándome en mis alegrías y tristezas y me han brindado apoyo a lo largo de esta hermosa etapa que está culminando.

A mis directores de tesis, Ingenieros Carlos Naranjo y Xavier Sánchez, quienes han compartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi formación académica las cuales me han hecho ser un mejor profesional.

Un agradecimiento a MISSION PETROLEUM S.A. y en especial al Ingeniero Emilio Cuvero quien siempre estuvo presto para brindarme su apoyo.

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE y a sus docentes, y en especial al ingeniero Emilio Tumipamba por aportar en mi formación académica y humana.

Juan Andrés Morales Domínguez

ÍNDICES

CAPITULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1. TITULO	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
1.4. JUSTIFICACION	5
1.5. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.6. OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
1.7. ALCANCE	6
CAPITULO II.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1. SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 4130.....	7
2.1.1. DENOMINACIÓN AISI.....	7
2.1.2. ACERO AISI 4130	9
2.1.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	9
2.1.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 4130.....	9
2.1.2.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 4130.....	10
2.1.2.3.1. ALEANTES PERJUDICIALES PARA LA SOLDADURA DEL ACERO AISI 4130 11	
2.1.2.3.2. CARBONO EQUIVALENTE	12
2.2. ANALISIS DE NORMATIVAS	13
2.2.1. ESPECIFICACIÓN API 6A (ISO 10423).....	13
2.2.2. CÓDIGO BPVC ASME SECCIÓN IX.....	14
2.2.3. NACE MR 0175 (ISO 15156).....	15
2.3. DISEÑO Y CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA. ..	15
2.3.1. ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	15
2.3.1.1. CONTENIDO DEL WPS	15
2.3.2. REPORTE DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO	16
2.3.2.1. CONTENIDO DEL PQR.....	16

2.3.3. ENSAYOS DESTRUCTIVOS	17
2.3.3.1. ENSAYO A TRACCIÓN (QW-150)	18
2.3.3.2. ENSAYO DE DOBLEZ GUIADO (QW-160)	19
2.3.3.3. ENSAYO DE TENACIDAD (QW-170).....	20
2.3.3.3.1. ENSAYO CHARPY (NOTCH-V).....	21
2.3.3.3.2. CAIDA DE PESO (DROP-WEIGHT)	22
2.3.3.4. ENSAYO DE DUREZA	23
2.3.3.4.1. DUREZA VICKERS.....	23
2.3.3.4.2. DUREZA ROCKWELL	24
2.3.4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	25
2.3.4.1. ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES.....	26
2.3.4.2. INSPECCIÓN VISUAL	27
2.4. CUPON DE PRUEBA Y ESPECIMENES DE PRUEBAS	27
2.5. TRATAMIENTOS TERMICOS POSTSOLDADURA	29
2.5.1. DISTENSIONADO.....	29
2.5.2. REVENIDO.....	30
2.6. METALURGIA DE LA SOLDADURA	31
2.6.1. ZONA AFECTADA TERMICAMENTE	31
2.6.2. APLICACIÓN DEL DIAGRAMA TTT EN LA SOLDADURA	32
2.7. SOLDADURA DE REVENIDO.....	34
2.7.1. ZONA AFECTADA TERMICAMENTE POR LA SOLDADURA DE REVENIDO	35
 CAPITULO III.....	 37
 DISEÑO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA DE PRUEBA.....	 37
3.1. DISEÑO DE LOS WPS DE PRUEBA.....	37
3.2. DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDADURA	37
3.2.1. TIPO DE JUNTA	38
3.2.1.1. JUNTA A TOPE.....	38
3.2.1.2. JUNTA A ESQUINA	39
3.2.1.3. JUNTA TRASLAPADA.....	39
3.2.1.4. JUNTA DE BORDE	39
3.2.1.5. JUNTA EN T.....	39

3.2.2. TIPO DE SOLDADURA	39
3.2.2.1. SOLDADURA DE FILETE	39
3.2.2.2. SOLDADURA DE RANURA	40
3.2.2.2.1. JUNTA DE PENETRACIÓN COMPLETA (CJP)	40
3.2.2.2.2. JUNTA DE PENETRACIÓN PARCIAL (PJP)	41
3.2.3. SELECCIÓN DE LA JUNTA.....	41
3.2.4. DIMENSIONES DE LA JUNTA	42
3.2.5. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES	43
3.2.5.1. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE TRACCIÓN.....	44
3.2.5.2. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE DOBLADO LATERAL	45
3.2.5.3. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE IMPACTO	46
3.2.5.4. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE DUREZA Y METALOGRAFÍAS	47
3.2.6. UBICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES EN EL CUPÓN DE SOLDADURA Y DIMENSIONES FINALES DEL MISMO	48
3.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS WPS's	48
3.4. VARIABLES DEL PROCESO DE SOLDADURA BAJO CÓDIGO BPVC ASME SECCIÓN IX	49
3.4.1. VARIABLES ESENCIALES	51
3.4.1.1. CARBONO EQUIVALENTE	51
3.4.1.2. ESPESOR T.....	52
3.4.1.3. TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO	54
3.4.1.4. ENTRADA DE CALOR	54
3.4.1.5. ELECTRODO SIMPLE O MULTIPLE	55
3.4.1.6. TIPO DE PROCESO DE SOLDADURA.....	55
3.5. SELECCIÓN DEL ELECTRODO REVESTIDO.....	56
3.5.1. ELECTRODOS BAJO NORMA AWS A5.5.....	56
3.5.2. COMPATIBILIDAD DEL ELECTRODO Y DEL MATERIAL BASE	58
3.5.3. DIAMETRO DEL ELECTRODO	59
3.6. PARAMETROS DE LA TÉCNICA DE REVENIDO EN PROCESO SMAW	59
3.6.1. TIPO DE CORRIENTE.....	60
3.6.1.1. CORRIENTE ALTERNA.....	60
3.6.1.2. CORRIENTE CONTINUA DE ELCEURODO (DCEN).....	61
3.6.1.3. CORRIENTE CONTINUA DE ELECTRODO (DCEP).....	62

3.6.2. AMPERAJE O INTENSIDAD DE CORRIENTE	62
3.6.3. VOLTAJE	63
3.6.4. FORMA DE LLEVAR EL ELECTRODO	63
3.6.5. VELOCIDAD DE AVANCE.....	64
3.6.6. DISPOSICIÓN Y SECUENCIA DE CORDONES	65
3.7. PARAMETROS PARA LOS WPS's DE PRUEBA	66
CAPITULO IV	67
CALIFICACIÓN DEL WPS	67
4.1. CONTROLES ANTES DE LA SOLDADURA	67
4.1.1. SOLDADORA.....	67
4.1.1.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA SOLDADORA	67
4.1.1.2. CALIBRACIÓN DE LA SOLDADORA.....	69
4.1.2. SOLDADOR	69
4.1.3. CONTROL METROLÓGICO DE LAS PROBETAS	70
4.1.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS CUPONES DE SOLDADURA	71
4.1.5. RESECADO DE LOS ELECTRODOS.....	72
4.1.6. PRECALENTAMIENTO.....	73
4.2. CONTROLES DURANTE LA SOLDADURA.....	74
4.2.1. DIÁMETRO DEL ELECTRODO	74
4.2.2. AMPERAJE Y VOLTAJE	75
4.2.3. VELOCIDAD DE AVANCE.....	75
4.2.4. REFUERZO DE CAPAS	76
4.2.5. TEMPERATURA ENTRE PASES.....	77
4.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	78
4.3.1. INSPECCIÓN VISUAL.....	78
4.3.1.1. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	78
4.3.1.2. INSPECCIÓN VISUAL EN LOS CUPONES	78
4.3.2. TINTAS PENETRANTES.....	80
4.3.2.1. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	80
4.3.2.2. ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES EN LOS CUPONES.....	81
4.4. ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	84
4.4.1. CONTROL DE LAS PROBETAS.....	85

4.4.2. ENSAYO DE TRACCIÓN	85
4.4.2.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO.....	86
4.4.2.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	86
4.4.2.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	87
4.4.2.4. CALCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PROBETAS ...	88
4.4.2.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN Y ANALISIS	88
4.4.3. ENSAYO DE DOBLADO LATERAL	90
4.4.3.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO.....	91
4.4.3.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	91
4.4.3.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	91
4.4.3.4. RESULTADOS DE ENSAYOS DE DOBLADO LATERAL Y ANALISIS	92
4.4.3.4.1. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S01	96
4.4.3.4.2. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S02	96
4.4.3.4.3. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S03	97
4.4.3.4.4. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S04	97
4.4.4. ENSAYO DE IMPACTO.....	98
4.4.4.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO.....	99
4.4.4.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	99
4.4.4.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	100
4.4.4.4. CONTROL METROLÓGICO DE LAS PROBETAS DE IMPACTO	101
4.4.4.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE IMPACTO Y ANALISIS	101
4.4.5. ENSAYO DE DUREZA	104
4.4.5.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO.....	105
4.4.5.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	106
4.4.5.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	106
4.4.5.4. RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUREZA Y ANALISIS	107
4.4.6. METALOGRAFÍAS	108
4.4.6.1. PROCEDIMIENTO PARA LA METALOGRAFIALA METALOGRAFIA	109
4.4.6.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	111
4.4.6.3. RESULTADOS DE LAS METALOGRAFÍAS Y ANALISIS.....	111
4.5. ANALISIS DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE WPS	116
4.5.1. ANALISIS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS	116
4.5.2. GENERACIÓN DE WPS FINAL	117
4.5.3. GENERACIÓN DE PQR	120

CAPITULO V	124
ANALÍS FINANCIERO	124
5.1. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN WPS CALIFICADO	124
5.1.1. COSTOS DE CONSUMIBLES Y MATERIAL BASE	124
5.1.2. COSTOS DE ELECTRICIDAD	125
5.1.3. COSTOS DE MANO DE OBRA	125
5.1.4. COSTOS DE MOVILIZACIÓN, HOSPEDAJE Y ALIMENTACIÓN	126
5.1.5. COSTOS DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	127
5.1.6. COSTOS DE ENSAYOS	127
5.1.7. COSTOS DE CALIFICACIÓN DEL WPS	128
5.2. COSTOS TOTAL DE LA INVERSIÓN PARA LA CALIFICACIÓN DEL WPS 128	
5.3. TIEMPOS DE PRODUCCIÓN	129
CAPITULO VI	131
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
6.1. CONCLUSIONES	131
6.2. RECOMENDACIONES	132
BIBLIOGRAFÍA	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1: Esquema de Wellhead.	2
Figura No. 2: Esquema de Christmas Tree.	2
Figura No. 3: PWHT realizado con resistencias eléctricas.	4
Figura No. 4: a) Esquema de cabezal de pozo direccional. b) Esquema de árbol de navidad.	13
Figura No. 5: Diagrama Esfuerzo-Deformación.	18
Figura No. 6: Accesorio de prueba ilustrado de la Código BPVC ASME Sección IX (QW-466.1 TEST JIG DIMENSIONS).	20
Figura No. 7: Esquema del funcionamiento de un péndulo Charpy.	21
Figura No. 8: Máquina para realizar ensayo de impacto por caída de peso. ...	22
Figura No. 9: a) Identación de dureza Vickers, b) Esquema del identador para dureza Vickers.	24
Figura No. 10: a) Cupón de prueba para espesores inferiores a 19 mm para calificación de proceso de soldadura según QW-463.1 (a), b) Cupón de prueba para espesores mayores a 19 mm para calificación de proceso de soldadura según QW-463.1 (b).	28
Figura No. 11: Disminución de las tensiones residuales con la temperatura de tratamiento térmico.	30
Figura No. 12: Esquema de un proceso de temple y revenido en un diagrama TTT.	31
Figura No. 13: Diagrama de Hierro-Carbono mostrando las fases de transición de la ZAT en la soldadura.	31
Figura No. 14: a) Diagrama TTT del acero AISI 4130, b) Diagrama TTT del acero AISI 1021.	33
Figura No. 15: Distribución de cordones en una junta de penetración parcial QW-462.12.	35
Figura No. 16: a) Ubicación de las sub zonas, b) Ciclo térmico de cada sub zona, c) Microestructura de cada zona.	36
Figura No. 17: Tipos de Juntas.	38
Figura No. 18: Tipos de bisles.	40
Figura No. 19: Junta CJP.	41
Figura No. 20: Junta PJP.	41

Figura No. 21: Partes del bisel.....	42
Figura No. 22: Geometría de la Junta.....	43
Figura No. 23: QW-461.2(a) Espécimen de sección reducida de plancha.	44
Figura No. 24: Dimensiones de espécimen a tracción (mm).....	44
Figura No. 25: QW-462.2 Espécimen de doblado lateral.	45
Figura No. 26: Dimensiones de espécimen a tracción (mm).....	46
Figura No. 27: Espécimen de Impacto.	46
Figura No. 28: Ubicación del espécimen de impacto.	47
Figura No. 29: Dimensionamiento de probetas de dureza/metalografías.....	47
Figura No. 30: Ubicación de especímenes.	48
Figura No. 31: Corriente alterna AC.....	61
Figura No. 32: Conexión DCEN.	61
Figura No. 33: Conexión DCEP.	62
Figura No. 34: Formas de llevar el electrodo. a) Recto. b) Ondulado.	64
Figura No. 35: Ubicación de las capas de revenido y los cordones de relleno. 65	
Figura No. 36: Maquina de Soldar Lincoln RX 450.	68
Figura No. 37: a) Pinza amperimétrica b) Calibración de la máquina.	69
Figura No. 38: Calibración de la velocidad de avance del soldador.	70
Figura No. 39: Control metrológico de los cupones a) Vista superior de los cupones b) Medición de la raíz del bisel c) Vista frontal del bisel.	70
Figura No. 40: Identificación de los procedimientos a) Procedimiento S01 b) Procedimiento S02 c) Procedimiento S03 d) Procedimiento S04	72
Figura No. 41: Resecado de los electrodos.	73
Figura No. 42: a) Pre calentamiento del procedimiento S01 b) Control de la temperatura de pre calentamiento.	74
Figura No. 43: Control del diámetro del electrodo.....	75
Figura No. 44: Control de tiempo de ejecución del cordón de soldadura en S01.	76
Figura No. 45: Control de refuerzo de los cordones de la primera capa del procedimiento S01 a) Vista superior b) Vista frontal	77
Figura No. 46: Control de temperatura entre pases	77
Figura No. 47: Cupones de Soldadura a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04	79
Figura No. 48: Mordeduras descartadas a) Mordedura del procedimiento S01, b) Mordedura del procedimiento S04.	79

Figura No. 49: Kit de tintas penetrantes	80
Figura No. 50: Limpieza de los cordones de soldadura de los cupones a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04.....	81
Figura No. 51: Aplicación del penetrante en los cupones a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04.	82
Figura No. 52: Aplicación del revelador en los cupones a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04.	83
Figura No. 53: Indicaciones redondas a) S01 y b) S04.....	83
Figura No. 54: Identificación de las probetas según la posición en el cupón de soldadura.....	84
Figura No. 55: Aplicación de tintas penetrantes en la probetas.	85
Figura No. 56: Máquina de ensayos universales MTS-810.....	87
Figura No. 57: Probetas ensayadas a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04	89
Figura No. 58: Calor aportado vs. Resistencia a la tracción.....	90
Figura No. 59: Máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033.....	92
Figura No. 60: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S01.....	93
Figura No. 61: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S02.....	94
Figura No. 62: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S03.....	95
Figura No. 63: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S04.....	96
Figura No. 64: Discontinuidad abierta en la cara convexa de la probeta S02-4.	97
Figura No. 65: Discontinuidades abiertas en las caras convexas de las probetas a) S03-11, b) S03-14.	97
Figura No. 66: Discontinuidad abierta en la probeta S04-4.....	98
Figura No. 67: Solución de hielo seco y alcohol industrial con el rango de temperaturas alcanzadas.....	99
Figura No. 68: Máquina de ensayos universales AMSLER.....	100
Figura No. 69: Control metrológico de la muesca a) Proyector de perfiles, b) Microscopio de herramientas.....	101
Figura No. 70: Probetas ensayadas de impacto a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04	102
Figura No. 71: Tipo de fractura en ensayos charpy y porcentaje de ductilidad.	103
Figura No. 72: Calor aportado vs. Resistencia al Impacto	104

Figura No. 73: Ubicación de las indentaciones realizadas en los ensayos	105
Figura No. 74: Calibración del durómetro a escala Rockwell C.	105
Figura No. 75: Máquina de ensayos universales AMSLER.....	106
Figura No. 76: Calor aportado vs. Resistencia al Impacto	108
Figura No. 77: Ubicación de las indentaciones realizadas en los ensayos	108
Figura No. 78: Lapeadora Casera.....	109
Figura No. 79: Pulidora de Paño.....	110
Figura No. 80: Probeta atacada químicamente con nital al 3%.....	110
Figura No. 81: Microscopio metalúrgico.....	111
Figura No. 82: Metalografía de martensita en un acero austeníticos.	112
Figura No. 83: Metalografías a) Matriz ferrítica con islas de perlita Fig. 129, b) Presencia de ferrita (áreas blancas) y perlita (áreas opacas) Fig. 126, c) Grano fino de perlita Fig. 50 y d) Ferrita y perlita Fig. 130.	113
Figura No. 84: Metalografías del procedimiento S01 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) Matriz ferrítica perlítica de grano fino y d) Perlita gruesa.....	114
Figura No. 85: Metalografías del procedimiento S02 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) Matriz ferrítica perlítica de grano fino y d) Matriz ferrítica perlítica.....	114
Figura No. 86: Metalografías del procedimiento S03 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) Matriz ferrítica perlítica de grano fino y d) Matriz ferrítica perlítica.....	115
Figura No. 87: Metalografías del procedimiento S04 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) matriz perlítica ferrítica de grano fino y d) Perlita gruesa.....	116
Figura No. 88: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX (Frontal)	118
Figura No. 89: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX (Trasera)	119
Figura No. 90: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX (Frontal)	121
Figura No. 91: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX (Trasera)	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1: Convenciones para el primer dígito.	8
Tabla No. 2: Convenciones para prefijos y sufijos.	8
Tabla No. 3: Propiedades mecánicas del acero AISI 4130.	10
Tabla No. 4: Composición química de acero AISI 4130.	10
Tabla No. 5: Características de los aleantes del acero AISI 4130	11
Tabla No. 6: Comparación de ensayos de dureza típicos	23
Tabla No. 7: Número de Ensayos	43
Tabla No. 8: Variables para la calificación de la soldadura de revenido.	50
Tabla No. 9: Límites de la composición química según API 6A.	51
Tabla No. 10: Carbono Equivalente del AISI 4130 y Especificación API 6A. ...	52
Tabla No. 11: Límites de espesores para calificación de procedimiento y especímenes de pruebas QW-451.1.....	53
Tabla No. 12: Precalentamiento y temperatura entre pases dependiendo del espesor.....	54
Tabla No. 13: Tipo de electrodos	57
Tabla No. 14: Composición química bajo la norma AWS A5.5	57
Tabla No. 15: Propiedades de materiales estándar según especificación API 6A.	58
Tabla No. 16: Especificaciones técnicas del electrodo AWS E 9018 B3.....	63
Tabla No. 17: Parámetros de soldadura de los procedimientos.....	65
Tabla No. 18: Parámetros para las capas de revenido	66
Tabla No. 19: Parámetros para los cordones de relleno	66
Tabla No. 20: Especificaciones técnicas de la soldadora Lincoln RX 450	68
Tabla No. 21: Tiempos de ejecución de cada cordón	76
Tabla No. 22: Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales MTS-810.....	87
Tabla No. 23: Dimensiones de probetas y secciones transversales	88
Tabla No. 24: Resultados de los ensayos de tracción.	89
Tabla No. 25: Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033.....	92
Tabla No. 26: Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER.....	100

Tabla No. 27: Resultados de los ensayos de impacto.	101
Tabla No. 28: Especificaciones técnicas el durómetro Rams Rockford	106
Tabla No. 29: Resultados de los ensayos de dureza HV.	107
Tabla No. 30: Resultados de los WPS's	116
Tabla No. 31: Costos de Consumibles.....	124
Tabla No. 32: Costos de Electricidad.....	125
Tabla No. 33: Costos de Mano de Obra.....	126
Tabla No. 34: Costos de Movilización, hospedaje y alimentación.....	126
Tabla No. 35: Costos de Mano de Obra.....	127
Tabla No. 36: Costos de Ensayos.....	127
Tabla No. 37: Costos de Ensayos.....	128
Tabla No. 38: Tiempos de ejecución.....	129

GLOSARIO

Ac1	Temperatura de transformación de la perlita.
Ac3	Línea de transformación a ferrita.
AISI	American Iron and Steel Institute o Instituto Americano de hierro y acero.
API	American Petroleum Institute o Instituto Americano de Petróleo.
ASME	American Society of Mechanical Engineers o Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.
BPVC	Boil Pressure Vessel Code o código de recipientes a presión.
FCAW	Flux Cored Arc Welding o Soldadura con alambre con fundente interno.
GLP	El GLP es el Gas Licuado de Petróleo, el cual es utilizado tanto en uso industrial como casero.
GMAW	Gas Metal Arc Welding o Soldadura con alambre con protección gaseosa.
NDT	Non-Destructive Testing o ensayos no destructivos.
PQR	Procedure Qualification Record o Registro de calificación de procedimiento.
PSL	PSL o Product Specification Level, por su siglas en inglés, es el nivel de especificación del producto y estos pueden ser PSL1, PSL2, PSL3 y PSL4, siendo este último el de más alta calidad.

PWHT	Post Welding Heat Treatment o tratamiento térmico post soldadura.
SAE	Society of Automotive Engineers o Sociedad de Ingenieros Automotrices.
SMAW	Shielded Metal Arc Welding o Soldadura con electrodo revestido.
WPS	WPS llamado asi por sus siglas que significa “Welding Procedure Specification” o en español EPS que es la “Especificación de Procedimiento de Soldadura”.
ZAT	Zona afectada térmicamente o zona afectada por el calor.

RESUMEN

Los cabezales de petróleo y los árboles de navidad se construyen en nuestro país desde el año 2004 bajo la especificación API 6A y el código BPVC ASME Sección IX, usando materiales como el acero AISI 4130, el 1045 o el 4140, para la fabricación de los mismos se utiliza la soldadura para unir las distintas partes, dicha soldadura necesita un postcalentamiento en los procedimientos convencionales para garantizar las propiedades mecánicas de tenacidad las cuales requieren que la estructura metalográfica de la soldadura esté libre de martensita, para esto en este proyecto se investiga la soldadura por revenido, por lo cual se desarrolló tres distintos procedimientos los cuales varían en el aporte de calor siendo estos 5, 6 y 7 KJ/cm los cuales fueron determinados por una investigación previa. Una vez elaborados los cupones de soldadura de cada procedimiento alternativo, se llevaron a cabo los ensayos destructivos y no destructivos especificados en el código a fin de evaluar las propiedades mecánicas y las características de la junta soldada, y consecuentemente determinar qué proceso es el más adecuado en función de las condiciones a satisfacer previamente mencionadas. De las pruebas realizadas se obtiene que el procedimiento de soldadura con un aporte de calor de 5 KJ/cm es el más adecuado ya que la junta soldada cumple con las propiedades mecánicas especificadas en la norma, tanto en dureza como en tracción, impacto y ductilidad.

Keywords: Acero AISI 4130, PWHT, BPVC ASME Sección IX, API 6A y Soldadura de Revenido.

ABSTRACT

Wellheads and Christmas trees are built in our country since 2004 under specification API 6A and ASME BPVC Section IX code, using materials such as AISI 4130 steel, 1045 or 4140, for the manufacture of same welding is used to join the different parts, the weld needs reheating in conventional procedures to ensure mechanical toughness properties which require the metallographic structure of the weld is free of martensite for this in this project investigates the tempering welding, whereby three different procedures which vary in heat input being developed these 5, 6 and 7 KJ / cm which were determined by a previous investigation. Once developed the test welds of each alternative process is carried out destructive and non-destructive tests mentioned in order to evaluate the mechanical properties and characteristics of the welded joint, and consequently determine which process is best suited based on satisfying the aforementioned conditions. Of the tests we find that the process of welding heat input of 5 KJ/cm is best suited as the welded joint conforms to the mechanical properties specified in the standard, both hardness and tensile ductility and impact.

Keywords: Steel AISI 4130, PWHT, ASME BPVC Section IX, API 6A and Welding of Tempered.

CAPITULO I

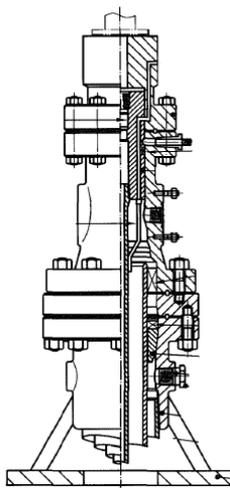
GENERALIDADES

1.1. TITULO

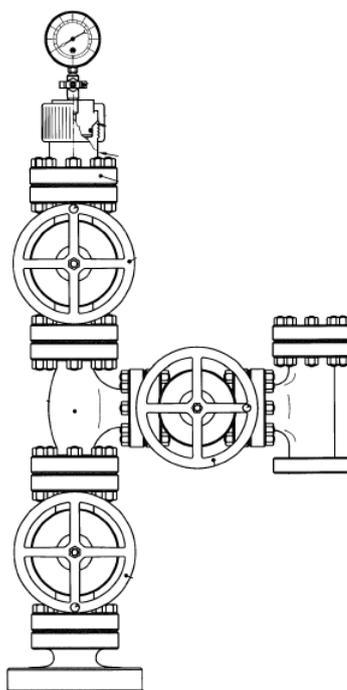
Diseño de un procedimiento de soldadura sin post-calentamiento para el acero AISI 4130 bajo la norma API 6A y norma ASME Sección 9

1.2. ANTECEDENTES

Los cabezales de completación de pozos (Ver Figura 1) son la base en la superficie, sobre el cual se construye el pozo durante las operaciones de perforación y los arboles (Ver Figura 2) siendo elementos que proveen un sistema de control de válvulas de los fluidos que son producidos o inyectados al pozo, ambos son elementos fundamentales en la industria petrolera. En el Ecuador este tipo de elementos eran importados, sin embargo pero a partir del año 2004 empresas ecuatorianas empezaron con la fabricación de los mismos bajo las especificaciones API 6A, y logrando con ello un producto que poseen una especificación PSL1.



**Figura No. 1: Esquema de Wellhead.
(American Petroleum Institute API 6A, 2004)**



**Figura No. 2: Esquema de Christmas Tree.
(American Petroleum Institute API 6A, 2004)**

En el Ecuador existen tres empresas dedicadas a la fabricación, reparación y mantenimiento de los cabezales de completación de pozos y árboles, las cuales son MISSION PETROLEUM S.A., VALVULAS DEL PACÍFICO S.A. Y TECHNOLOGIES S.A., para la fabricación se utilizan

diversos procesos de manufactura entre los cuales se ve envuelto la soldadura, esta se realiza a los cabezales los cuales están hechos del acero AISI 4130, este material presenta ciertos problemas al momento de realizar la soldadura debido a su alto contenido de carbono ya que es muy susceptible a formar martensita al enfriarse rápidamente la cual produce una dureza elevada y también fragiliza el material, además éste es un microconstituyente que se corroe fácilmente con la presencia de sulfuro de hidrogeno (UNLP, 2014), el cual está presente en el petróleo que estos cabezales manejan, por lo que es necesario un PWHT después de la soldadura para garantizar las propiedades mecánicas y una estructura metalográfica sin presencia de martensita.

El tiempo al que se debe someter este tipo de tratamiento térmico depende del espesor del materia, algunas recomendaciones nos aconsejan que por cada pulgada de espesor se debe realizar un PWHT de una hora aproximadamente, además que se debe enfriar lentamente para evitar la presencia de martensita. Para realizar este PWHT existen diversas formas entre las cuales destacan:

- Resistencias Eléctricas (Ver Figura 3): Su ventaja es la administración de calor uniformemente por toda la superficie de contacto, pero en los Christmas Tree, colocar un equipo de estos es muy complicado por las distintas formas y limitaciones de espacio que se tienen además de sus altos costos.



**Figura No. 3: PWHT realizado con resistencias eléctricas.
(ATTAR Advanced Technology Testing and Research, 2014)**

- GLP o Acetileno: Este es el método más usado pero tiene como gran desventaja que no se puede administrar calor uniformemente a lo largo de todo el material afectado, lo cual no es muy recomendable.

Cualquiera de estas dos alternativas podrían ser utilizadas, pero el realizar un PWHT en taller es muy complicado debido a que se debe alcanzar una temperatura uniforme de entre 550°C a 600°C, con la cual se busca un revenido de la soldadura, para lo cual es necesario mantener la temperatura durante una hora por cada 25 mm de espesor entre la temperatura ambiente y la temperatura crítica Ac1 (Temperatura de transformación de la perlita) la cual para el acero AISI 4130 es de 750°C (Ver ANEXO 13), por este motivo se quiere prescindir del PWHT y buscar nuevas alternativas que no influyan en las propiedades mecánicas y requisitos de dureza que plantean las distintas normativas y bibliografías especializadas.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En los talleres es complicado realizar un PWHT debido al tiempo que este requiere y además a las complicaciones logísticas que este implica.

En general el no realizar un precalentamiento no garantiza las propiedades mecánicas tales como resistencia, ductilidad y tenacidad necesarias para este tipo de equipos, además el no realizar el precalentamiento puede generar la presencia de martensita en la microestructura del acero, la cual en presencia de sulfuro de hidrogeno se corre rápidamente.

Todos estos aspectos influyen en las propiedades mecánicas de estos elementos usados en la industria petrolera, por lo cual es necesario encontrar una nueva alternativa.

1.4. JUSTIFICACION

Cuando se realiza una soldadura con acero AISI 4130 es necesario un PWHT para garantizar las propiedades mecánicas y estructura metalográfica de la junta ya que esta va a estar en contacto directo con el petróleo, y si esta posee martensita el cabezal o árbol va a presentar corrosión o por una sobrepresión este no va a soportar por ser un material frágil, no obstante en campo es muy complicado realizar un PWHT sea por tiempo, ubicación, logística o costos, por este motivo las empresas que prestan este servicio se ven en la necesidad de realizar un procedimiento de soldadura que garantice las propiedades mecánicas y la estructura metalográfica sin tener que realizar un PWHT, y lograr de este modo generar soldaduras que cumplan los requerimientos de normativas, sin tener que invertir en equipos de PWHT.

1.5. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un procedimiento de soldadura que no requiera PWHT en base al código BPVC ASME Sección IX y a la especificación API 6A para el acero AISI 4130.

1.6. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la soldabilidad del acero AISI 4130 de acuerdo a los requerimientos de los cabezales de completación y los árboles.
- Identificar los distintos parámetros a controlar en el procedimiento de soldadura.
- Determinar tiempos de producción en aplicaciones tipo.
- Desarrollar los WPS y PQR necesarios para la certificación del proceso.
- Determinar las propiedades mecánicas y la estructura metalográfica de la junta soldada.

1.7. ALCANCE

Generar un procedimiento de soldadura y la calificación con sus respectivos registros para lograr soldar en campo sin la necesidad de PWHT el acero AISI 4130 y que cumpla con los requerimientos de las normativas API 6A y ASME Sección IX.

Estimar tiempos de producción necesarios con el nuevo procedimiento y además entrenar a los soldadores y ayudantes de los mismos para realizarlo correctamente.

CAPITULO II

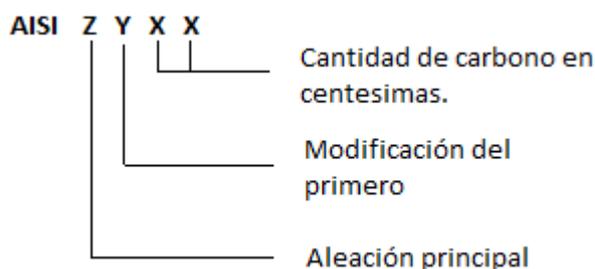
MARCO TEÓRICO

2.1. SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 4130

Para determinar la soldabilidad del acero AISI 4130 es necesario identificar las propiedades mecánicas y composición química, además de los requerimientos técnicos y normativas que este debe cumplir, los cuales serán citados en el presente capítulo.

2.1.1. DENOMINACIÓN AISI

La denominación es la identificación específica que depende del tipo, grado o clase de acero expresado por números, letras, símbolos, nombres o su combinación para la completa designación de un acero en particular. Existen varias maneras para la clasificación de los aceros, pero la más utilizada es la dada por la norma SAE-AISI la cual utiliza un esquema de 4 números para la especificación de los aceros.



En este sistema de designación de los aceros de cuatro dígitos, el primero especifica la aleación principal, el segundo es el modificante del primero y los dos últimos dígitos representan el porcentaje de carbono en centésimas.

Tabla No. 1: Convenciones para el primer dígito.

IDENTIFICADOR	ALEANTE
1xxx	Manganeso
2xxx	Níquel
3xxx	Níquel-Cromo *Principal aleante el cromo.
4xxx	Molibdeno
5xxx	Cromo
6xxx	Cromo-Vanadio *Principal aleante el cromo.
7xxx	Níquel-Cromo-Molibdeno *Principal aleante el molibdeno.
8xxx	Níquel-Cromo-Molibdeno *Principal aleante el níquel.

También en las especificaciones AISI se puede incorporar un prefijo o sufijo mediante letras para indicar el proceso de manufactura o realizar indicaciones generales.

Tabla No. 2: Convenciones para prefijos y sufijos.

PREFIJOS	IDENTIFICACIÓN
EXXXX	Indicar fusión en horno eléctrico básico.
XXXXH	Indicar grados de acero con templabilidad garantizada.
CXXXX	Indicar fusión en horno por arco eléctrico básico.
XXXXX	Indicar alguna desviación del análisis de norma.
TSXXXX	Indicar que se trata de una norma tentativa.
XXBXX	Indicar que se trata de grados de acero con un probable contenido mayor de 0.0005% en boro.
XXXXLC	Indicar grados de acero con extra-bajo contenido en carbono (0.03% máx.).
XXXXF	Grados de acero automático.

2.1.2. ACERO AISI 4130

2.1.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Según sus siglas el acero AISI 4130 es un acero al Cr-Mo con un porcentaje de carbono de 0.30%, este acero se utiliza en la construcción, es de baja aleación que posee como principales aleantes al cromo y al molibdeno este último le brinda al acero una resistencia a la fragilidad causada por el temple, además por su bajo contenido en carbono es un acero que brinda buenas características de soldabilidad, una buena tenacidad en su estado bonificado, buena maquinabilidad y no es susceptible a fragilidad de revenido.

Sus principales aplicaciones son:

- Elementos de máquinas de medianas dimensiones, donde se requiera alta tenacidad y resistencia a la tracción.
- Árboles de leva, muñones de dirección, ejes, pernos, válvulas, etc.
- Estructuras soldadas.
- Cilindros de gas.
- Ámbito petrolero (Cabezales, árboles de navidad, tuberías)

2.1.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 4130

Las propiedades mecánicas del acero AISI 4130 están especificadas en la siguiente tabla:

**Tabla No. 3: Propiedades mecánicas del acero AISI 4130.
(AZOM, 2014)**

PROPIEDADES	UNIDADES MÉTRICAS	UNIDADES IMPERIALES
Esfuerzo ultimo a la tracción	560 MPa	81200 psi
Esfuerzo de fluencia	460 MPa	66700 psi
Módulo de elasticidad	190-210 GPa	27557-30458 psi
Módulo de compresibilidad	140 GPa	20300 ksi
Módulo de cizallamiento	80 GPa	11600 ksi
Módulo de Poisson	0.27-0.30	0.27-0.30
Alargamiento a la rotura	21.50%	21.50%
Reducción de superficie	59.60%	59.60%
Dureza Brinell	217	217
Dureza Knoop	240	240
Dureza Rockwell B	95	95
Dureza Rockwell C	17	17
Dureza Vickers	228	228
Maquinabilidad	70%	70%

2.1.2.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 4130

La composición química del acero AISI 4130 se especifica en la Tabla No.4.

**Tabla No. 4: Composición química de acero AISI 4130.
(AZOM, 2014)**

ELEMENTO	CONTENIDO (%)
Hierro, Fe	97.03 - 98.22
Cromo, Cr	0.80 - 1.10
Manganeso, Mn	0.40 - 0.60
Carbón, C	0.28 – 0.33
Silicio, Si	0.15 – 0.30
Molibdeno, Mo	0.15 – 0.25
Azufre, S	0.040
Fósforo, P	0.035

2.1.2.3.1. ALEANTES PERJUDICIALES PARA LA SOLDADURA DEL ACERO AISI 4130

La soldabilidad de los distintos materiales depende de cinco elementos: carbono, manganeso, fósforo, azufre y silicio. El cambio de los porcentajes de estos elementos o la adición de otros elementos tales como el cromo, níquel, molibdeno o vanadio alteran la soldabilidad del acero. Como estos aleantes se encuentran en el acero AISI 4130 se analizará los efectos que estos provocan en la soldabilidad.

**Tabla No. 5: Características de los aleantes del acero AISI 4130
(Horwitz, 1967)**

ALEANTE	CARACTERISTICAS
CARBÓN	El carbón es un elemento endurecedor en el acero, por este motivo hace que el acero sea muy templable. Además si no se realiza un enfriamiento adecuado después de la soldadura, tiende a endurecerse y se fragiliza en la zona adyacente a la soldadura.
SILICIO	El silicio puede ser perjudicial en la soldadura ya que si se encuentra con contenidos de carbono relativamente altos aumenta la tendencia del acero a agrietarse con la soldadura.
MANGANESO	Con un contenido de manganeso mayor al 0.60% el acero aumenta su tendencia a agrietarse, por otro lado si es menor al 0.30% se puede ver afectada la susceptibilidad a generar porosidades internas, y con un porcentaje entre 0.20% a 0.30% con porcentajes de azufre mayores a 0.03% el acero se agrieta fácilmente a ser soldado.
AZUFRE	Los aceros que poseen azufre tienden a ser quebradizos y al momento de ser soldados poseen una gran tendencia a agrietarse, además tienen tendencia a volverse porosos con cualquier técnica de penetración profunda con electrodos revestidos y esto se debe a que el hidrógeno producido por la combustión del revestimiento se combina con el azufre.

2.1.2.3.2. CARBONO EQUIVALENTE

El carbono equivalente de los aceros es una forma de determinar la tendencia que estos poseen a endurecerse o fisurarse durante la soldadura. Para determinar el carbono equivalente es necesario conocer todos los aleantes del acero y sus porcentajes ya que al igual que influyen en sus características mecánicas también afectan la tendencia a fisurarse después de ser soldado. Para determinar el carbono equivalente de los aceros existen varias expresiones distintas, sin embargo se utilizará la propuesta por el código BPVC ASME Sección IX, el cual nos remite a QW-403.26 con la siguiente expresión:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%) \quad (1)$$

Donde:

Ceq: Carbono equivalente

C: Carbono en %

Mn: Manganeso en %

Cr: Cromo en %

Mo: Molibdeno en %

V: Vanadio en %

Ni: Níquel en %

Cu: Cobre en %

2.2. ANALISIS DE NORMATIVAS

2.2.1. ESPECIFICACIÓN API 6A (ISO 10423)

La especificación API 6A es un estándar que se aplica en la industria petrolera en los cabezales de completación (WellHead) y árboles (Christmas Tree). Esta especificación fue creada para brindar estándares dimensionales para que puedan ser funcionalmente intercambiables. La especificación API 6A comprende requerimientos detallados de la fabricación, tanto de válvulas como conectores utilizados en las locaciones de los pozos petroleros.

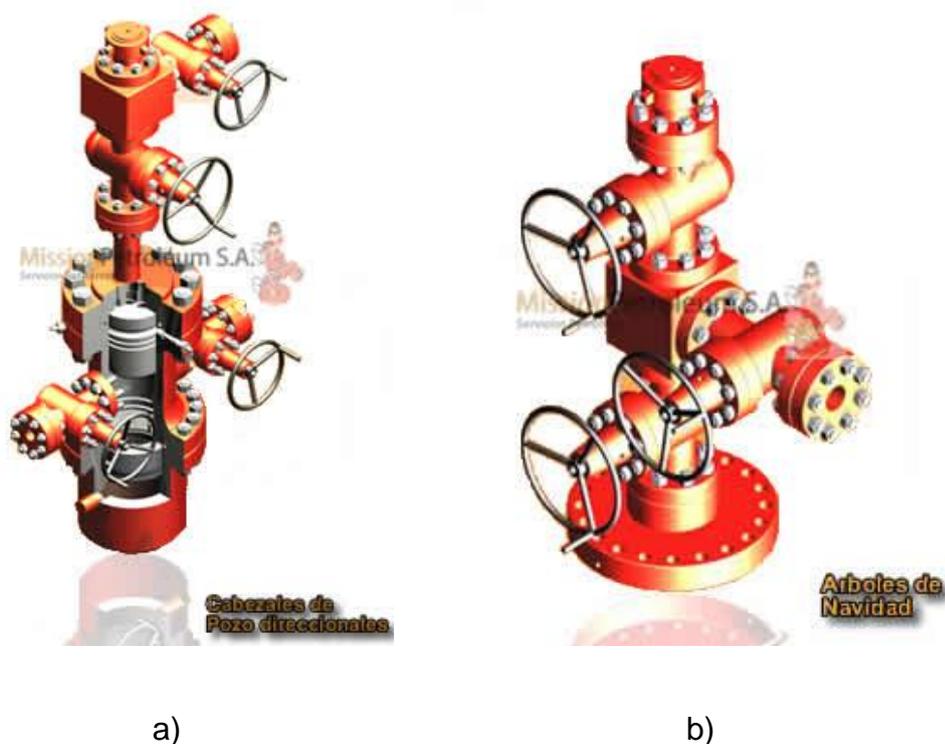


Figura No. 4: a) Esquema de cabezal de pozo direccional. b) Esquema de árbol de navidad.

Para los distintos componentes que comprende los cabezales de completación y los árboles la especificación API 6A introduce niveles de especificación del producto denominándolos PSL, y la especificación API 6A

en su ANEXO A Figura A3 (ver ANEXO 1), nos brinda pautas para los PSL mínimos recomendados para partes primarias del cabezal y el árbol.

En lo que respecta a la calificación de la soldadura la especificación API 6A nos indica que estos procedimientos deben estar en concordancia con el código BPVC ASME Sección IX en los artículos II y III, la cual brinda los lineamientos necesarios para calificación de procedimientos.

2.2.2. CÓDIGO BPVC ASME SECCIÓN IX

El código BPVC ASME fue creado para estandarizar la construcción de calderas de vapor y otros recipientes de presión, además formula reglas estableciendo presiones máximas de diseño, además también se consideran los materiales, los métodos de fabricación y la calificación de procedimientos de soldadura y soldadores. El código BPVC ASME consta de 14 secciones las cuales cubren distintas áreas en la fabricación de recipientes a presión, siendo la Sección IX la que cubre la calificación de soldadura y de soldadores.

La código BPVC ASME Sección IX está constituida por dos partes, QW que se utiliza para la calificación de soldadura y QB que es utilizada para la calificación de soldadura por brazing (o también conocida como soldadura fuerte es un proceso de unión de dos metales a través de la adición de un material de aporte el cual debe tener una temperatura de fusión de 450° y menor que el material base). Este código es aplicable para la calificación de soldadores, operarios de soldadura y para procedimientos que son empleados para soldar.

2.2.3. NACE MR 0175 (ISO 15156)

La especificación API 6A nos indica que para componentes críticos que se encuentren en servicio ácido (El servicio ácido está definido como cualquier caso donde la presión absoluta de sulfuro de hidrógeno (H₂S) exceda 0,05 psi (0,0003 MPa)) es necesario cumplir la norma NACE MR0175.

La NACE MR0175 nos brinda un listado de materiales que son aceptados para el servicio ácido los cuales incluyen las restricciones de las propiedades mecánicas, procesos de tratamiento térmico y métodos de manufactura.

2.3. DISEÑO Y CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA.

2.3.1. ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El WPS también conocido como EPS es un documento escrito que es preparado y aprobado mediante la calificación del mismo y éste es utilizado para brindar las directrices necesarias para ejecutar la soldadura y realizar la inspección.

2.3.1.1. CONTENIDO DEL WPS

En el procedimiento de soldadura se debe relacionar todas las variables que se citan en QW-250 para los distintos procesos de soldadura tales como el SMAW, GMAW, FCAW, etc.

Estas variables incluyen:

- Variables esenciales: son todas aquellas que al cambiar afectan directamente las propiedades mecánicas de la junta soldada.

- Variables no esenciales: son todas aquellas que al cambiar no afectan a ninguna propiedad mecánica de la junta.
- Variables esenciales suplementarias: son todas aquellas que al cambiar afectan las propiedades de impacto.
- Rangos aceptables.
- Información útil.

2.3.2. REPORTE DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

El PQR es un documento que valida y respalda al WPS, en el cual se registra los valores de las variables esenciales y otras variables que se requieren al soldar los cupones de prueba. En el PQR se documenta los resultados del trabajo de soldadura y los ensayos de los especímenes de prueba.

2.3.2.1. CONTENIDO DEL PQR

En el PQR se registran todas las variables que se contemplan en el WPS tales como:

- Variables esenciales utilizadas en el procedimiento.
- Variables no esenciales que el fabricante requiera.
- Variables esenciales suplementarias si se requiere ensayos de impacto.
- Toda la información que sea necesaria para respaldar el WPS

Además de adjuntar las variables del procedimiento también es necesario añadir los resultados obtenidos de los distintos ensayos destructivos tales como:

- Ensayos de tensión
- Ensayos de doblado
 - Doblado de cara
 - Doblado de raíz
 - Doblado lateral
- Ensayos de impacto
- Ensayo de dureza cuando el código o la norma de construcción lo exige.
- Micrografía y macrografía para corroborar los resultados de dureza.

2.3.3. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Para realizar la calificación del procedimiento de soldadura según ASME Sección IX se usan cinco tipos de ensayos diferentes que son utilizados de acuerdo al caso y estos son:

- Ensayo de Tensión (QW-150)
- Ensayo de Doblez Guiado (QW-160)
- Ensayo de Tenacidad (QW-170)
- Ensayos de Soldadura en Filete (QW-180)
- Ensayos en Soldadura de Pernos (QW-192)

Por otro lado para garantizar la junta soldada también se realizan otros ensayos tales como:

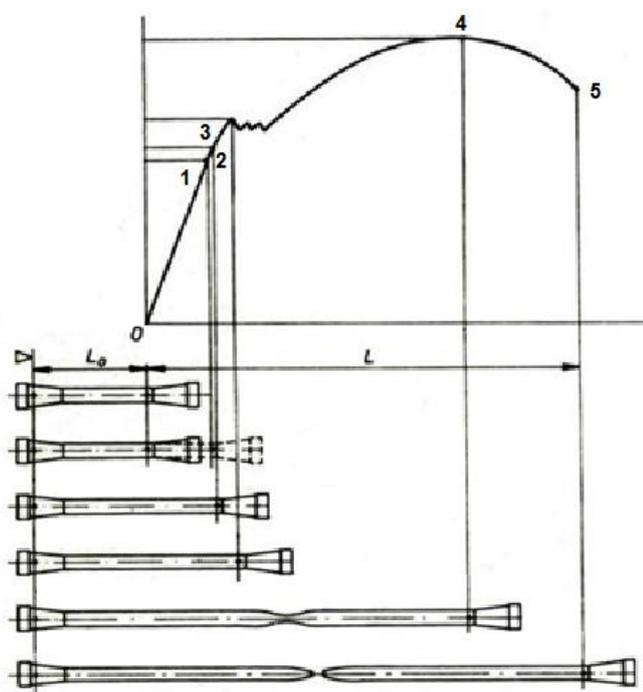
- Ensayo de dureza
- Metalografías

2.3.3.1. ENSAYO A TRACCIÓN (QW-150)

El ensayo a tracción consiste en la aplicación de una carga axial a una probeta que esta normada en sus dimensiones, para lograr determinar su deformación plástica y también determinar su esfuerzo de rotura. Existen diversas probetas para el ensayo a tracción que depende del tipo de producto y de sus dimensiones y estas son:

- Tipo laminar sección reducida.
- Tipo tubería sección reducida.
- Tipo redondo.
- Tipo sección completa de tubería.

Con este ensayo se puede determinar una serie de propiedades mecánicas que se pueden observar en el diagrama de esfuerzo-deformación.



**Figura No. 5: Diagrama Esfuerzo-Deformación.
(ASTM, 1977)**

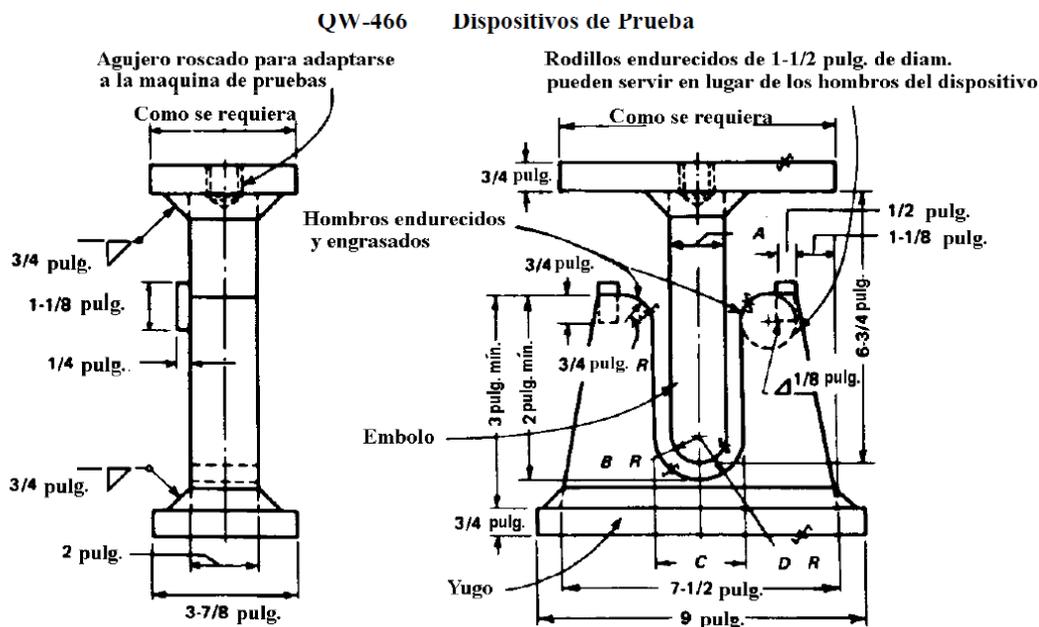
1. Límite de elasticidad: es el esfuerzo máximo que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.
2. Límite de proporcionalidad: es el valor esfuerzo por debajo de la cual el alargamiento producido es proporcional a la carga aplicada.
3. Límite de fluencia: el límite de fluencia es el esfuerzo en el cual el material pasa a una zona de transición entre la zona plástica y la zona elástica.
4. Límite de rotura: es el esfuerzo máximo que puede resistir una probeta antes de producirse la estricción.
5. Rotura efectiva: la rotura efectiva es el esfuerzo con el cual la probeta se rompe al ser sometida a tracción.

Este ensayo se debe realizar bajo la norma ASTM E8, donde se especifican el método para realizar el mismo.

2.3.3.2. ENSAYO DE DOBLEZ GUIADO (QW-160)

El ensayo de doblez guiado proporciona un control de calidad de la soldadura que ayuda a determinar la ductilidad de la misma, además de ver la eficacia del procedimiento de soldadura. Durante este ensayo se debe aplicar una carga en el punto central del material que contiene la soldadura mientras tanto el resto de material se apoya en los extremos y se procede a doblar 180°. Existen varios tipos de especímenes para el ensayo de doblado que dependen del espesor y del tipo de material usado y estos son: doblez de lado transversal, doblez de cara transversal, doblez de raíz transversal, doblez de cara longitudinal y doblez de raíz longitudinal.

Para realizar el ensayo de doblado es necesario tener en cuenta el procedimiento detallado en QW-162, el cual explica cómo debe ser realizado y los accesorios a ser utilizados, los cuales están ilustrados en QW-466.



**Figura No. 6: Accesorio de prueba ilustrado de la Código BPVC ASME Sección IX (QW-466.1 TEST JIG DIMENSIONS).
(The Americas Society of Mechanical Engineers, 2013)**

2.3.3.3. ENSAYO DE TENACIDAD (QW-170)

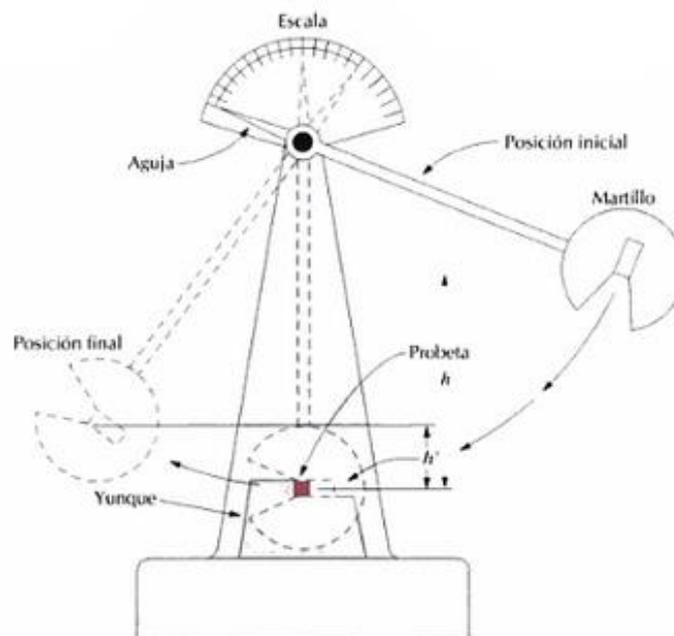
Este ensayo se realiza cuando el código de construcción utilizado así lo indica y los especímenes, procedimientos y criterios de aceptación del mismo se encuentran en dicho código. Sin embargo el código BPVC ASME Sección IX nos refiere dos ensayos de tenacidad los cuales son:

- Ensayo Charpy
- Caída de peso

2.3.3.3.1. ENSAYO CHARPY (NOTCH-V)

El ensayo Charpy es utilizado para determinar la tenacidad de un material, desde un punto más estricto este ensayo mide la energía absorbida por un material antes de producirse su rotura. Este ensayo se debe regir a la norma ASTM A-370.

Para realizar este ensayo es necesario un péndulo Charpy (Ver Figura No. 7), el cual se deja caer desde una altura conocida, impactando contra el material que absorbe parte de la energía del péndulo reduciendo la oscilación del mismo, por lo cual se puede decir que entre más tenacidad tenga un material más corta será la distancia final que recorrerá el péndulo.



**Figura No. 7: Esquema del funcionamiento de un péndulo Charpy.
(Callister, 2007)**

2.3.3.3.2. CAIDA DE PESO (DROP-WEIGHT)

Al igual que el ensayo Charpy, el ensayo de caída de peso es utilizado para medir la tenacidad de un material, sin embargo posee la ventaja que puede realizar ensayos para conocer la temperatura a la cual el material se vuelve frágil, este ensayo debe ser realizado bajo las indicaciones que nos dicta la norma ASTM E208

Está constituido por dos cámaras, en la cámara superior se encuentra un dardo de acero el cual se deja caer libremente a lo largo de dos guías hasta cuando golpea con la probeta colocada en la parte inferior.



Figura No. 8: Máquina para realizar ensayo de impacto por caída de peso.

(American Society for Testing and Materials, 1995)

2.3.3.4. ENSAYO DE DUREZA

La dureza de un material se puede determinar mediante las durezas Rockwell, Brinell y también con las microdurezas Vickers y Knoop. Cada una de estas durezas posee un indentador diferente y se deben de aplicar cargas distintas según sea el caso. Sin embargo la código BPVC ASME Sección IX, NACE MR0175 y la especificación API 6A nos limita a la utilización de dureza Vickers y dureza Rockwell.

Tabla No. 6: Comparación de ensayos de dureza típicos

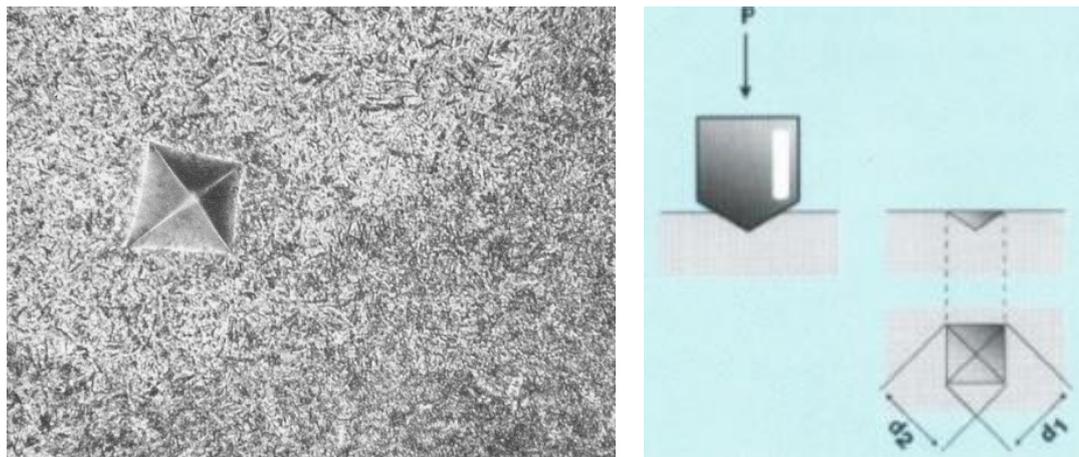
ENSAYO	IDENTADOR	CARGA	APLICACIÓN
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y aceros fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

2.3.3.4.1. DUREZA VICKERS

El ensayo Vickers es una prueba de microdureza en la cual se utiliza un indentador piramidal de diamante, este ensayo consiste en realizar una indentación sobre la superficie y medir las diagonales de la huella, las cuales nos servirán para calcular el número de dureza Vickers, el cual está relacionado con la carga aplicada y el área de indentación. En la siguiente expresión se muestra la relación que existe entre la carga y las dimensiones de las diagonales para realizar el cálculo:

$$HV = 1.8544 * \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

Donde HV es el número de dureza Vickers, P es la carga aplicada en kgf y d es la diagonal promedio de la huella en mm para la cual es necesario medir las dos diagonales d1 y d2 las cuales se pueden apreciar en la siguiente figura.



a)

b)

Figura No. 9: a) Identación de dureza Vickers, b) Esquema del indentador para dureza Vickers (Clarke, 2014)

2.3.3.4.2. DUREZA ROCKWELL

La dureza Rockwell es un método de ensayo, que utiliza un indentador cónico esferoidal de diamante o una bola de acero endurecido dependiendo de la escala que se vaya a utilizar, este indentador realiza una huella en la superficie, la cual nos permitirá determinar la dureza Rockwell.

El método Rockwell aunque es un método de indentación no pretende medir de manera directa la dureza a través de los esfuerzos de contacto, sino que

es una relación inversamente proporcional a la penetración del indentador y cuya relación se ve a continuación:

Para el cono de diamante:

$$HR = 100 - \frac{h}{0.002} \quad (3)$$

Para las bolas de acero:

$$HR = 130 - \frac{h}{0.002} \quad (4)$$

Donde:

HR: Dureza Rockwell

h: Profundidad de indentación

Además también se debe de tomar en cuenta que el método Rockwell posee diferentes escalas que pueden ser utilizadas dependiendo del material a ensayar los cuales están regidos por la norma ASTM E18-03, y que se encuentran en la Tabla No. 6.

2.3.4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos o NDT son pruebas practicadas a los materiales que no alteran permanentemente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y dimensionales. Entre los más usados se destacan los siguientes:

- Ensayo de Tintas Penetrantes (QW-195)
- Inspección Visual (QW-194)

- Rayos X (QW-191.1)
- Ultrasonido (QW-191.2)

2.3.4.1. ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES

El método de tintas penetrantes es uno de los ensayos NDT más utilizados en la actualidad, sin embargo este ensayo solo sirve para identificar discontinuidades superficiales y sub-superficiales. Existen dos tipos de tintas penetrantes que son:

- Tintas penetrantes fluorescentes: utiliza una luz ultravioleta para identificar las indicaciones.
- Tintas penetrantes no fluorescentes: posee un colorante de alto contraste bajo luz blanca.

Para realizar el ensayo de tintas penetrantes es necesario poseer el kit para utilizarlo que consta de:

- Limpiador: es un disolvente o agua, que se utiliza para limpiar la superficie antes y después de aplicarse el penetrante.
- Penetrante: es el líquido que penetra en las discontinuidades gracias a su gran capilaridad.
- Revelador: este puede ser acuoso, no acuoso o seco, y es el encargado de revelar el líquido penetrante que queda contenido en las discontinuidades.

Para la inspección se debe tomar en cuenta lo dictaminado en el código BPVC ASME Sección V en su artículo 6, y sobre todo tener en cuenta lo

indicado en T-640 y T-650 que tratan sobre la inspección y la evaluación respectivamente.

2.3.4.2. INSPECCIÓN VISUAL

Es una técnica que requiere una gran información sobre la pieza a ser inspeccionada para tener una acertada interpretación de las posibles indicaciones. Para realizarla es necesario poseer lentes de aumento de 5X y de 10X, además de poseer una fuente de luz que prevea de 1000 lux o 100 candelas como mínimo. Este ensayo se debe de realizar acorde a lo estipulado en el código BPVC ASME Sección V, en el artículo 9 en T-950 y T980 que indica la técnica a utilizar y la manera de evaluar respectivamente.

2.4. CUPON DE PRUEBA Y ESPECIMENES DE PRUEBAS

Para realizar los cupones para la calificación del procedimiento de soldadura es necesario identificar si se realizará en placa o en tubería, también es necesario identificar el espesor ya que dependiendo de estas condiciones del código BPVC ASME Sección IX nos remite a QW-463.1 que nos facilita el esquema de los distintos cupones los cuales son:

Descarte		esta pieza
Sección Reducida		Espécimen de tensión
Espécimen para		doble de raíz
Espécimen para		doble de raíz
Espécimen para		doble de raíz
Espécimen para		doble de raíz
Sección Reducida		Espécimen de tensión
Descarte		esta pieza

a)

Descarte		esta pieza
Espécimen para		doble lateral
Espécimen de tensión para		sección Reducida
Espécimen para		doble lateral
Espécimen para		doble lateral
Espécimen de tensión para		sección Reducida
Espécimen para		doble lateral
Descarte		esta pieza

b)

Figura No. 10: a) Cupón de prueba para espesores inferiores a 19 mm para calificación de proceso de soldadura según QW-463.1 (a), b) Cupón de prueba para espesores mayores a 19 mm para calificación de proceso de soldadura según QW-463.1 (b). (The Amercias Society of Mechanical Engineers, 2013)

De estos cupones de pruebas se extraen los distintos especímenes para realizar los diversos ensayos para calificar los procedimientos, la cantidad de especímenes y las dimensiones de estos está dado por la tabla QW-451.1 “GROVE-WELD TENSION TEST AND TRANSVERSAL-BEND TEST” (Ensayo de tracción y doblado lateral de soldaduras de ranura) y QW-462 “TEST SPECIMENS” (Probetas de ensayos) respectivamente.

Sin embargo, también se pueden realizar otros ensayos tales como el ensayo de impacto o también una macro y micrografía, por lo que los esquemas propuestos por el código BPVC ASME Sección IX pueden verse modificados según los especímenes que se requieran realizar y las dimensiones de estos estarán sometidas a las normas a las cuales nos remita ASME Sección IX.

2.5. TRATAMIENTOS TERMICOS POSTSOLDADURA

La mayoría de tratamientos térmicos postsoldadura son subcríticos (cuando la temperatura es inferior a la temperatura crítica A_{c1}) y no de recristalización alotrópica (alcanza temperaturas superiores a la crítica) (Laufgang, 2006). Los tratamientos térmicos postsoldadura pueden ser divididos en dos tipos dependiendo de la función que tenga el mismo los cuales son de distensionado si se quiere disminuir la tensiones residuales, o de revenido si se quiere disminuir la dureza producida esencialmente por estructuras martensíticas.

2.5.1. DISTENSIONADO

Este tratamiento térmico es utilizado para relevar las tensiones residuales que pueden haber quedado por cauda de la soldadura, para realizar el distensionado se debe llegar a una temperatura y mantenerla por un determinado tiempo no mayor a A_{c1} la cual para aceros ferríticos de baja aleación esta entre los 595°C y los 675°C y para aceros de alta aleación puede llegar a los 1000°C aunque la mayoría no pasa de los 760°C , después se procede a un enfriamiento controlado.

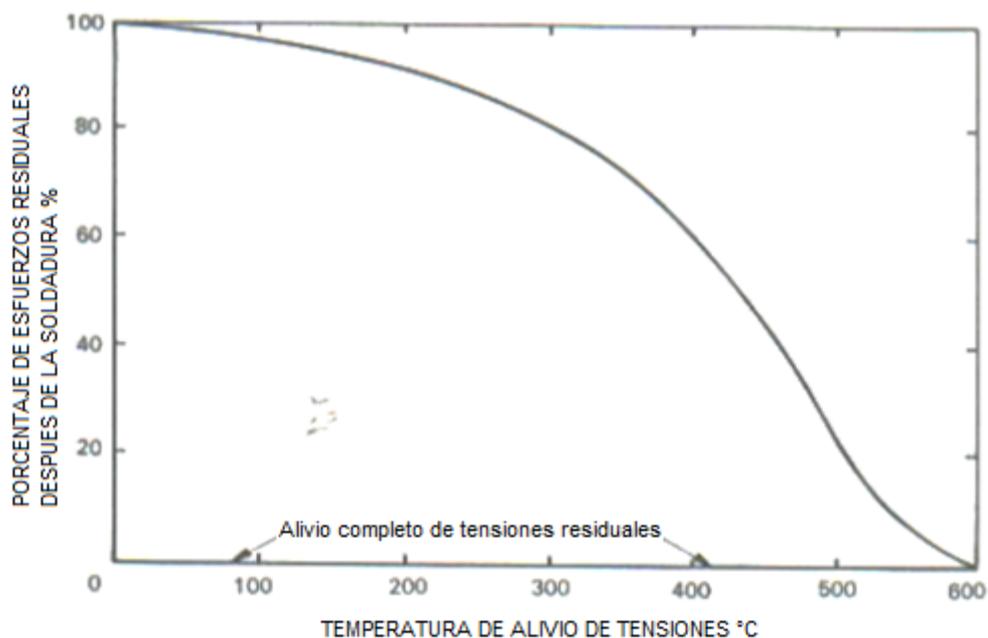


Figura No. 11: Disminución de las tensiones residuales con la temperatura de tratamiento térmico.

(Laufgang, 2006)

2.5.2. REVENIDO

El revenido consiste en calentar el acero a una temperatura comprendida entre la temperatura ambiente y A_{c1} y mantenerla a esa temperatura, para después realizar un enfriamiento apropiado. En general el revenido conduce a una disminución de la dureza y a un aumento de la tenacidad de la ZAT. El revenido es función tanto de la temperatura como del tiempo, ya que a mayor tiempo mayor será la disminución de la dureza. Para aceros aleados con cromo y molibdeno debido a su resistencia a altas temperatura se aconseja realizar el revenido a temperaturas mayores a 720°C - 760°C .

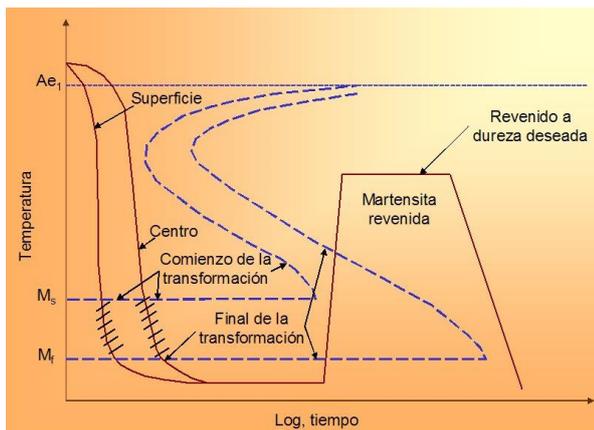


Figura No. 12: Esquema de un proceso de temple y revenido en un diagrama TTT.

(Universidad Politécnica de Valencia, 2014)

2.6. METALURGIA DE LA SOLDADURA

2.6.1. ZONA AFECTADA TERMICAMENTE

La metalografía que tiene lugar en una soldadura difiere en lo que se obtiene en una pieza fundida ya que en la soldadura el material fundido se solidifica en cuestión de algunos segundos, la temperatura de la fuente de calor y el material fundido exceden a la que existe en los hornos de fusión.

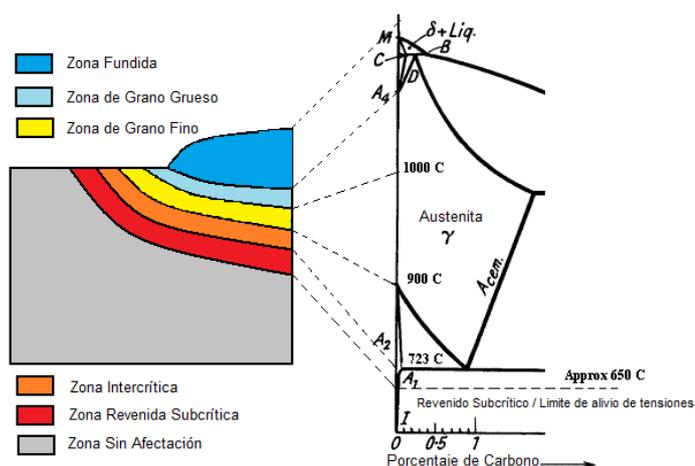


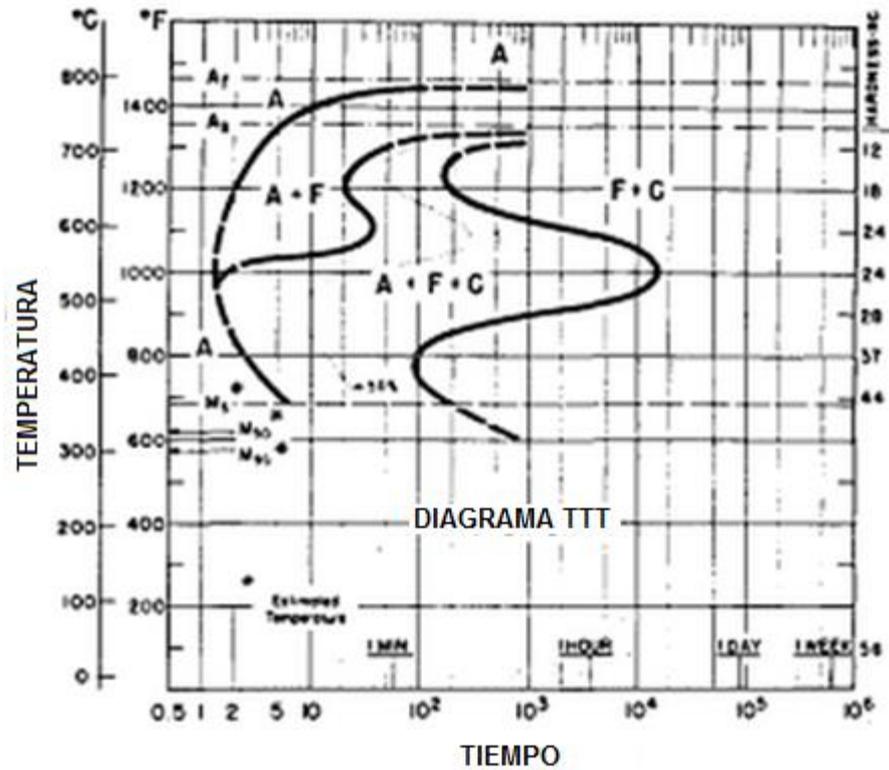
Figura No. 13: Diagrama de Hierro-Carbono mostrando las fases de transición de la ZAT en la soldadura.

(Welding Technology Institute of Australia, 2006)

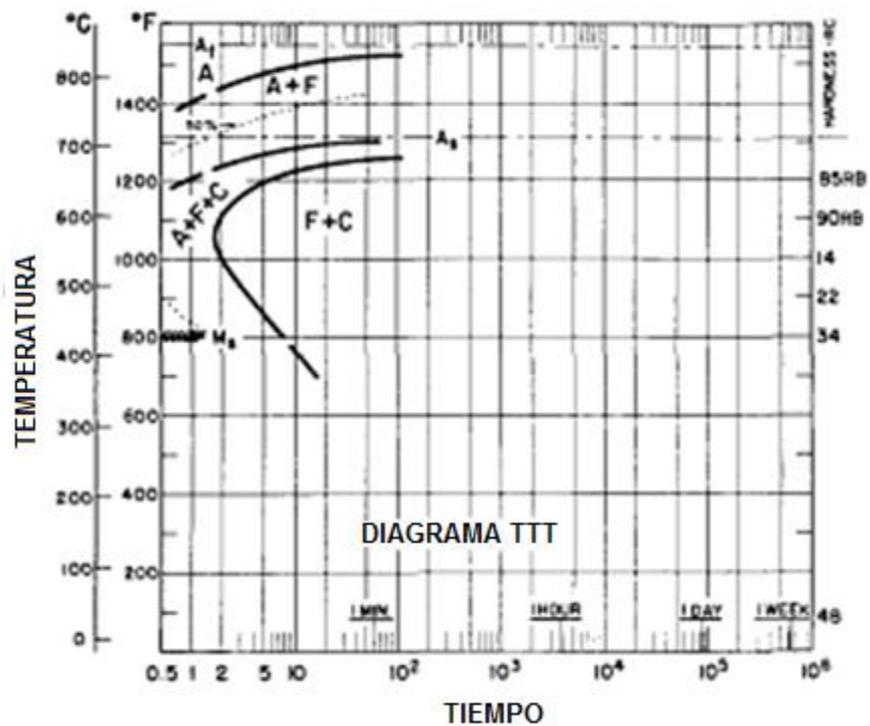
Debido a la aportación de calor y al enfriamiento rápido el material base adyacente a la soldadura recibe el nombre de Zona Afectada Térmicamente o también conocida como ZAT. En esta zona se presentan alteraciones (Ver en la Figura No. 13) que dependen del tipo de material, precalentamiento y poscalentamiento. Adyacente al material depositado se encuentra la zona de grano grueso la cual se forma al alcanzar temperaturas mayores a los 1000°C pero menores a la temperatura de fusión, a lado de esta zona se encuentra la zona de grano fino que se forma debido a que el calentamiento no es el suficientemente largo para producir entrecrecimiento entre los granos austeníticos, aledaña a esta zona se encuentra la zona intercrítica la cual se caracteriza por la descomposición de la perlita en granos más finos. La zona que se encuentra entre la ZAT y el material base se denomina como zona revenida subcrítica, que se caracteriza por la recuperación de los granos deformados.

2.6.2. APLICACIÓN DEL DIAGRAMA TTT EN LA SOLDADURA

Los diagramas TTT son representaciones gráficas que relacionan el tiempo, la temperatura y la transformación de la microestructura de un acero, dicho diagrama puede alterarse dependiendo de los aleantes del acero. En la soldadura de los aceros es importante que en las transformaciones producidas por el proceso de soldadura se obtengan estructuras perlíticas o bainíticas completas, tratando de evitar la presencia de martensita, para lo cual se utiliza diagramas TTT para poder predecir las estructuras metalográficas en base al calor aportado y a la velocidad de enfriamiento de la junta soldada.



a)



b)

Figura No. 14: a) Diagrama TTT del acero AISI 4130, b) Diagrama TTT del acero AISI 1021.

(Steel Founders Society of America and ASM International, 1995)

En la Figura No. 14 a) consta el diagrama TTT del acero AISI 4130 en el cual se observa que el temple se puede producir por un enfriamiento moderado lo cual indica que este acero puede templarse fácilmente debido a los elementos de aleación. Por otro lado en la Figura No. 14 b) se aprecia el diagrama TTT del acero AISI 1021 el cual posee una baja capacidad de templabilidad ya que para realizar el temple se necesita un enfriamiento muy rápido. A fin de evitar problemas de fragilidad obtenidas por el temple se somete al acero a un PWHT el cual es un tratamiento de revenido que va acompañado de una pérdida de dureza.

2.7. SOLDADURA DE REVENIDO

La técnica de soldadura de revenido fue creada inicialmente para aceros que poseían Cr-Mo-V, para evitar el agrietamiento producido por el recalentamiento del material. Lo que busca la técnica es aprovechar el calor aportado entre pases sucesivos para obtener una estructura metalográfica adecuada en la ZAT, el pase de revenido, se puede definir como un cordón de soldadura que es traslapado a un pase anterior con el fin de afectar la ZAT del cordón previamente depositado (Pilgarín, 2009).

Para poder aplicar la técnica adecuadamente es necesario tener en cuenta algunos aspectos tales como:

- Geometría del depósito de soldadura y secuencia de cordones (Ver Figura No. 13).
- Adecuado traslape entre cordones.

- Control adecuado del aporte térmico (voltaje, amperaje, velocidad de avance)

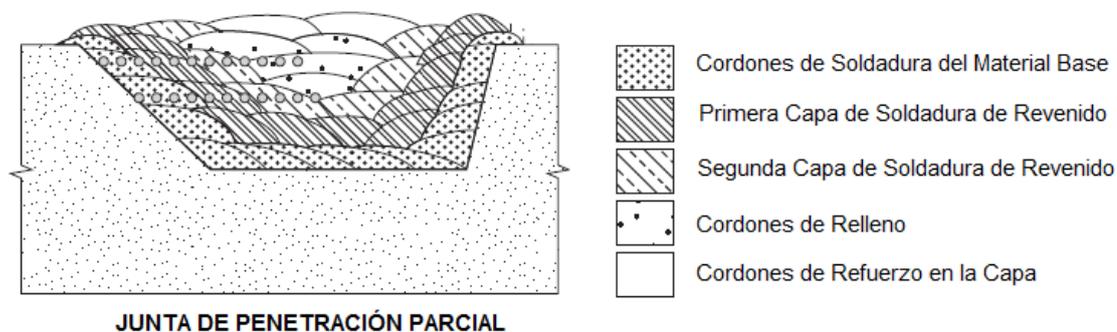


Figura No. 15: Distribución de cordones en una junta de penetración parcial QW-462.12.

(The Americas Society of Mechanical Engineers, 2013)

2.7.1. ZONA AFECTADA TERMICAMENTE POR LA SOLDADURA DE REVENIDO

El análisis de la ZAT presente en la técnica de soldadura de revenido se centra en la temperatura de recalentamiento que alcanza, lo cual modifica de distintas maneras la ZAT. El recalentamiento producido genera la formación de:

- Zona de grano grueso recalentada subcrítica por debajo de AC1 (Línea de Transformación a perlita) o SCGC (Subcritically reheated grain-coarsened).
- Zona de grano grueso recalentada intercrítica entre AC1 y AC3 (Línea de Transformación a ferrita) o ICGC (Intercritically reheated grain-coarsened).

- Zona de grano normalizado o SCGR (Subcritically reheated grain-refined).
- Zona de grano grueso recalentado o UAGC (Unaltered grain-coarsened).

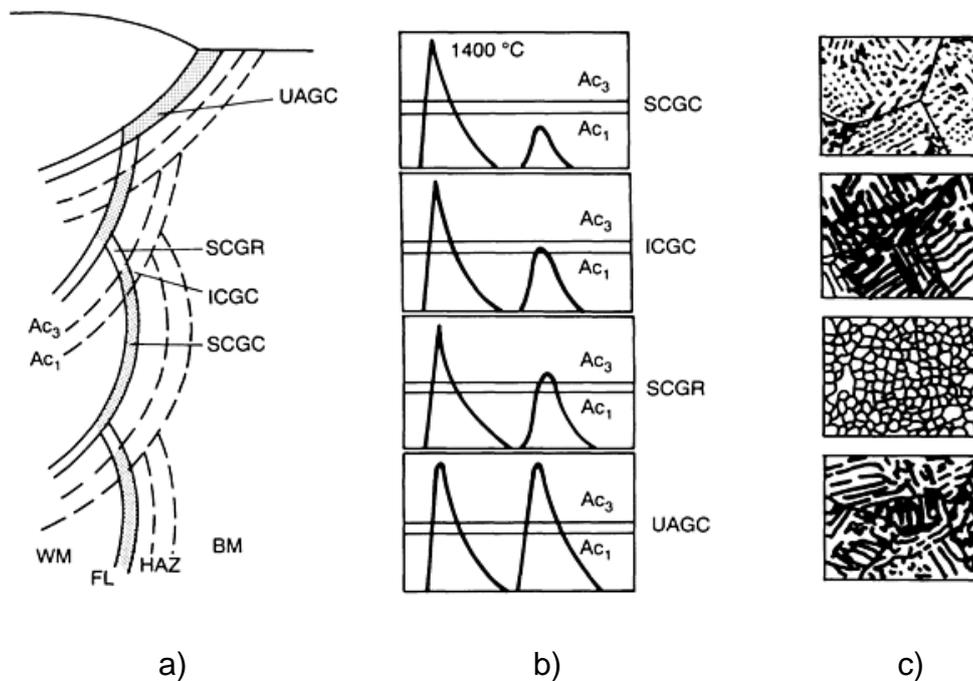


Figura No. 16: a) Ubicación de las sub zonas, b) Ciclo térmico de cada sub zona, c) Microestructura de cada zona.
(ASM International, 1993)

CAPITULO III

DISEÑO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA DE PRUEBA

3.1. DISEÑO DE LOS WPS DE PRUEBA

Para realizar un estudio más completo se ve la necesidad de analizar tres alternativas diferentes las cuales difieren en el aporte de calor ya que este es el parámetro fundamental en el que se basa la soldadura por revenido, las cuales van a ser de 5KJ/cm para el primer procedimiento, 6KJ/cm para el segundo procedimiento y 7KJ/cm para el cuarto procedimiento, sin embargo es necesario comparar los resultados con el procedimiento actual que se utiliza en la industria petrolera el cual posee una entrada de calor de 16 KJ/cm.

3.2. DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDADURA

Para el diseño del cupón de soldadura que será utilizado para la calificación del procedimiento se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Tipo de junta
- Tipo de soldadura
- Dimensiones de la junta
- Dimensiones de especímenes
- Ubicación de los especímenes en el cupón de soldadura y dimensiones finales del mismo.

En QW-250 indica que el dimensionamiento y la geometría no son variables esenciales, por lo que se seleccionará la más adecuada teniendo en cuenta los costos y tiempos de producción.

3.2.1. TIPO DE JUNTA

Existen diversos tipos de junta que consideran la forma en que se unen los miembros de la junta soldada los cuales son junta a tope, junta a esquina, junta traslapada, junta de borde y junta en T las cuales se muestran en la Figura No.17.

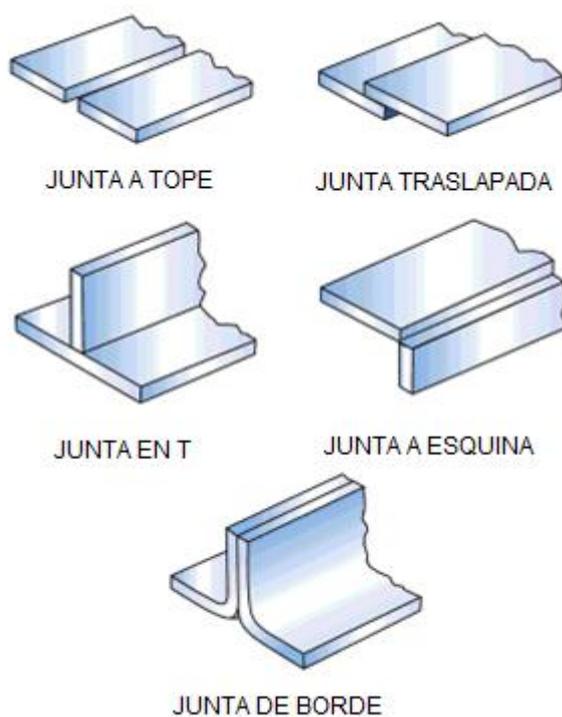


Figura No. 17: Tipos de Juntas.
(Jeffus, 2009)

3.2.1.1. JUNTA A TOPE

La junta a tope es el tipo de junta más simple ya que se utiliza para unir dos objetos que reposan en el mismo plano.

3.2.1.2. JUNTA A ESQUINA

Son juntas que se utilizan para unir dos objetos con un ángulo de 90° uniendo sus bordes.

3.2.1.3. JUNTA TRASLAPADA

También conocidas como juntas solapadas, se usan para superponer o traslapar dos piezas.

3.2.1.4. JUNTA DE BORDE

Es la unión de dos superficies adyacentes de cada pieza de tal manera que la soldadura queda dentro de los planos superficiales de ambas piezas.

3.2.1.5. JUNTA EN T

Son juntas formadas por dos piezas que tiene la forma de T, además de un ángulo de 90° entre las piezas.

3.2.2. TIPO DE SOLDADURA

Los dos tipos de soldaduras más utilizadas son la de ranura y filete, sin embargo también se utilizan soldaduras de cordón, ordenada, de tapón y de muesca.

3.2.2.1. SOLDADURA DE FILETE

La soldadura de filete es utilizadas para unir dos piezas con un ángulo que generalmente es 90° , y la sección transversal casi siempre es un triángulo isósceles con un ángulo recto, por otro lado, es el tipo de soldadura más común en la industria metalmecánica y de la construcción.

3.2.2.2. SOLDADURA DE RANURA

La soldadura de ranura es utilizada para unir dos piezas mediante un surco o bisel el cual facilita la penetración del material de aporte, este surco o bisel posee varias geometrías y son nombradas de acuerdo a su forma las cuales se pueden observar en la Figura No. 18. Este tipo de juntas también se pueden clasificar de acuerdo a la penetración en juntas de penetración completa o CJP y juntas de penetración parcial o PJP.

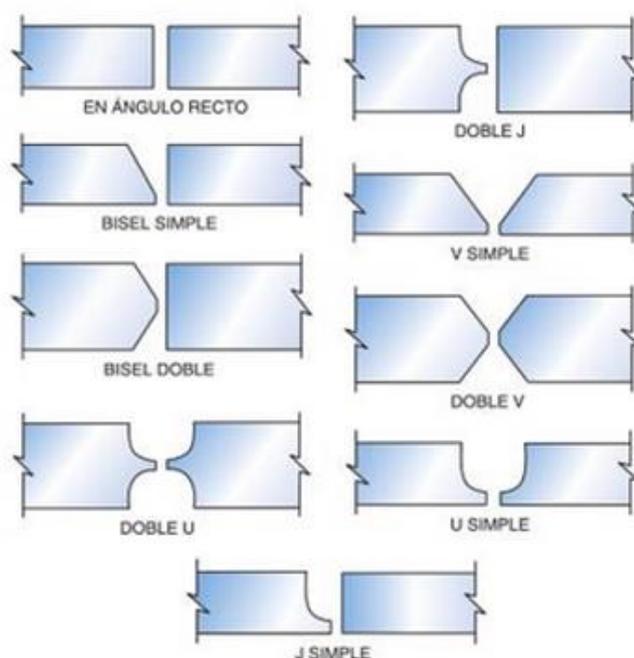


Figura No. 18: Tipos de bisles.

(Jeffus, 2009)

3.2.2.2.1. JUNTA DE PENETRACIÓN COMPLETA (CJP)

La junta de penetración completa penetra en todo el espesor de la junta, en este caso la garganta de la soldadura viene a ser el espesor de todo el material, o al ser el caso de unir dos materiales de distinto espesor la garganta viene a ser del mismo tamaño de la placa de menor espesor.

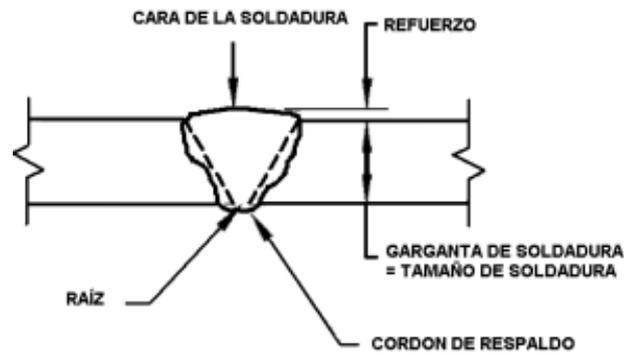


Figura No. 19: Junta CJP.

(Tupiza, 2011)

3.2.2.2. JUNTA DE PENETRACIÓN PARCIAL (PJP)

Este tipo de soldadura no penetra en todo el espesor del material, por lo que lleva el nombre de soldadura de ranura de penetración parcial.

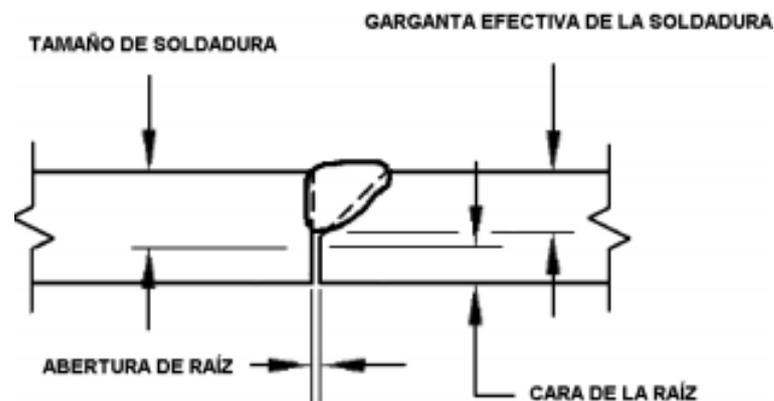


Figura No. 20: Junta PJP.

(Tupiza, 2011)

3.2.3. SELECCIÓN DE LA JUNTA

Para realizar la selección de la junta se debe tener en consideración que esta servirá para soldar espesores superiores a 25 mm, por lo cual se ve la necesidad de seleccionar una junta que sirva para este propósito, además se debe tener en cuenta que realizar una junta CJP es muy costosa debido al

material y al tiempo de ejecución de la misma, por lo cual es necesario la realización de una junta PJP.

3.2.4. DIMENSIONES DE LA JUNTA

Para el diseño de la geometría de la junta soldada hay que tomar en cuenta que elementos forman la junta los cuales están identificados en la Figura No. 21.

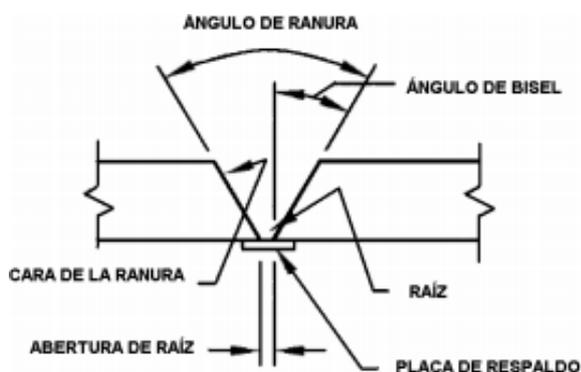


Figura No. 21: Partes del bisel.
(Tupiza, 2011)

Hay que tomar en cuenta que un ángulo de ranura más delgado implica menos material depositado y además tiempos de producción más cortos, sin embargo si este ángulo es muy pequeño no habrá espacio suficiente para manipular el electrodo. La abertura de raíz tiene que ser lo suficientemente ancha para permitir oscilar al soldador. Debido a esto las dimensiones para la junta soldada quedarán establecidas de la forma que indica la Figura No. 22.

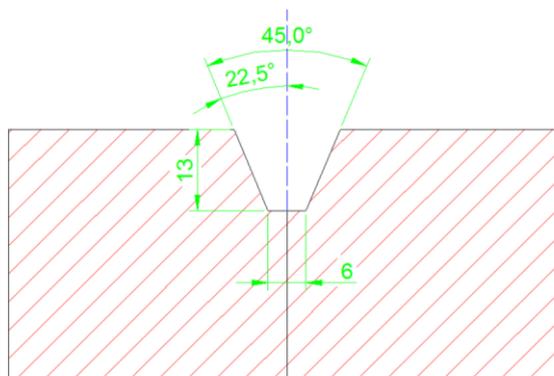


Figura No. 22: Geometría de la Junta

3.2.5. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES

Para determinar las dimensiones finales del cupón de soldadura primero es indispensable determinar el número de ensayos a efectuarse lo que depende del espesor del cupón el cual será de 40 mm y cuya elección se describirá posteriormente.

En el código BPVC ASME Sección IX en QW-451.1 para espesores entre 38 a 150 mm es necesario realizar 2 especímenes para ensayo a tracción y ensayos de doblado cuya ubicación de extracción se encuentra en QW-463.1 (b), sin embargo, para garantizar todas las propiedades mecánicas del WPS se requiere realizar ensayo de dureza, impacto y metalografías El número de ensayos totales a realizar se encuentran resumidos en la Tabla No.7.

Tabla No. 7: Número de Ensayos

ENSAYO	NÚMERO DE PROBETAS
Tracción	2
Doblado lateral	4
Impacto	4
Dureza	4
Metalografías	4

3.2.5.1. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE TRACCIÓN

Para determinar las dimensiones de los especímenes utilizados en el ensayo de tracción hay que remitirse a QW-462. En la Figura No. 23 se muestra un esquema del espécimen donde “T” representa al espesor de la muestra sin el refuerzo, “y” el espesor de espécimen, “x” el espesor de la muestra con el refuerzo y “W” es el ancho de espécimen el cual es igual a 19 mm.

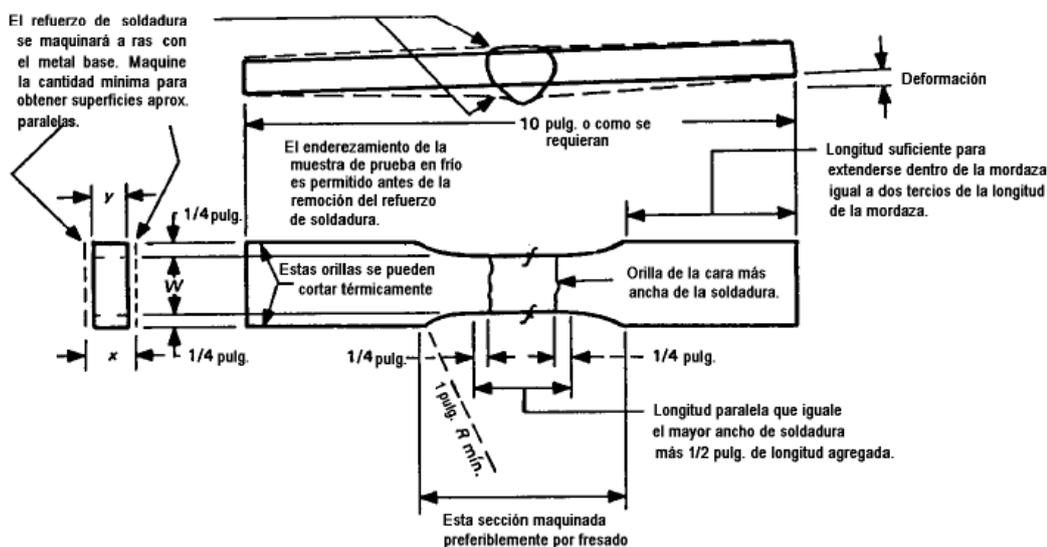


Figura No. 23: QW-461.2(a) Especímen de sección reducida de plancha. (The Americas Society of Mechanical Engineers, 2013)

Tomando esto en consideración y acoplándolo a las dimensiones de la junta soldada las dimensiones finales del espécimen se encuentran detalladas en la Figura No. 24.

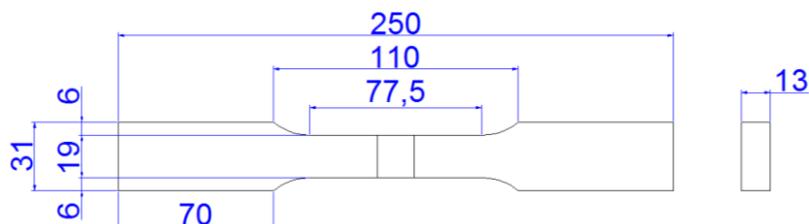
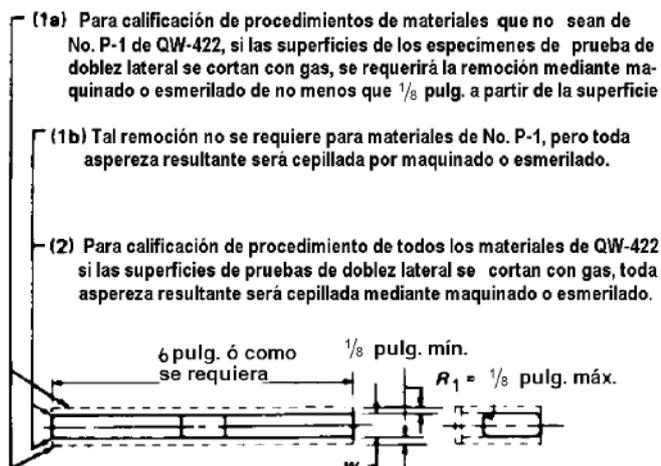


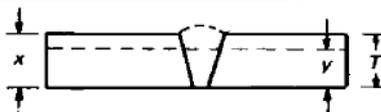
Figura No. 24: Dimensiones de espécimen a tracción (mm).

3.2.5.2. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE DOBLADO LATERAL

Para las dimensiones de los especímenes de doblado lateral debemos tomar como referencia QW-462.2 que se encuentra ilustrada en la Figura No.25.



T , pulg.	y , pulg.	w (pulg.)	
		P-No. 23, F-No. 23, ó P-No. 35	Todos los otros metales
$\frac{3}{8}$ a $1\frac{1}{2}$, incl.	T	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$
$> 1\frac{1}{2}$	[Nota (1)]	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$



NOTA GENERAL:

El refuerzo de soldadura y la tira de respaldo o el anillo de respaldo, si existe, pueden ser removidos a ras con la superficie del espécimen. Se puede emplear corte térmico, maquinado, o esmerilado. El enderezamiento en frío es permitido antes de la remoción del refuerzo.

NOTA:

- (1) Cuando el espesor del espécimen T excede de $1\frac{1}{2}$ pulg., use uno de los siguientes:
- Corte el espécimen en múltiples especímenes de prueba y de aproximadamente iguales dimensiones ($\frac{3}{4}$ pulg. a $1\frac{1}{2}$ pulg.).
 y = espesor de espécimen probado cuando se toman múltiples especímenes de una muestra
 - El espécimen se puede doblar al ancho pleno. Vea requerimientos sobre ancho del dispositivo en QW-466.1.

Figura No. 25: QW-462.2 Especímen de doblado lateral.
(The Amercias Society of Mechanical Engineers, 2013)

De igual manera que las probetas de ensayo a tracción las dimensiones de la probeta de doblado lateral deben acoplarse a las dimensiones de la junta obteniendo como resultado las probetas ilustradas en la Figura No.26.

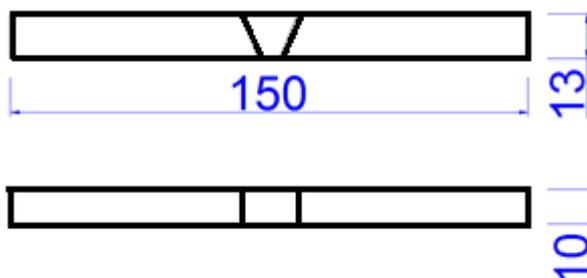


Figura No. 26: Dimensiones de espécimen a tracción (mm).

3.2.5.3. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE IMPACTO

Por otro lado para el dimensionamiento de las probetas de impacto es necesario remitirse a la Norma ASTM E23 teniendo en cuenta que se deber realizar la probeta tipo A también conocida como V-Notch.

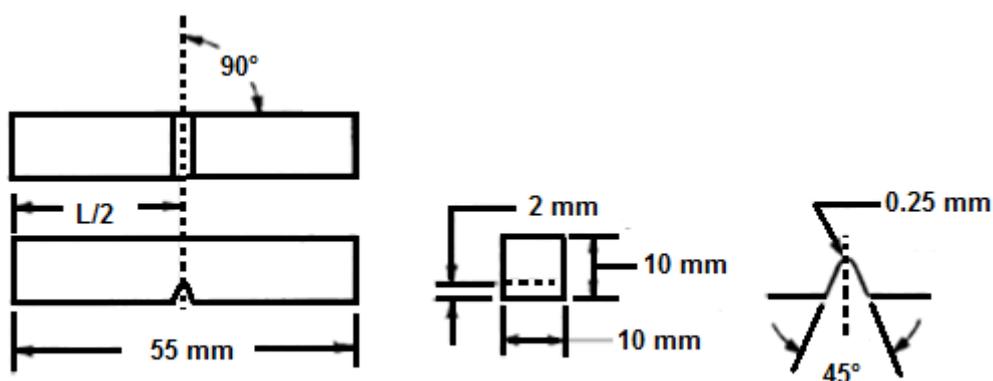


Figura No. 27: Especimen de Impacto.
(American Society for Testing Materials, 1995)

Lo más importante en este ensayo es la ubicación de donde se extraerá la probeta la cual se encuentra en la Figura No.28, la probeta debe ser extraída de tal manera que la ZAT se encuentre en la zona de la muesca de la soldadura, ya que esta será la más frágil.

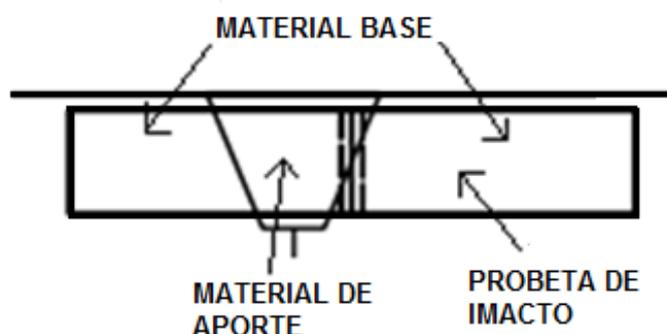


Figura No. 28: Ubicación del espécimen de impacto.

3.2.5.4. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE DUREZA Y METALOGRAFÍAS

Las probetas utilizadas para los especímenes de durezas y metalografías serán las mismas ya que se utilizará las indentaciones de dureza para analizar las zonas aledañas con los valores más altos de dureza. Para las dimensiones de estas probetas se tendrá en cuenta que estas abarquen toda la ZAT y parte del material base para su análisis. Las dimensiones de estas probetas se pueden apreciar en la Figura No.29.

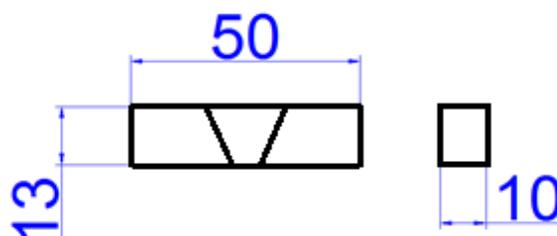


Figura No. 29: Dimensionamiento de probetas de dureza/metalografías.

3.2.6. UBICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES EN EL CUPÓN DE SOLDADURA Y DIMENSIONES FINALES DEL MISMO

En la Figura No.10 podemos observar la ubicación de los especímenes para las pruebas según el código BPVC ASME Sección IX, sin embargo, este no contempla probetas de impacto ni de dureza/metalografía, por lo tanto la ubicación de estos especímenes se observa en la Figura No.28. Las dimensiones más detalladas del cupón de soldadura se encuentran en el ANEXO 2.

DESCARTAR	DESCARTAR
PROBETA	DOBLADO LATERAL
PROBETA	DUREZA
PROBETA	SECCIÓN REDUCIDA
PROBETA	DOBLADO LATERAL
PROBETA	DUREZA
PROBETA	IMPACTO
PROBETA	DUREZA
PROBETA	DOBLADO LATERAL
PROBETA	SECCIÓN REDUCIDA
PROBETA	DUREZA
PROBETA	DOBLADO LATERAL
DESCARTAR	DESCARTAR

Figura No. 30: Ubicación de especímenes.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS WPS's

Para el desarrollo del WPS se tendrá en cuenta los tiempos de producción, ya que será utilizado para la misma por lo que no tendrá que perjudicar en los tiempos. Además es necesario determinar los parámetros adecuados de soldeo para obtener las mejores propiedades mecánicas por lo que se

desarrollará tres WPS los cuales variarán en el aporte de calor, estando éste relacionado con las velocidades de soldeo. También se comparará con el método de soldadura actualmente utilizado en las empresas.

Para diferenciar a los distintos procesos de soldadura a utilizarse se los denominara de la siguiente manera:

- S01: procedimiento de soldadura con proceso SMAW que tendrá un aporte de calor de 5 KJ/cm.
- S02: procedimiento de soldadura con proceso SMAW que tendrá un aporte de calor de 6 KJ/cm.
- S03: procedimiento actual utilizado por las empresas ecuatorinas que tendrá un aporte de calor de 16 KJ/cm.
- S04: procedimiento de soldadura con proceso SMAW que tendrá un aporte de calor de 7 KJ/cm.

3.4. VARIABLES DEL PROCESO DE SOLDADURA BAJO CÓDIGO BPVC ASME SECCIÓN IX

Para diseñar un procedimiento de soldadura acorde a lo establecido en el código BPVC ASME Sección IX hay que delimitar las variables, tanto esenciales como no esenciales y suplementarias las cuales para la soldadura de revenido están decretadas en QW-290.4.

Tabla No. 8: Variables para la calificación de la soldadura de revenido.
(The Amercias Society of Mechanical Engineers, 2013)

Párrafo	Resumen de Variables	Prueba de Durezas Variables Esenciales	Prueba de Impacto Variables Esenciales	Variables No Esenciales
QW-402	.23 + Fluido de respaldo	X		
	.24 + Fluido de respaldo		X	
QW-403	.25 \emptyset P-No. Or Gr. No		X	
	.26 > Carbono Equivalente	X		
	.27 > T	X		
QW-404	.51 Almacenamiento			X
	.52 Hidrogeno Difusible			X
QW-406	.8 > Temperatura entre pases		X	
	.9 < Temperatura de precalentamiento	X		
	.10 Tiempo de precalentamiento			X
	.11 Poscalentamiento al horno			X
QW-408	.24 Mezcla de Gases			X
QW-409	.29 \emptyset Entrada de Calor	X	X	
QW-410	.10 \emptyset Electrodo único a múltiple	X	X	
	.58 - Superficie de cordones de revenido	X	X	
	.59 \emptyset Tipo de soldadura	X	X	
	.60 + Preparación Térmica	X	X	
	.61 Ubicación de los cordones de revenido	X	X	
	.62 Método de remoción de los cordones de revenido			X
	.63 Traslapado de cordones	X	X	
	.65 \pm Maquinado	X	X	

Leyenda

- + Adición > Aumento / mayor que
 - Eliminación < Decremento / menor que
 \emptyset Cambio

Además de las variables también hay que tener en cuenta las restricciones que el código tiene respecto al proceso ya que solo se limita a la utilización del proceso SMAW, GTAW, SAW, GMAW (incluyendo FCAW) y PAW.

Como se puede apreciar en la Tabla No. 8 se debe tener en cuenta bajo que parámetros se debe calificar el procedimiento ya que se lo puede hacer con pruebas de durezas o con pruebas de impacto, dependiendo de esto las variables esenciales cambian, sin embargo las variables no esenciales se mantienen para los dos casos. Para el procedimiento a realizarse se aplicará las variables esenciales para calificar con pruebas de dureza, ya que en este caso debemos atenernos a los valor máximos que la norma NACE MR 0175 establece, los cuales serán analizados más adelante.

3.4.1. VARIABLES ESENCIALES

Las variables esenciales son aquellas en las cuales un cambio puede afectar a las propiedades mecánicas de la pieza soldada y por lo tanto deben estar descritas claramente en el WPS.

Para el WPS a calificar se analizarán las variables esenciales delimitadas en QW-290.4 para pruebas de dureza.

3.4.1.1. CARBONO EQUIVALENTE

Para realizar el procedimiento de soldadura una limitante es el carbono equivalente que se posee en el material base, en este caso el AISI 4130 el cual se tendrá que calcular con la fórmula descrita en QW-403.26, sin embargo para que el procedimiento de soldadura pueda ser utilizado con la mayor cantidad de materiales posibles se utilizará también la composición química otorgada por la Especificación API 6A la cual se muestra en la Tabla No. 9.

Tabla No. 9: Límites de la composición química según API 6A.

(American Petroleum Institute API 6A, 2004)

Aleantes	Acero al Carbono y de Baja Aleación
Carbón	0,45 máx.
Manganeso	1,80 máx.
Azufre	1,00 máx.
Níquel	1,00 máx.
Cromo	2,75 máx.
Molibdeno	1,50 máx.
Vanadio	0,30 máx.

Al utilizar la ecuación (1) con el AISI 4130 (cuya composición química se corrobora con el MTR del material Ver ANEXO 13) y las especificaciones de

la composición química de los materiales según la especificación API 6A se obtiene:

Tabla No. 10: Carbono Equivalente del AISI 4130 y Especificación API

6A.

Aleante	AISI 4130	Material API 6A
C	0,33%	0,45%
Mn	0,6%	1,8%
Cr	1,1%	2,75%
Mo	0,25%	1,5%
V	0%	0,3%
Ni	0%	1%
Cu	0%	0%
CE %	0,7%	1,73%
CE %: Carbono Equivalente		

Al comparar los resultados del carbono equivalente presente en el AISI 4130 y la composición química del material de la especificación API 6A se observa que el segundo posee mayor carbono equivalente con un 1.73%, por lo cual el diseño del WPS se realizará con este valor.

3.4.1.2. ESPESOR T

Debido a que existe una gran cantidad de espesores para soldar en campo es necesario realizar un WPS que abarque la mayor cantidad de espesores para lo cual hay que remitirse a QW-451.1 donde se presentan los distintos rangos de espesores que se puede soldar si se selecciona un espesor para el cupón de pruebas.

**Tabla No. 11: Límites de espesores para calificación de procedimiento
y especímenes de pruebas QW-451.1.**

(The Amercias Society of Mechanical Engineers, 2013)

Espesor T de Muestra de Prueba Soldadura, pulg.	Orden de Espesor T de Metal Base Calificado, pulg. [Nota (1)]		Espesor t de Metal de Soldadura Depositado Calificado, pulg. [Nota (1)]	
	Min.	Máx.	Máx.	
Menos de $\frac{1}{16}$	T	$2T$	$2t$	
$\frac{1}{16}$ a $\frac{3}{8}$, incl.	$\frac{1}{16}$	$2T$	$2t$	
Arriba de $\frac{3}{8}$, pero menos de $\frac{3}{4}$	$\frac{3}{16}$	$2T$	$2t$	
$\frac{3}{4}$ hasta menos de $1 \frac{1}{2}$	$\frac{3}{16}$	$2T$	$2t$ cuando $t < \frac{3}{4}$	
$\frac{3}{4}$ hasta menos de $1 \frac{1}{2}$	$\frac{3}{16}$	$2T$	$2T$ cuando $t \geq \frac{3}{4}$	
$1 \frac{1}{2}$ y más	$\frac{3}{16}$	8 (2)	$2t$ cuando $t < \frac{3}{4}$	
$1 \frac{1}{2}$ y más	$\frac{3}{16}$	8 (2)	8 (2) cuando $t \geq \frac{3}{4}$	

Espesor T de Muestra de Prueba Soldadura, pulg.	Tipo y Número de Pruebas Requeridas Pruebas de Tensión y de Doblez Guiado [Nota (4)]			
	Tensión QW-150	Doblez Lateral QW-160	Doblez de Cara QW-160	Doblez de Raíz QW-160
Menos de $\frac{1}{16}$	2	...	2	2
$\frac{1}{16}$ a $\frac{3}{8}$, incl.	2	Nota (3)	2	2
Arriba de $\frac{3}{8}$, pero menos de $\frac{3}{4}$	2	Nota (3)	2	2
$\frac{3}{4}$ hasta menos de $1 \frac{1}{2}$	2 (5)	4
$\frac{3}{4}$ hasta menos de $1 \frac{1}{2}$	2 (5)	4
$1 \frac{1}{2}$ y más	2 (5)	4
$1 \frac{1}{2}$ y más	2 (5)	4

Ya que se desea abarcar una gran cantidad de espesores sin tener que realizar la calificación del procedimiento en espesores excesivos se seleccionará el espesor de prueba de 40 mm el cual nos faculta a soldar espesores desde los 5 mm de espesor hasta espesores de 200 mm con una aportación de material de hasta 26 mm ya que el bisel tendrá una profundidad de 13 mm.

3.4.1.3. TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

En el WPS es necesario especificar la temperatura mínima de precalentamiento y ésta debe ser controlada paulatinamente. Para elección de la misma se tomara en cuenta la recomendación de Handbook de la ASM volumen 6, la cual nos brinda la siguiente tabla.

**Tabla No. 12: Precalentamiento y temperatura entre pases
dependiendo del espesor.
(ASM International, 1993)**

	AT ≤ 13 MM ($\leq \frac{1}{2}$ IN.)		AT 13-25 MM ($\frac{1}{2}$ -1 IN.)		AT 25-50 MM (1-2 IN.)	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
1330	175-230	350-450	205-260	400-500	230-290	450-550
1340	205-260	400-500	260-315	500-600	315-370	600-700
4023	[GES]40	[GES]100	95-150	200-300	120-170	250-350
4028	95-150	200-300	120-175	250-350	205-260	400-500
4047	205-260	400-500	230-290	450-550	260-315	500-600
4118	95-150	200-300	175-230	350-450	205-260	400-500
4130	150-205	300-400	205-260	400-500	230-290	450-550
4140	175-230	350-450	230-290	450-550	290-345	550-650
4150	205-260	400-500	260-315	500-600	315-370	600-700
4320	95-150	200-300	175-230	350-450	205-260	400-500
4340	290-345	550-650	315-370	600-700	315-370	600-700
4620	[GES]40	[GES]100	95-150	200-300	120-175	250-350
4640	175-230	350-450	205-260	400-500	230-290	450-550
5120	[GES]40	[GES]100	95-150	200-300	120-175	250-350
5145	205-260	400-500	230-290	450-550	260-315	500-600
8620	[GES]40	[GES]100	95-150	200-300	120-175	250-350
8630	95-150	200-300	120-175	250-350	175-230	350-450
8640	120-175	250-350	175-230	350-450	205-260	400-500

Podemos apreciar que para un acero 4130 con un espesor de 40 mm se puede utilizar un precalentamiento de 230°C-290°C, por lo cual se elegirá un valor promedio el cual será de 250°C.

3.4.1.4. ENTRADA DE CALOR

Como se mencionó con antelación la entrada de calor y el control de esta es muy importante para la aplicación de la técnica de soldadura de revenido caso contrario si no se hace un control adecuado la estructura metalográfica

obtenida no será la misma que la deseada pues no se lograra el efecto de revenido con la posibilidad de presencia de martensita.

La entrada de calor que se obtiene en un proceso de soldadura depende del voltaje, amperaje y la velocidad de avance, para lo cual el código BPVC ASME Sección IX en QW-409.1 nos brinda una expresión para calcularlo:

$$\text{Entrada de Calor} \left[\frac{J}{mm} \right] = \frac{\text{Voltaje [V]} * \text{Amperaje[A]} * 60}{\text{Velocidad de Avance} \left[\frac{mm}{min} \right]} \quad (5)$$

En base a estudios realizados previamente sobre la técnica de soldadura (Cleiton, 2009), se determina que la entrada de calor adecuada es de 5.2 a 5.3 KJ/cm, sin embargo se valorarán tres distintos procedimientos para seleccionar la mejor alternativa, los cuales fueron descritos al comienzo del capítulo.

3.4.1.5. ELECTRODO SIMPLE O MULTIPLE

El código BPVC ASME Sección IX en QW-410.10 indica que un cambio de electrodo simple a electrodo múltiple, o viceversa no se puede realizar. En el procedimiento a calificar la soldadura se realizará con electrodo simple, por lo que no será permitido utilizar múltiples electrodos después de calificado el WPS no será permitido.

3.4.1.6. TIPO DE PROCESO DE SOLDADURA

Según el código BPVC ASME Sección IX en QW-410.59 un cambio de maquina automática por un proceso manual no es permitido, sin embargo para este WPS la soldadura se realizará con proceso SMAW que es un procedimiento manual por lo cual QW-410.59 no aplica.

3.5. SELECCIÓN DEL ELECTRODO REVESTIDO

Para realizar la selección del electrodo es indispensable que este sea compatible químicamente al material base y además poseer similares propiedades mecánicas. Se utilizara el proceso SMAW por lo que es necesario la utilización de electrodos revestidos los cuales están bajo la norma AWS A5.5/A5.5M la cual es utilizada para electrodos para aceros de baja aleación.

3.5.1. ELECTRODOS BAJO NORMA AWS A5.5

Para realizar la elección del electrodo es indispensable distinguir la nomenclatura que este posee la cual se basa en una secuencia de letras y números los cuales indican características tales como:

- Resistencia mínima a la tracción
- Posiciones de soldeo
- Tipo de electrodo

E XX XX-X-HZ-R

La letra E indica que es un electrodo, el primer y segundo dígito da la mínima resistencia última que este posee el material depositado en Ksi, el tercer dígito hace referencia a la posición de soldadura en la que puede ser soldado y esta puede tomar los números indicados a continuación:

- 1: Todas las posiciones
- 2: Plana y horizontal
- 4: Todas las posiciones pero especialmente para vertical descendente.

El cuarto dígito hace referencia al tipo de electrodo el cual esta descrito a continuación.

Tabla No. 13: Tipo de electrodos
(Code BPVC Section II, Part C, 2007)

Última cifra	Tipo de corriente	Tipo de Revestimiento	Tipo de Arco	Penetración
E XXX0	DCEP	Orgánico (1)	Fuerte	Profunda (2)
E XXX1	CA ó DCEP	Orgánico	Fuerte	Profunda
E XXX2	CA ó DCEN	Rutilo	Mediano	Mediana
E XXX3	CA, DCEP O DCEN	Rutilo	Suave	Ligera
E XXX4	CA ó DCEP	Rutilo	Suave	Ligera
E XXX5	DCEP	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana
E XXX6	CA ó DCEP	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana
E XXX7	DCEP	Bajo Hidrógeno	Suave	Mediana
E XXX8	DCEP	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana

El quinto dígito determina la composición química del material de aporte la cual se encuentra descrita en la Tabla No.14.

Tabla No. 14: Composición química bajo la norma AWS A5.5
(Code BPVC Section II, Part C, 2007)

A1	0.5% Mo
B1	0.5% Cr, 0.5% Mo
B2	1.25% Cr, 0.5% Mo
B3	2.25% Cr, 1.0% Mo
B4	2.0% Cr, 0.5% Mo
B5	0.5% Cr, 1.0% Mo
C1	2.5% Ni
C2	3.25% Ni
C3	1.0% Ni, 0.35% Mo, 0.15% Cr
D1 y D2	0.25-0.45% Mo, 1.75% Mn
G(*)	0.5% mín. Ni, 0.3% mín. Cr, 0.2% mín Mo, 0.1% mín. V, 1.0% mín Mn

El símbolo HZ es la cantidad de hidrógeno difusible en mililitros por cada 100 gramos de material depositado y la Z puede tomar valores de 4, 8 y 16 ml por cada 100 gramos, y por último la letra R indica que el electrodo cumple

con los requisitos de la prueba de absorción de humedad relativa (Code BPVC Section II, Part C, 2007).

3.5.2. COMPATIBILIDAD DEL ELECTRODO Y DEL MATERIAL BASE

Para determinar la compatibilidad del electrodo primero se debe analizar la resistencia última a la tracción que posee el material base y para este caso el acero AISI 4130 entra en la designación 60K de la especificación API 6A la cual esta resumida en la Tabla No. 15.

Tabla No. 15: Propiedades de materiales estándar según especificación API 6A.

(American Petroleum Institute API 6A, 2004)

Designación del Material	0.2 Esfuerzo de Cedencia min. MPa (psi)	Esfuerzo Ultimo a la Tracción Min.	Elongación en 50 mm (2 in) Min. %	Reducción de área Min.
36K	248(36 000)	483(70 000)	21	No requiere
45K	310(45 000)	783(70 000)	19	32
60K	414(60 000)	586(85 000)	18	35
75K	517(75 000)	655(95 000)	17	35

Considerando que el material base posee una resistencia última a la tracción de 85 Ksi el electrodo seleccionado debe tener por lo menos esta resistencia lo que implica que seleccionar un electrodo E90XX.

Como el WPS será utilizado en la producción debe brindar las facilidades para producir cualquier tipo de junta en cualquier posición siendo necesario designar un electrodo E901X. Además se necesitará un electrodo con bajo contenido en hidrógeno para minimizar los efectos que este gas puede ocasionar en la soldadura motivo por lo cual se seleccionará un electrodo E9018.

Para la compatibilidad química se debe considerar tanto la composición química del material base y del material depositado como la norma NACE MR 0175 que en su anexo A indica que el porcentaje de níquel debe ser inferior al 1%, seleccionando de esta manera un electrodo E9018 B3, el cual cumple con las propiedades mecánicas y compatibilidad química necesaria para soldar el AISI 4130.

3.5.3. DIAMETRO DEL ELECTRODO

En general para la selección de electrodo se debe considerar un diámetro que aporte la cantidad necesaria de calor y además permita una sencilla manipulación para las diferentes posiciones de soldadura. Un electrodo más grande tiene la capacidad de soldar materiales más gruesos sin embargo se restringe a posición plana.

El aporte de calor depende directamente del amperaje, el voltaje y la velocidad de avance y estos parámetros son dependientes del diámetro del electrodo. Por otro lado la técnica de soldadura de revenido necesita cordones con una altura no mayor a los 3 mm y un espesor de 4 a 5 mm, además que el aporte térmico debe ser pequeño por lo cual es necesario un electrodo de 3.2 mm.

3.6. PARAMETROS DE LA TÉCNICA DE REVENIDO EN PROCESO

SMAW

En el proceso SMAW existen varios factores que influyen en la calidad de la soldadura, además para realizar adecuadamente la técnica de soldadura de revenido es necesario delimitar y controlar dichos factores los cuales son:

- Tipo de Corriente
- Amperaje o intensidad de corriente
- Voltaje
- Forma de llevar el electrodo
- Velocidad de avance
- Disposición y secuencia de cordones

3.6.1. TIPO DE CORRIENTE

Existen dos tipos de corriente a utilizar en el proceso SMAW: corriente alterna (AC) y corriente continua (DC).

Dependiendo del tipo de máquina a utilizarse y la conexión de los cables se puede generar dos maneras de conexión o de polaridad en corriente continua las cuales son:

- Corriente alterna
- Corriente continua de electrodo negativo (DCEN)
- Corriente continua de electrodo positivo (DCEP)

3.6.1.1. CORRIENTE ALTERNA

En la corriente alterna los electrones cambian de dirección cada 1/120 segundos, por lo tanto ánodo y cátodo se alternan, además el amperaje posee una gráfica senoidal como la indicada en la Figura No. 31, por lo cual el valor del amperaje en algún momento es cero lo cual es perjudicial para ciertos electrodos.

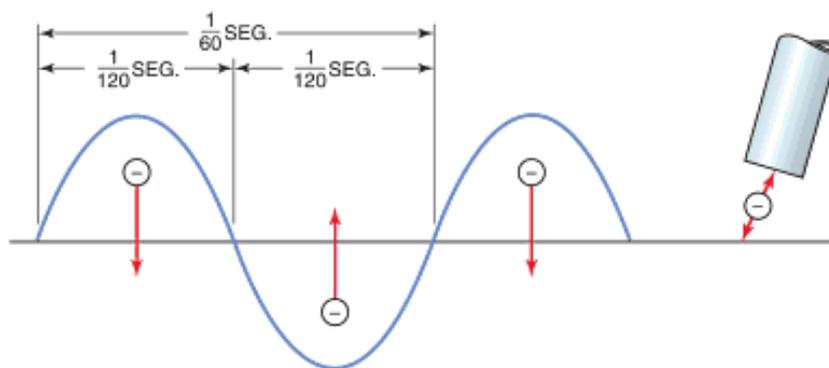


Figura No. 31: Corriente alterna AC.
(Jeffus, 2009)

3.6.1.2. CORRIENTE CONTINUA DE ELCETRODO (DCEN)

En DCEN el electrodo es conectado al polo negativo y la masa al polo positivo como se muestra en la Figura No.32, logrando concentrar de esta manera alrededor de un tercio del calor en el electrodo y los otros dos tercios en la pieza. Es utilizado para maximizar la fusión del electrodo y además es adecuada para soldar materiales delgados.

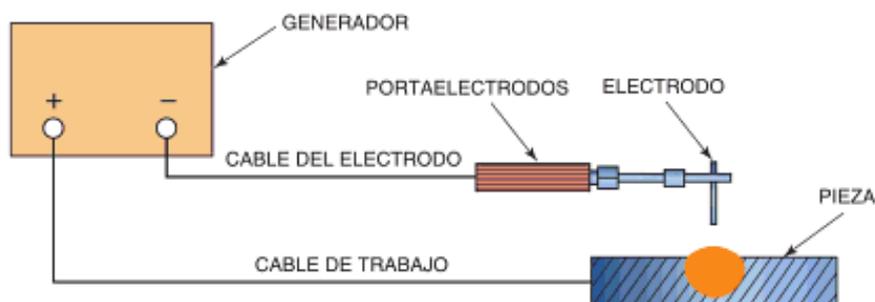


Figura No. 32: Conexión DCEN.
(Jeffus, 2009)

3.6.1.3. CORRIENTE CONTINUA DE ELECTRODO (DCEP)

En DCEP el electrodo es conectado al polo positivo y la masa al polo negativo como se muestra en la Figura No.33, logrando concentrar de esta manera alrededor de dos tercios del calor en el electrodo y el otro tercio en la pieza. Es utilizado generalmente para obtener mayor penetración en el material base por lo que puede soldar materiales de mayor espesor.

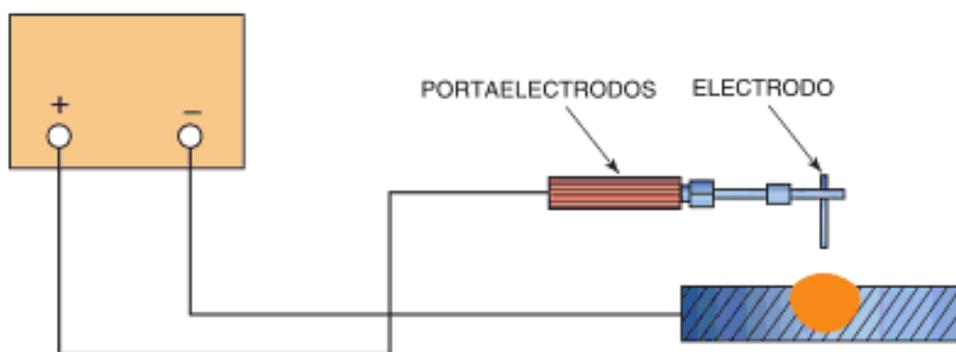


Figura No. 33: Conexión DCEP.
(Jeffus, 2009)

Debido a que la técnica de soldadura de revenido depende de una aportación de calor controlada y que en el WPS se utilizará materiales de gran espesor es necesario realizarla con DCEP.

3.6.2. AMPERAJE O INTENSIDAD DE CORRIENTE

Este parámetro depende del espesor del material a soldar, de la posición de soldeo y fundamentalmente del diámetro del electrodo. Entre más amperaje la penetración en el material base será mayor, sin embargo si esta es muy elevada provocara socavaciones y si es muy baja podrá ocasionar porosidades. Los parámetros recomendados para el electrodo E9018 B3 se muestran en la Tabla No. 16.

Tabla No. 16: Especificaciones técnicas del electrodo AWS E 9018 B3
(Indura, 2013)

DIAMETRO mm	LONGITUD mm	AMPERAJE		ELECTRODOS POR KG
		Mín.	Máy.	
2.4	300	65	95	65
3.2	350	90	140	32
4.0	350	130	180	24
4.8	350	170	240	12

Para un electrodo de diámetro 3.2 mm se recomienda que el amperaje este entre 90 a 140 A, por lo que los cupones se realizarán con un valor de 130 A, la especificaciones técnicas del electrodo E9018 B3 de Indura se encuentra en el ANEXO 3.

3.6.3. VOLTAJE

También conocida como tensión de arco. Esta depende de la longitud de arco y debe mantenerse dentro de ciertos límites ya que los grandes cambios de voltaje provocadas por variaciones en la longitud del arco, producirá calentamientos irregulares en el material base y en el electrodo, lo que afectará directamente en la penetración y la apariencia del cordón de soldadura. Este parámetro depende de la habilidad del soldador debido a que debe mantener una distancia adecuada entre el material base y el electrodo.

3.6.4. FORMA DE LLEVAR EL ELECTRODO

Existen diversas técnicas para soldar y manipular el electrodo, depende fundamentalmente del soldador y estas pueden ser recto u ondulado.

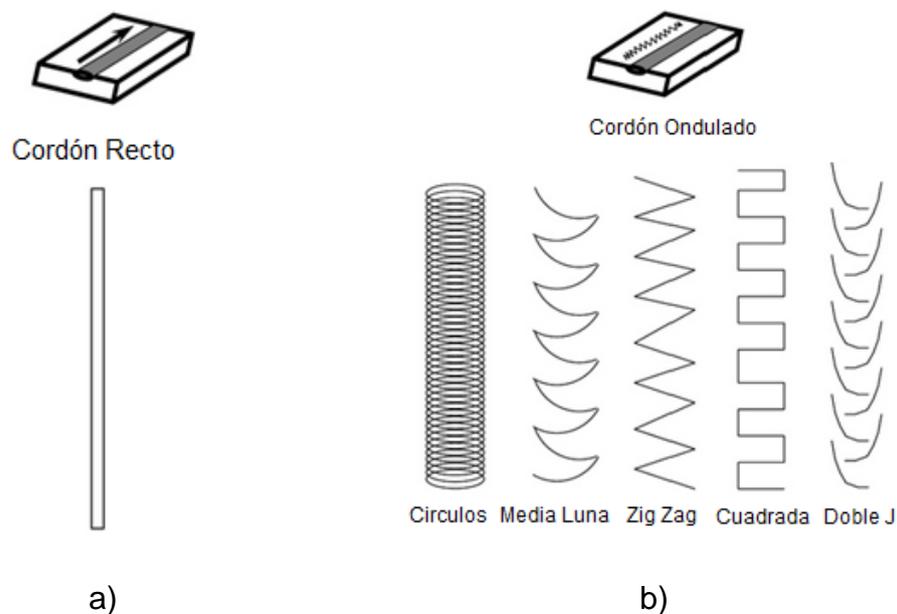


Figura No. 34: Formas de llevar el electrodo. a) Recto. b) Ondulado.

La técnica de soldadura de revenido se realiza con cordones rectilíneos para evitar el excesivo aporte de calor y cordones excesivamente altos.

3.6.5. VELOCIDAD DE AVANCE

La velocidad de avance es un factor clave para controlar el aporte de calor, por este motivo se debe calcular considerando el amperaje, el voltaje y la cantidad de calor deseada, para lo cual hay que remitirse a la ecuación (6), donde se debe despejar la velocidad de avance obteniendo la siguiente expresión:

$$Velocidad\ de\ Avance\left[\frac{mm}{min}\right] = \frac{Voltaje\ [V] * Amperaje[A] * 60}{Entrada\ de\ Calor\ \left[\frac{J}{mm}\right]} \quad (6)$$

Al utilizar esta expresión variando la entrada de calor y manteniendo los otros parámetros constantes se obtiene las siguientes velocidades de avance:

3.7. PARAMETROS PARA LOS WPS's DE PRUEBA

En la Tabla No.18 se encuentran resumidos los parámetros de los cordones de revenido de los distintos WPS's y en la Tabla No.19 se encuentran los parámetros para los cordones de relleno, sin embargo los WPS desarrollados se pueden observar en el ANEXO 4.

Tabla No. 18: Parámetros para las capas de revenido

PARÁMETROS DE SOLDADURA	Procedimientos de Soldadura		
	S01	S02	S04
Amperaje	130 A	130 A	130 A
Voltaje	23.5 V	23.5 V	23.5 V
Velocidad de Avance Promedio	36.6 cm/min	30.5 cm/min	26.0 cm/min
Electrodo	E9018	E9018	E9018
Pre-calentamiento	250-350 °C	250-350 °C	250-350 °C
Calor aportado	5.00 KJ/m	6.00 KJ/m	7.00 KJ/m

Tabla No. 19: Parámetros para los cordones de relleno

PARÁMETROS DE SOLDADURA	Procedimientos de Soldadura		
	S01	S02	S04
Amperaje	130 A	130 A	130 A
Voltaje	23.5 V	23.5 V	23.5 V
Velocidad de Avance Promedio	140 cm/min	140 cm/min	140 cm/min
Electrodo	E9018	E9018	E9018
Pre-calentamiento	250 °C	250 °C	250 °C
Calor aportado	16 KJ/m	16 KJ/m	16 KJ/m

Debido a que los cordones de relleno no son fundamentales, la velocidad de avance puede incrementarse para que exista una mayor aportación de calor y también de material de aporte.

CAPITULO IV

CALIFICACIÓN DEL WPS

4.1. CONTROLES ANTES DE LA SOLDADURA

Antes de realizar la soldadura es necesario realizar una inspección general a todos los elementos que van a estar envueltos en la misma, tales como:

- Soldadora
- Cupones
- Soldadores
- Equipos de Medición

4.1.1. SOLDADORA

Es necesario identificar las especificaciones técnicas de la máquina de soldar, sin embargo lo más importante es calibrarla a los parámetros a utilizar y controlarlos a cada momento.

4.1.1.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA SOLDADORA

Para determinar los parámetros de soldadura antes de nada es primordial identificar la maquina a utilizar, en este caso se empleará una Lincoln RX 450, La cual posee las siguientes características técnicas resumidas en la Tabla No. 20.



Figura No. 36: Maquina de Soldar Lincoln RX 450.

Tabla No. 20: Especificaciones técnicas de la soldadora Lincoln RX 450

	Entrada			SALIDA	
	RX 450 60 Hz			RX 450 / 60 Hz	
Tensión de Alimentación	220 V	440 V	Tensión Máxima a Circuito Abierto	74 V	74 V
Corriente	80 A	40 A	Tensión Arco Nominal	36 V	36 V
Número de Fases	3	3	Corriente Nominal	400 A	400 A
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	Ciclo de Trabajo Nominal	60 %	60 %
Clase de Aislamiento Térmico	155/180° C	155/180° C	Corriente de Ciclo de Trabajo al 100%	310 A	310 A
			Rango de Amperaje	70-450 A	70-450 A
			Polaridad	DCEP/DC EN	DCEP/DC EN

Las especificaciones técnicas de la maquina a más detalle se pueden observar en el ANEXO 5.

4.1.1.2. CALIBRACIÓN DE LA SOLDADORA

Para realizar la calibración de la máquina de soldar hay que utilizar una pinza amperimétrica y hacer los respectivos ajustes en la máquina.



a)



b)

Figura No. 37: a) Pinza amperimétrica b) Calibración de la máquina.

4.1.2. SOLDADOR

Un parámetro que hay que controlar a cada momento es la velocidad de avance del soldador ya que el incremento o decremento de este parámetro provocara que la entrada de calor se altere, por lo cual se realizó varios cordones tomando el tiempo que se demora en soldar una distancia determinada.

Las velocidades a las cuales el soldador debe avanzar están delimitadas en la Tabla No.18.

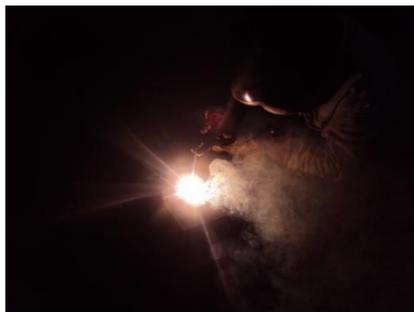


Figura No. 38: Calibración de la velocidad de avance del soldador.

4.1.3. CONTROL METROLÓGICO DE LAS PROBETAS

Antes de iniciar la soldadura es necesario controlar las medidas del bisel, además de las dimensiones finales de los cupones de soldadura para no tener ningún problema al momento de manufacturar las probetas para los distintos ensayos.

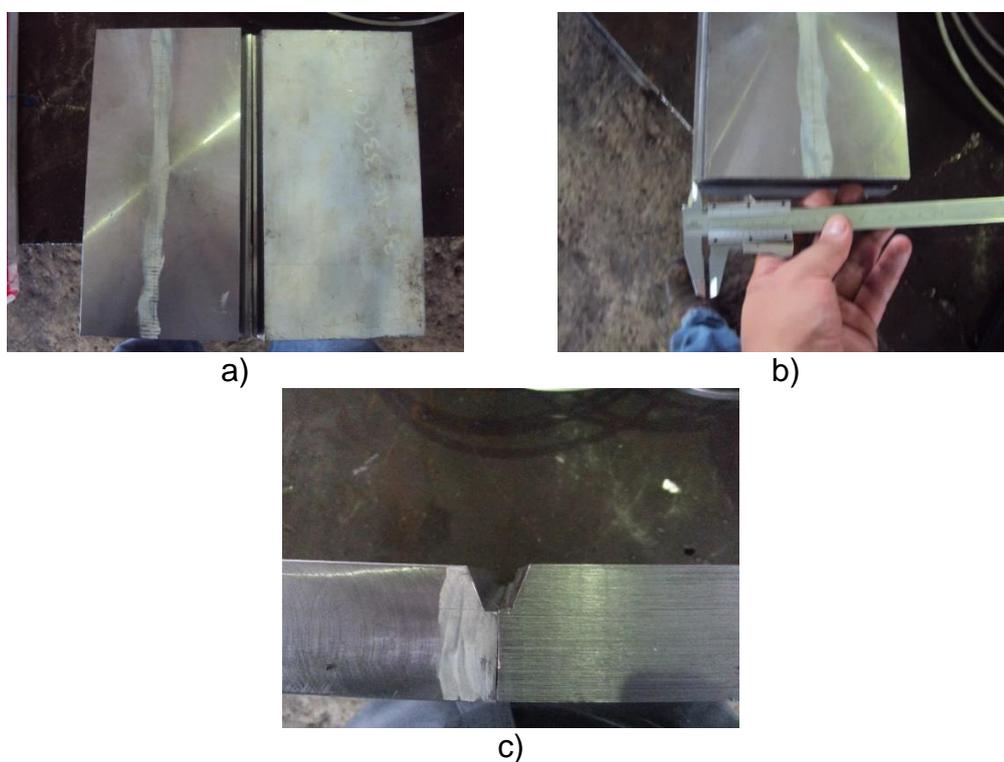


Figura No. 39: Control metrológico de los cupones a) Vista superior de los cupones b) Medición de la raíz del bisel c) Vista frontal del bisel.

4.1.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS CUPONES DE SOLDADURA

Se debe realizar la identificación de cada cupón para no perder la trazabilidad debido a que cada procedimiento tiene parámetros diferentes, además al finalizar el proceso de soldadura es necesario identificar el soldador que realizó la misma, además es necesario saber la ubicación exacta de cada cupón para controlar la manufactura de las probetas ya que no se permite el corte por calor, ya que este puede afectar la estructura metalográfica de las probetas a ensayar.

Las identificaciones de cada procedimiento y sus parámetros se indican en la Tabla No.18 y Tabla No.19, además cabe recalcar que el procedimiento S03 es el que actualmente se está llevando a cabo y será el valor referencial a tomar en consideración tanto en el aspecto técnico como también en el análisis financiero a realizarse. Para el primero procedimiento con una entrada de calor de 5 KJ/cm se lo identificara con S01, al procedimiento con entrada de calor 6 KJ/cm se lo identificara con S02 y al procedimiento con una entrada de calor de 7 KJ/cm se lo identificara con S04.



a)



b)



Figura No. 40: Identificación de los procedimientos a) Procedimiento S01 b) Procedimiento S02 c) Procedimiento S03 d) Procedimiento S04

4.1.5. RESECADO DE LOS ELECTRODOS

Debido a que se utilizara electrodos de bajo hidrogeno el resecado de los mismos es fundamental para garantizar que no exista presencia de hidrogeno en el revestimiento, por lo cual es necesario realizar un recalentamiento del mismo, y según la norma AWS 5.5 en su Tabla A.2 (Ver ANEXO 6), la temperatura de recalentamiento para los electrodos con denominación EXX18-X es entre 250 y 425°C.

Para realizar el resecado de los electrodos se utilizó un mechero el cual estaba en contacto directo con el mismo alcanzando una temperatura de 350°C la cual se mantuvo durante 1 hora hasta la preparación de las juntas y del soldador.



Figura No. 41: Resecado de los electrodos.

4.1.6. PRECALENTAMIENTO

Es necesario el precalentamiento del cupón de soldadura para que no exista un choque térmico muy grande por lo cual se delimito anteriormente el rango que esta.

En campo para la realización del precalentamiento se utilizó un mechero de GLP para alcanzar la temperatura adecuada en un rango entre 250 y 350°C, para lo cual se procedió al calentamiento durante media hora haciendo controles permanentes de la misma.

El control de la temperatura en el ressecado como en el precalentamiento se realizó con un termómetro MONARCH 309 el cual contaba con una termocupla tipo J.



Figura No. 42: a) Precalentamiento del procedimiento S01 b) Control de la temperatura de precalentamiento.

4.2. CONTROLES DURANTE LA SOLDADURA

Durante el proceso de soldadura es indispensable controlar los parámetros que más influyen en la técnica de soldadura de revenido, los cuales están descritos en los registros de variables de calificación del procedimiento según lo que dictamina QW-483, los cuales son fundamentalmente:

- Diámetro del electrodo
- Amperaje
- Voltaje
- Velocidad de Avance (Tiempo)
- Refuerzo de Capas
- Temperatura entre pases

4.2.1. DIÁMETRO DEL ELECTRODO

Los rangos de voltajes y amperajes fueron seleccionados de acuerdo con las recomendaciones del proveedor para el diámetro de electrodo seleccionado, por este motivo es indispensable cumplir con un control sobre

los electrodos utilizados, además la utilización de un electrodo de mayor diámetro provocara un refuerzo excesivo lo cual es perjudicial para la soldadura de revenido.

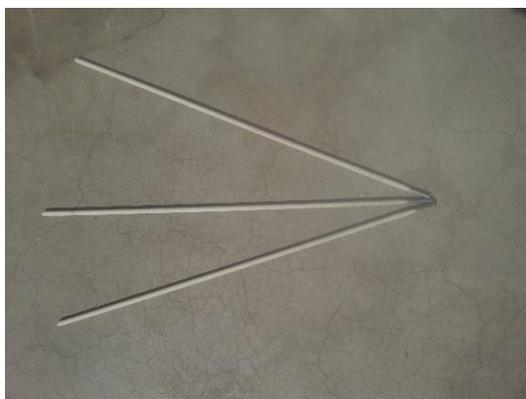


Figura No. 43: Control del diámetro del electrodo.

4.2.2. AMPERAJE Y VOLTAJE

Aunque la máquina de soldar haya sido previamente calibrada es necesario un control durante cada cordón de soldadura, ya que por motivos inherentes al proceso puede haber una caída de voltaje y amperaje.

4.2.3. VELOCIDAD DE AVANCE

La velocidad de avance como parámetro no se puede controlar, más bien el tiempo el cual se demora el soldador en ejecutar el cordón de soldadura es el que se puede controlar, el cual es un parámetro que depende de la velocidad de avance como se muestra en la expresión:

$$Velocidad\ de\ Avance\left(\frac{mm}{min}\right) = \frac{Longitud\ de\ la\ Junta\ (mm)}{Tiempo\ (min)} \quad (7)$$

De la cual podemos despejar el tiempo obteniendo:

$$Tiempo \text{ (seg)} = \frac{Longitud \text{ de la Junta (mm)} * 60}{Velocidad \text{ de Avance} \left(\frac{mm}{min}\right)} \quad (8)$$

Teniendo como parámetro la velocidad de avance y la longitud de la junta se puede calcular los distintos tiempos que el soldador tendría que demorarse en una junta los cuales se muestran en la Tabla No. 21.

Tabla No. 21: Tiempos de ejecución de cada cordón

	S01	S02	S04
Velocidad (mm/min)	366	305	260
Longitud (mm)	277	277	277
Tiempo (s)	45	55	64

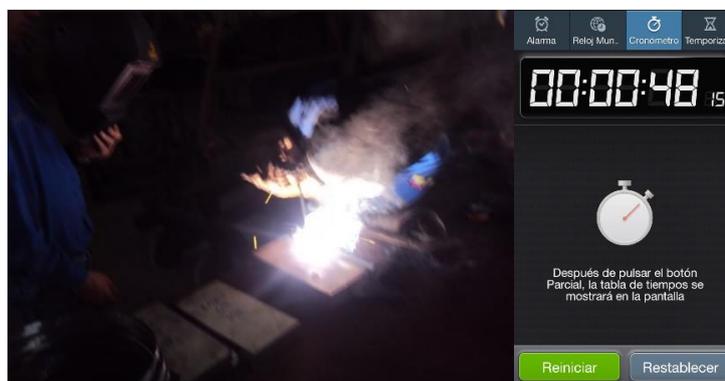


Figura No. 44: Control de tiempo de ejecución del cordón de soldadura en S01.

4.2.4. REFUERZO DE CAPAS

El control de refuerzos de capas se debe realizar para que las mismas no sobrepasen de 3 mm ya que si hay una mayor distancia no se alcanzara la temperatura adecuada en la ZAT de los cordones adyacentes para su revenido.



Figura No. 45: Control de refuerzo de los cordones de la primera capa del procedimiento S01 a) Vista superior b) Vista frontal

4.2.5. TEMPERATURA ENTRE PASES

La temperatura entre pases tiene la misma función que la temperatura de precalentamiento, ya que no permite que el cupón de soldadura se enfríe rápidamente, el control se debe realizar después de haber terminado cada cordón.



Figura No. 46: Control de temperatura entre pases

La temperatura entre pases en los procedimientos S01, S02 y S04 se mantuvieron a un promedio de 250°C aproximadamente, sin embargo no se controló este parámetro en el procedimiento S03 ya que se desea comparar

los resultados teniendo en cuenta que en el procedimiento S03 no se posee un control muy exhaustivo en la entrada de calor ni en el ciclo térmico.

4.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Para la calificación del procedimiento se realizara ensayos no destructivos tales como:

- Inspección Visual
- Tintas Penetrantes

4.3.1. INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual se realizó a los cuatro cupones de soldadura para determinar la existencia de algún defecto superficial como:

- Fisuras
- Porosidades
- Mordeduras

4.3.1.1. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

El código BPVC ASME Sección IX en QW-194 indica que los cupones de soldadura deberán tener una penetración completa con fusión completa de metal de soldadura y metal base.

También hay que examinar toda la superficie de soldadura para descartar la presencia de fisuras, porosidades o mordeduras a lo largo de todo el cordón.

4.3.1.2. INSPECCIÓN VISUAL EN LOS CUPONES

En la Figura No. 47 se puede observar los cupones de los distintos procedimientos preparados para realizar la inspección visual.

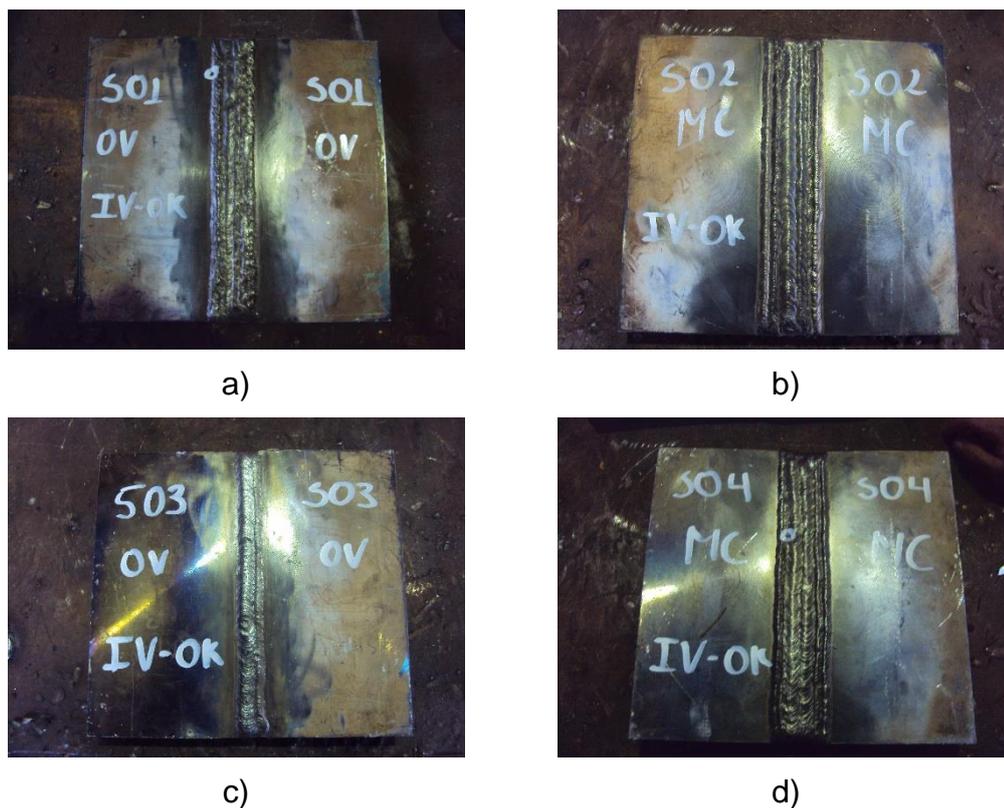


Figura No. 47: Cupones de Soldadura a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04

En la inspección visual se observa que los procedimientos S01 y S04 posee mordeduras inferiores a 0.5 mm de profundidad y con una longitud no mayor a 2 mm.

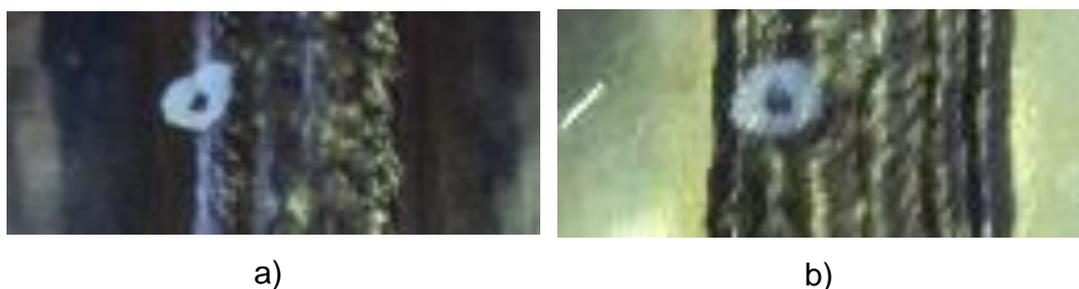


Figura No. 48: Mordeduras descartadas a) Mordedura del procedimiento S01, b) Mordedura del procedimiento S04.

4.3.2. TINTAS PENETRANTES

Como se mencionó previamente el ensayo de tintas penetrantes es utilizado para detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales.



Figura No. 49: Kit de tintas penetrantes a) Limpiador, b) Penetrante, c) Revelador.

4.3.2.1. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

El código BPVC ASME Sección IX en QW-195.2 brinda los criterios de aceptación para el ensayo de tintas penetrantes, para lo cual define tres términos los cuales son (The Americas Society of Mechanical Engineers, 2013):

- Indicaciones importantes: indicaciones con dimensiones principales mayores que 1.5 mm.
- Indicaciones lineales: una indicación que tiene una longitud mayor a tres veces su ancho.
- Indicaciones redondas: una indicación de forma circular o elíptica con longitud igual o menor a tres veces su ancho.

Los cupones serán catalogados como inaceptables cuando el ensayo exhiba una indicación en exceso de los límites especificados que son:

- Indicaciones lineales importantes.
- Indicaciones redondas importantes mayores a 5 mm.
- Cuatro o más indicaciones redondas importantes en una línea separada por 1.5 mm o menos.

4.3.2.2. ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES EN LOS CUPONES

Para realizar el ensayo primero hay que realizar una limpieza para eliminar todos los contaminantes, tales como óxidos, grasas, pinturas, etc., pues estos pueden provocar falsas indicaciones o que el penetrante no se introduzca en las discontinuidades.

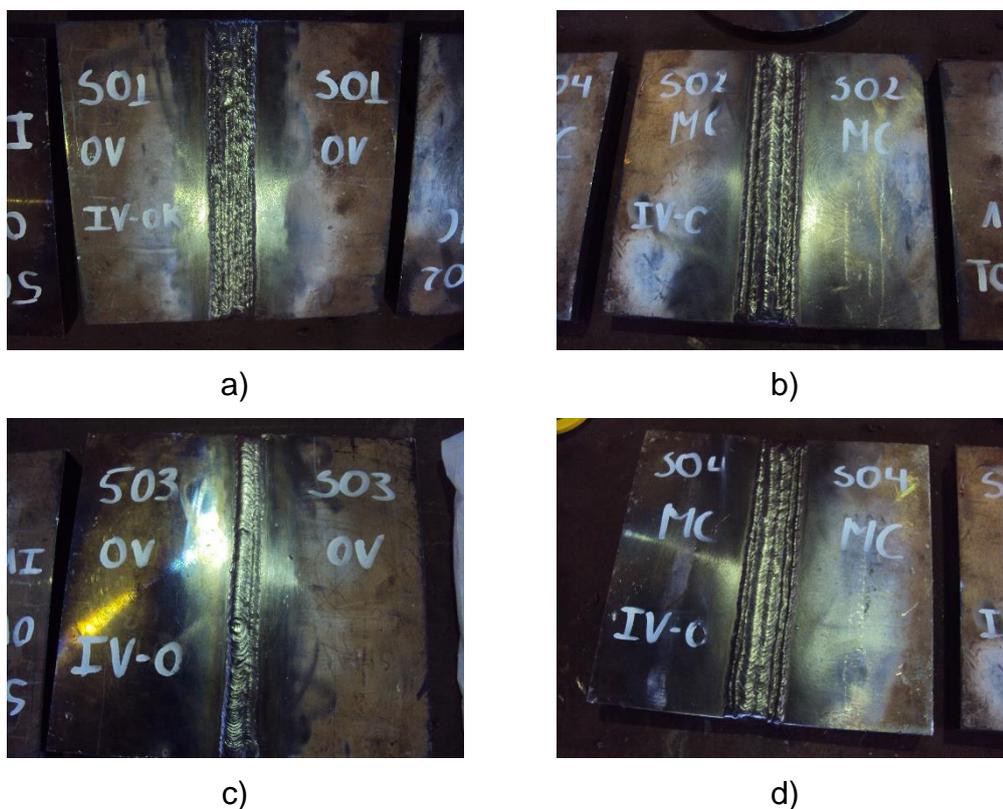


Figura No. 50: Limpieza de los cordones de soldadura de los cupones

a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04.

Limpia la superficie se procede a la aplicación del penetrante en la superficie del cupón de soldadura procurando humedecer toda la superficie del mismo.

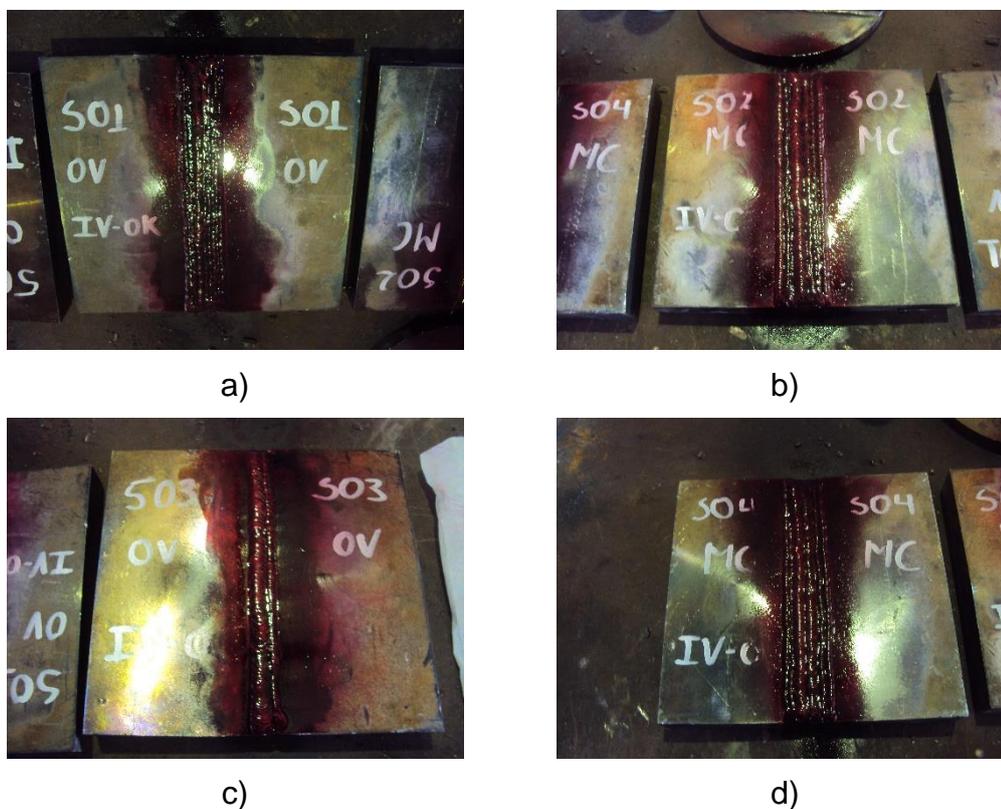


Figura No. 51: Aplicación del penetrante en los cupones a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04.

El producto aplicado recomienda que se espere un lapso de 5 a 30 minutos para proceder a la limpieza del penetrante para que este pueda entrar a todas las discontinuidades que pudieran existir en el cordón como fisuras. Después de la limpieza se procede a aplicar el revelador que en este caso es acuoso.

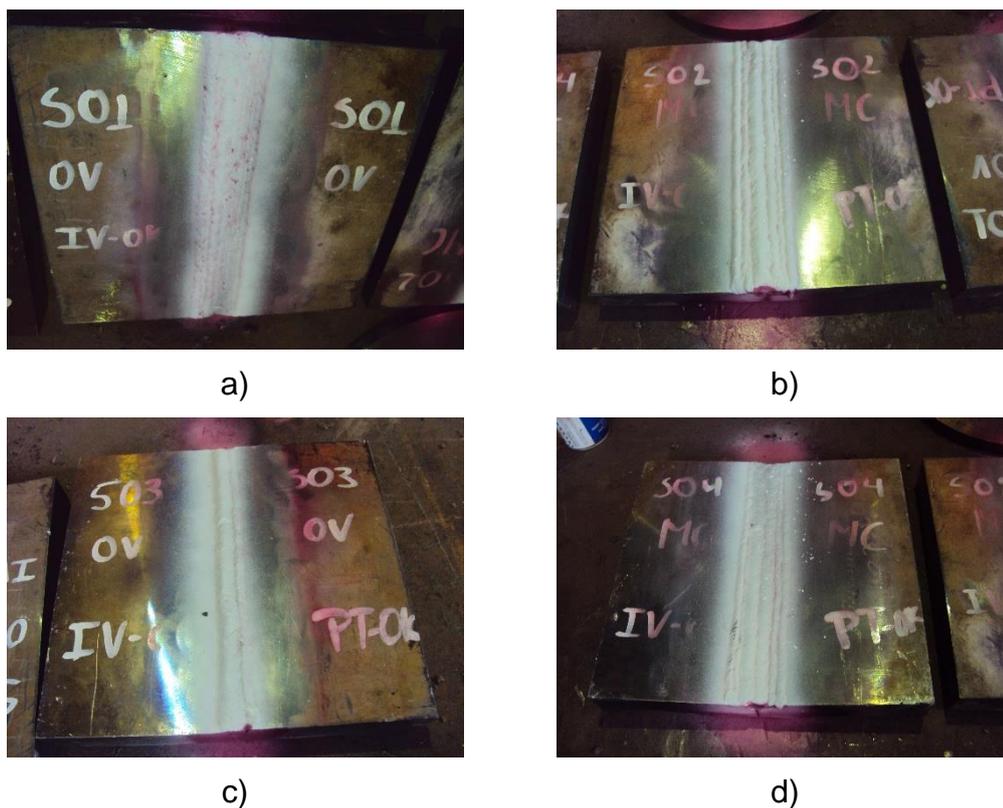


Figura No. 52: Aplicación del revelador en los cupones a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04.

Como se logra apreciar en el procedimiento S01 y S04 presentan indicaciones redondas debido a las mordeduras vistas en la inspección visual, sin embargo estas no sobrepasan los 5 mm por lo cual son aceptables.



Figura No. 53: Indicaciones redondas a) S01 y b) S04.

4.4. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos realizados en los cupones de soldadura serán:

- Ensayo de tracción
- Ensayo de doblado lateral
- Ensayo de impacto
- Ensayo de dureza
- Metalografías

Además se colocara una identificación a las probetas extraídas de los cupones de soldadura de acuerdo a su ubicación en el mismo.

DESCARTAR		DESCARTAR	
PROBETA		DOBLADO LATERAL	1
PROBETA		DUREZA	2
PROBETA		SECCIÓN REDUCIDA	3
PROBETA		DOBLADO LATERAL	4
PROBETA		DUREZA	5
PROBETA		IMPACTO	6
PROBETA		IMPACTO	7
PROBETA		IMPACTO	8
PROBETA		IMPACTO	9
PROBETA		DUREZA	10
PROBETA		DOBLADO LATERAL	11
PROBETA		SECCIÓN REDUCIDA	12
PROBETA		DUREZA	13
PROBETA		DOBLADO LATERAL	14
DESCARTAR		DESCARTAR	

Figura No. 54: Identificación de las probetas según la posición en el cupón de soldadura.

4.4.1. CONTROL DE LAS PROBETAS

Para asegurar que los resultados de los ensayos sean válidos es necesario descartar un mal de maquinado en las probetas por lo que es necesario realizar un ensayo de tintas penetrantes a las mismas.



Figura No. 55: Aplicación de tintas penetrantes en la probetas.

Al realizar el ensayo no se encontró ningún defecto en las probetas que pudieran provocar algún concentrador de esfuerzos.

4.4.2. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo a tracción consiste en la aplicación de una carga axial a una probeta, para lograr determinar su deformación plástica y también determinar su esfuerzo de rotura, estos ensayos fueron realizados en probetas cuyas dimensiones están normadas por el código BPVC ASME Sección IX en QW-462.1(a), el procedimiento para realizar los ensayos y el criterio de aceptación de los mismos fue guiado también en base a QW-150.

4.4.2.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

En QW-152 se muestra el procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo, el cual indica que la probeta debe ser llevada a la ruptura por tensión. Además indica que la resistencia se calculará dividiendo la carga total de rotura para el área de la sección recta más pequeña de la probeta la cual será medida antes de realizar el ensayo. Este ensayo sera llevado a cabo en la máquina de ensayos universales MTS-810 del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

4.4.2.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Los criterios de aceptación se encuentran especificados en QW-153.1, el cual dice que para pasar el ensayo la resistencia de tensión debe ser menor a:

- La mínima resistencia de tensión especificada para el material base.
- La mínima resistencia de tensión especificada del más débil de los dos materiales base si son de diferente resistencia.
- La mínima resistencia a la tensión especificada del metal de soldadura cuando la sección aplicable da disposiciones para el uso de metal de soldadura que tiene resistencia a temperatura ambiente menor que el metal base.
- Si la probeta se rompe en el metal base afuera de la soldadura el ensayo será aceptado siempre y cuando la resistencia no esté más del 5% debajo de la mínima resistencia de tensión del material base.

4.4.2.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo puede ser utilizado para realizar ensayos estáticos como tracción y compresión y también ensayos dinámicos como el de fatiga.

Tabla No. 22: Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales MTS-810

EQUIPO: Máquina de ensayos universales

CÓDIGO: RM-30	MARCA: MTS
MANUAL: MRM-30	MODELO: 810-14-2
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: 230 V	REFRIGERANTE: N/A
FASES: 3	TIPO DE MOTRO: SC
CICLOS: 60 Hz	POTENCIAMOTOR: 40 HP
PESO: 3000 kg	VELOCIDAD MÁX MOTOR: 1765 rpm
CAPACIDAD MÁXIMA: 500 kN	COMBUSTIBLE: N/A



Figura No. 56: Máquina de ensayos universales MTS-810.

4.4.2.4. CALCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PROBETAS

Para calcular el área es necesario tomar las medidas de la sección rectangular de la probeta la cual se mide con un pie de rey.

Tabla No. 23: Dimensiones de probetas y secciones transversales

No.	a(mm)	b(mm)	So(mm ²)
S01-3	18.35	12.90	236.72
S01-12	19.14	12.96	248.05
S02-3	19.12	13.19	252.19
S02-12	19.11	13.18	251.87
S03-3	19.07	13.26	252.87
S03-12	19.08	12.99	247.85
S04-3	18.94	12.63	239.21
S04-12	19.00	12.40	235.60

4.4.2.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN Y ANALISIS

Los resultados de los ensayos a tracción se encuentran tabulados en la Tabla No. 24, además de las observaciones respectivas, y las probetas ensayadas se pueden observar en la Figura No. 56 y las gráficas obtenidas en el ensayo por la máquina se pueden observar en el ANEXO 7 y los resultados en el ANEXO 8.

Tabla No. 24: Resultados de los ensayos de tracción.

No.	Fm(kg)	Rm(kg/cm ²)	Rm(psi)	Observaciones
S01-3	15825	6685.3	95131.2	Rotura en el material base
S01-12	16625	6702.2	95371.7	Rotura en el material base
S02-3	16425	6512.9	92678.2	Rotura en el material base
S02-12	16900	6709.8	95480.7	Rotura en el material base
S03-3	15200	6011.0	85537.1	Rotura en el material de aporte
S03-12	14750	5951.2	84685.6	Rotura en el material de aporte
S04-3	14650	6124.3	87148.4	Rotura en el material base
S04-12	15650	6642.6	94524.4	Rotura en el material base



a)



b)



c)



d)

Figura No. 57: Probetas ensayadas a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04

Para realizar el análisis de los resultados se debe de identificar el tipo de material que se posee y su mínimo esfuerzo último, para lo cual hay que remitirse a la tabla 5 de la especificación API 6A del 2004, la cual nos indica que para un acero de 60K el mínimo esfuerzo ultimo permitido es de 85000 psi, por lo tanto este seta el mínimo esfuerzo que se aceptara.

Teniendo en cuenta esta consideración y observando los resultados obtenidos se aprecia que el procedimiento S03 no cumple con los requerimientos de la especificación API 6A, por lo cual ya queda descartado para su utilización.

Los procedimientos S01, S02 y S04 los cuales son alternativas para el procedimiento S03 cumplen con los requerimientos y además se puede observar que hay una relación entre el calor aportado y la resistencia última obtenida ya que a mayor calor aportado la resistencia última a la tracción disminuye como se puede apreciar en la Figura No. 58.

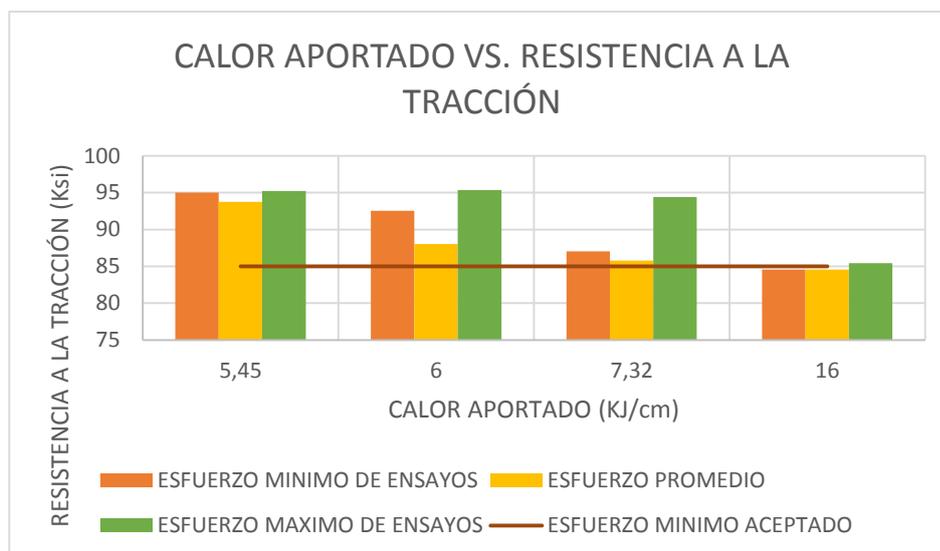


Figura No. 58: Calor aportado vs. Resistencia a la tracción.

4.4.3. ENSAYO DE DOBLADO LATERAL

El ensayo de doblez guiado proporciona un control de calidad de la soldadura que ayuda a determinar la ductilidad de la misma, además de ver la eficacia del procedimiento de soldadura. Como el espesor de la junta soldada es de 13 mm se realizó un ensayo de doblado lateral cuyo

procedimiento y criterios de aceptación se encuentran en el código BPVC ASME Sección IX en QW-160, además las dimensiones de las probetas a utilizarse se basaron en QW-462.2.

4.4.3.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

Para realizar el ensayo de doblado se debe remitir a QW-162, el cual hace referencia al dispositivo utilizado para realizar este ensayo el cual debe estar de acuerdo con QW-466. La probeta debe ser obligada a entrar en el dado mediante la aplicación de carga sobre del embolo hasta que la curvatura de la probeta sea tal que la probeta sea expulsada por abajo del dispositivo. Para realizar el ensayo se utilizara la máquina de ensayos universales AMSLER del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

4.4.3.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

La soldadura y la ZAT de la probeta de doblado transversal debe estar completamente dentro de la porción doblada, además las probetas no deberán tener defectos abiertos en la ZAT que excedan de 3.2 mm medido en cualquier dirección sobre la superficie convexa de la probeta doblada. Los defectos abiertos que ocurran en las esquinas serán descartados a menos que sean por falta de fusión, inclusiones de escoria u otros defectos internos.

4.4.3.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el ensayo de doblado lateral es necesario los rodillos y el soporte que son complementos de la máquina de ensayos universales, y estos deben poseer una distancia de 62 mm entre apoyos.

Tabla No. 25: Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033

EQUIPO: Máquina de ensayos universales

CÓDIGO: MM-29	MARCA: AMSLER
MANUAL: MMM-29	MODELO: FM-1033
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: 220 V	REFRIGERANTE: N/A
FASES: 3	TIPO DE MOTRO: P-8
CICLOS: 60 Hz	POTENCIAMOTOR: 2 HP
PESO: 500 kg	VELOCIDAD MÁX MOTOR: 1700 rpm
CAPACIDAD MÁXIMA: 10 ton	COMBUSTIBLE: N/A



Figura No. 59: Máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033.

4.4.3.4. RESULTADOS DE ENSAYOS DE DOBLADO LATERAL Y ANALISIS

Al realizarse 4 probetas para la ejecución de los ensayos de doblado lateral, todas deben de estar bajo los criterios de aceptación, caso contrario el

procedimiento se rechaza. Al realizar los ensayos se obtuvieron los resultados ilustrados en las siguientes figuras, además los resultados de los ensayos de laboratorio se puede ver en el ANEXO 9.

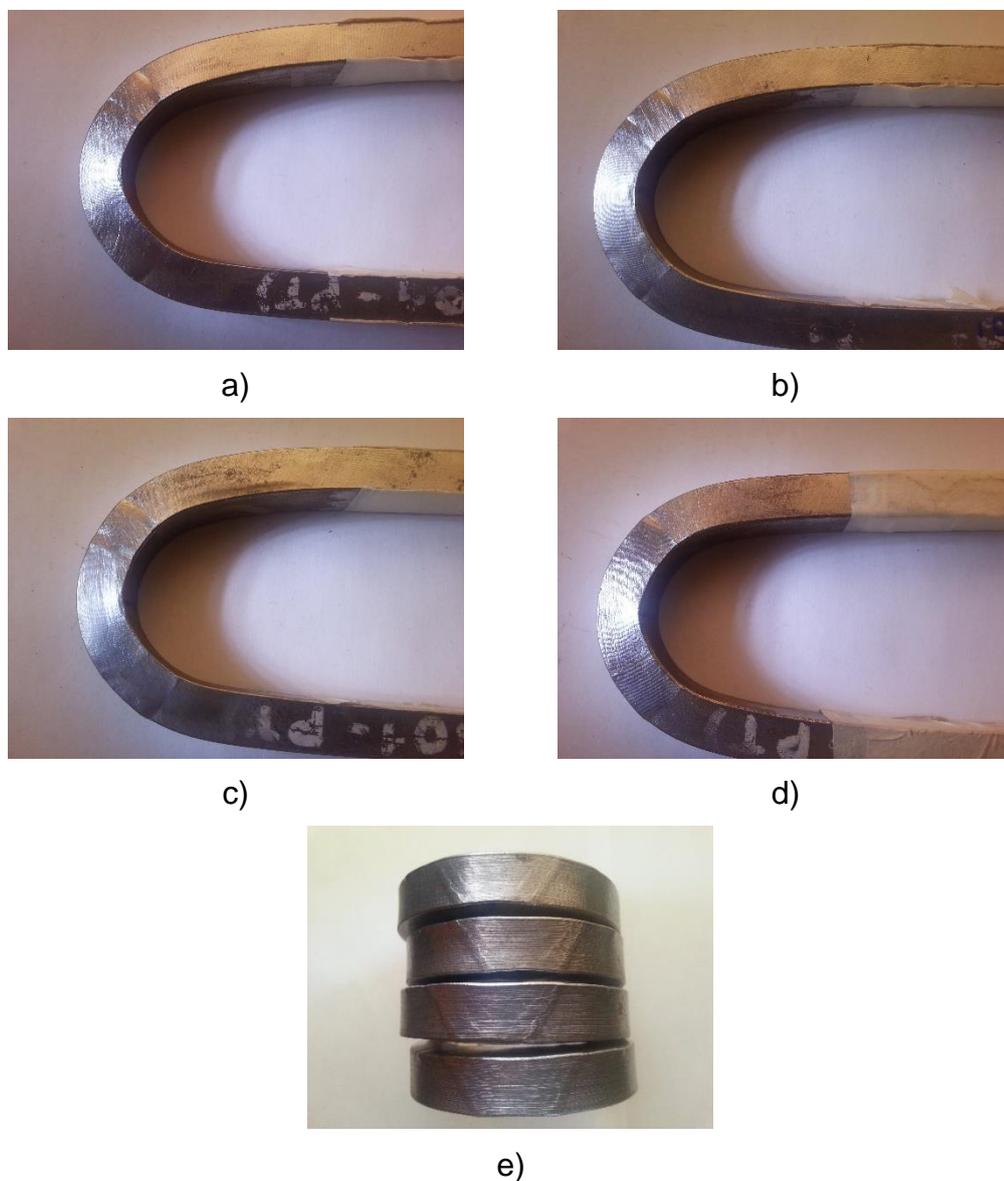


Figura No. 60: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S01 a) S01-1, b) S01-4, c) S01-11, d) S01-14 y e) Caras Convexas S01.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura No. 61: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S02 a) S02-1, b) S02-4, c) S02-11, d) S02-14 y e) Caras Convexas S02.



a)



b)

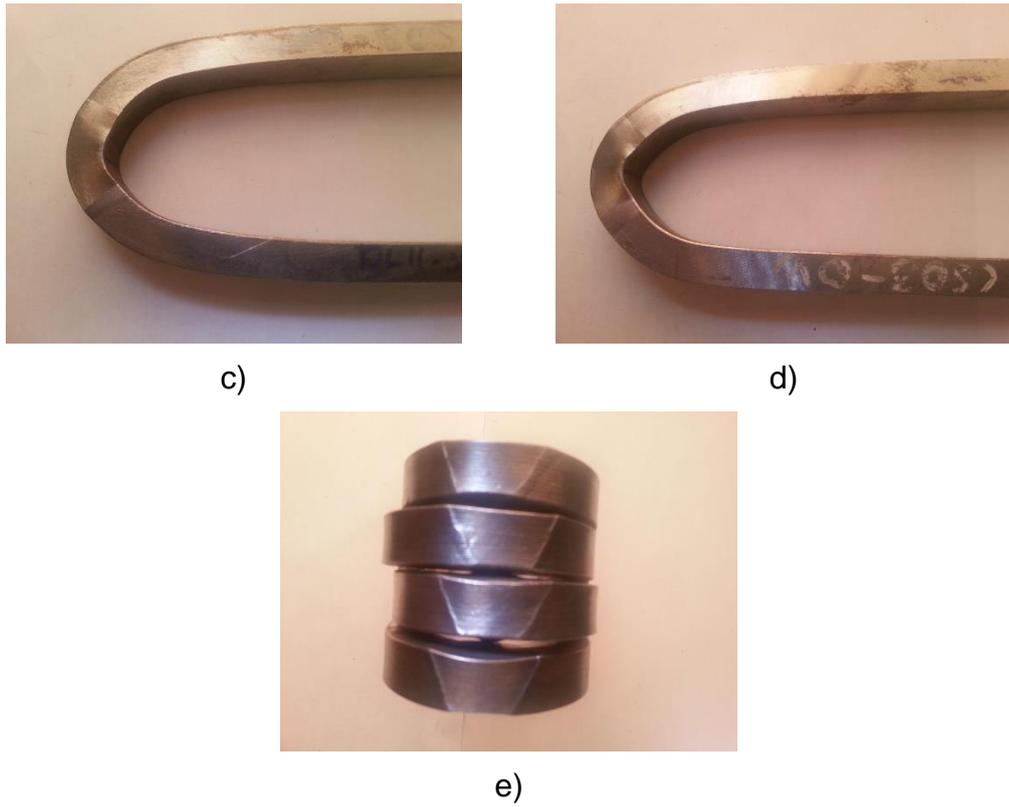
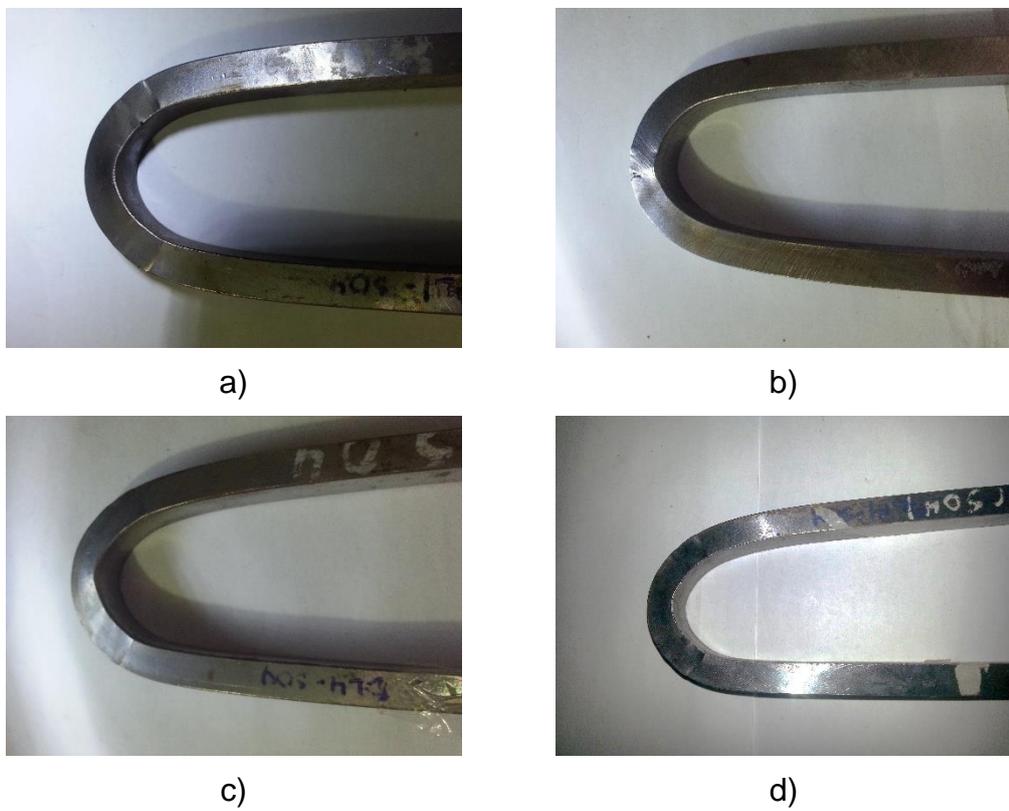


Figura No. 62: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S03 a) S03-1, b) S03-4, c) S03-11, d) S03-14 y e) Caras Convexas S03.





e)

Figura No. 63: Ensayos de doblado lateral del procedimiento S04 a) S04-1, b) S04-4, c) S04-11, d) S04-14 y e) Caras Convexas S04.

Se realiza una inspección visual de todas las probetas ensayadas, buscando discontinuidades abiertas, además se debe observar los radios de curvatura para identificar algún problema en la ductilidad tanto del material de aporte como del material base.

4.4.3.4.1. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S01

En las probetas del procedimiento de soldadura S01 no se aprecian ninguna discontinuidad abierta en las caras convexas de las mismas, por otro lado, se puede observar un radio de curvatura uniforme a lo largo de toda la probeta lo cual nos indica que tanto el material base como el material de aporte poseen la misma ductilidad.

4.4.3.4.2. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S02

Se aprecia una discontinuidad abierta en la cara convexa de la probeta S02-4, sin embargo esta no excede el 3.2 mm por lo cual es aprobada, además se aprecia un radio de curvatura agudo en la zona del material de aporte, lo cual indica que la ductilidad del material de aporte es inferior a la ductilidad del material base.



Figura No. 64: Discontinuidad abierta en la cara convexa de la probeta S02-4.

4.4.3.4.3. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S03

Se aprecia discontinuidades abiertas en las caras convexas de la probeta S03-11 y S03-14, sin embargo estas no exceden el 3.2 mm por lo cual quedan aprobadas, por otro lado, el radio de curvatura presente en estas probetas es el más agudo de los cuatro procedimientos indicando que la ductilidad del material de aporte en este caso es muy inferior al del material base, esto se debe principalmente a la utilización de un electrodo E7018.



a)



b)

Figura No. 65: Discontinuidades abiertas en las caras convexas de las probetas a) S03-11, b) S03-14.

4.4.3.4.4. PROBETAS DE DOBLADO LATERAL DE S04

Se aprecia una discontinuidad abierta en la esquina de la probeta S04-4 por lo cual es necesario identificar si esta es causada por una falta de fusión,

inclusiones de escoria o por algún defecto interno para lo cual se observara en microscopio.

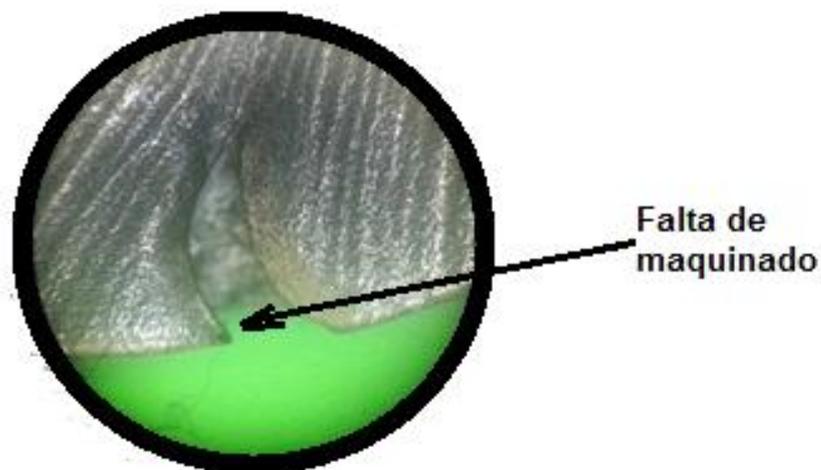


Figura No. 66: Discontinuidad abierta en la probeta S04-4.

Como se observa en la figura anterior, no hay evidencia de inclusiones de escoria o falta de fusión, por lo cual queda descartada como discontinuidad.

El radio de curvatura es agudo en la zona del material de aporte, debido a que la ductilidad del material base es mayor al del material de aporte.

4.4.4. ENSAYO DE IMPACTO

El ensayo de impacto Charpy o también conocido como ensayo de tenacidad es utilizado para determinar la cantidad de energía que un material puede absorber antes de producirse la fractura. Este ensayo debe realizarse tal como indica la Norma ASTM E23, en la que consta también el dimensionamiento de las probetas. Además también hay que tener en cuenta las menciones que hace el código BPVC ASME Sección IX en QW-171 que nos remite a SA-370 para el procedimiento a seguir en este ensayo.

4.4.4.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

El procedimiento a realizarse se encuentra en el manual de la máquina de ensayos universales AMSLER del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, la cual indica que la probeta debe ser colocada con la muesca en el lado de los apoyos para después proceder a levantar el martillo del péndulo el cual será liberado para impactar la probeta y tomar la medición correspondiente. Por otro lado la especificación API 6A indica que para realizar el ensayo en una probeta de 10x10 mm es necesario hacerlo a una temperatura de -29°C para lo cual se usa dióxido de carbono en estado sólido o como vulgarmente se lo conoce como hielo seco y alcohol industrial., sin embargo por el lapso de tiempo que la probeta se encuentra fuera de la solución se enfría a una temperatura de -31°C o menos.



Figura No. 67: Solución de hielo seco y alcohol industrial con el rango de temperaturas alcanzadas.

4.4.4.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Para los criterios de aceptación se debe remitir a la especificación API 6A, la cual en su tabla 6 nos indica que para un ensayo de impacto charpy de una

probeta 10x10 mm con una temperatura de -29°C para aplicar a PSL2 es necesario que la probeta absorba una energía igual a 27 J por lo menos.

4.4.4.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el ensayo de impacto se utilizara la máquina de ensayos universales AMSLER de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Tabla No. 26: Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER

EQUIPO: Máquina de ensayos universales

CÓDIGO: MM-30	MARCA: AMSLER
MANUAL: MMM-30	MODELO: 30 HP 130
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: N/A	REFRIGERANTE: N/A
FASES: N/A	TIPO DE MOTRO: N/A
CICLOS: N/A	POTENCIA MOTOR: N/A
PESO: 600 kg	VELOCIDAD MÁX MOTOR: N/A
CAPACIDAD MÁXIMA: 30 KPM	COMBUSTIBLE: N/A



Figura No. 68: Máquina de ensayos universales AMSLER.

4.4.4.4. CONTROL METROLÓGICO DE LAS PROBETAS DE IMPACTO

El control metrológico de las probetas de impacto se centra en las dimensiones de la muesca sin embargo toda la probeta tiene tolerancias las cuales se encuentran especificadas en la norma ASTM E23. Para realizar el control se utilizó el proyector de perfiles y el microscopio de herramientas del laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

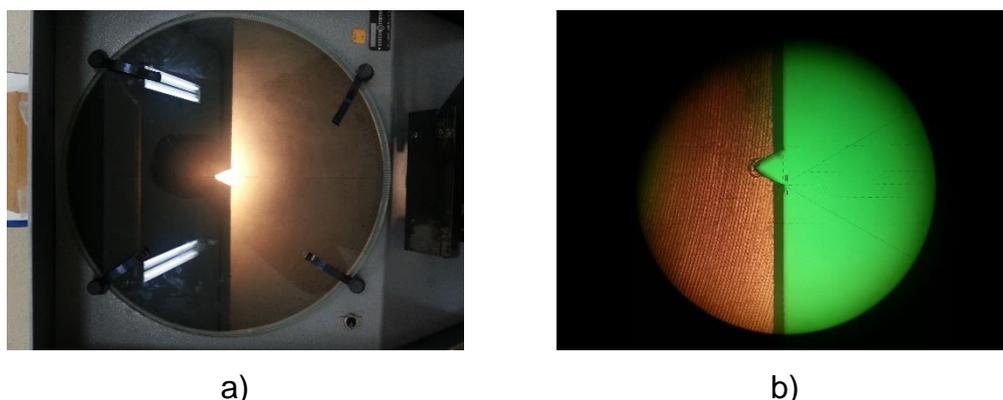


Figura No. 69: Control metrológico de la muesca a) Proyector de perfiles, b) Microscopio de herramientas.

4.4.4.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE IMPACTO Y ANALISIS

Los resultados obtenidos de los ensayos de impacto están resumidos en la siguiente tabla, además los resultados de laboratorio se pueden ver en el ANEXO 10.

Tabla No. 27: Resultados de los ensayos de impacto.

Procedimiento	Aporte de Calor (kJ/cm)	Valor máximo (J)	Valor mínimo (J)	Promedio (J)
S01	5,45	47,2	41,2	44,2
S02	6	51	14,7	32,85
S04	7,32	57,9	53	55,45
S03	16	74,6	55,9	65,25

Además de los datos obtenidos en el ensayo también es necesario observar el tipo de falla producida por el ensayo para poder determinar si el material se comporta dúctil o frágil los cuales se muestran en la siguiente figura.

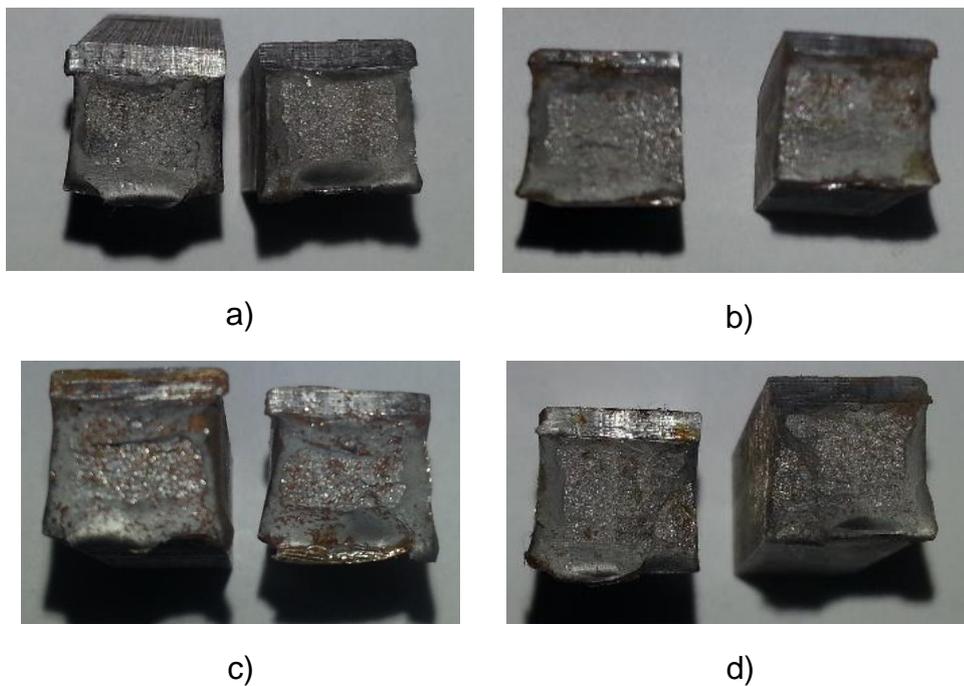
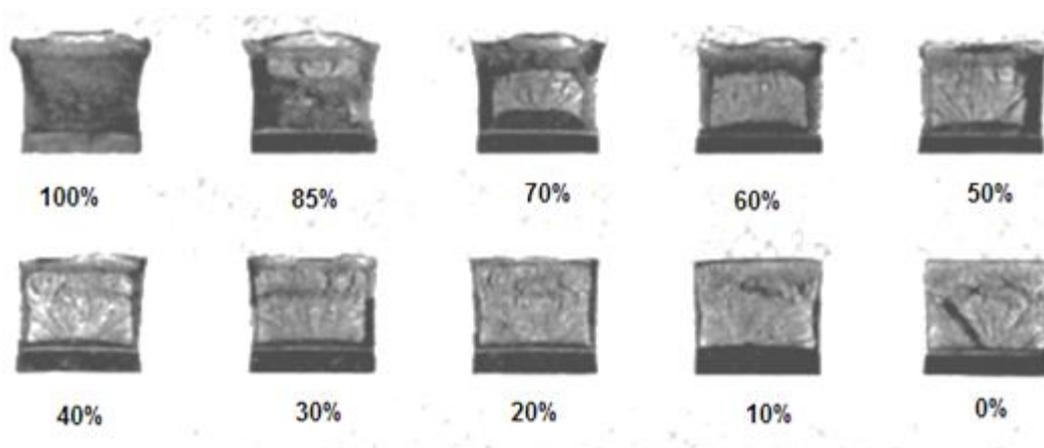


Figura No. 70: Probetas ensayadas de impacto a) S01, b) S02, c) S03 y d) S04

Al comparar las fracturas producidas por el ensayo charpy con las dadas en la Norma ASTM A370, podemos determinar el tipo de falla (frágil o dúctil) y por ende determinar el porcentaje de ductilidad que este posee.



**Figura No. 71: Tipo de fractura en ensayos charpy y porcentaje de ductilidad.
(ASTM, 1977)**

El procedimiento S04 posee una falla similar a la de 50% dada por la Norma ASTM A370, el procedimiento S03 posee un porcentaje de 70%, el procedimiento S02 posee un 40% y para finalizar el procedimiento S01 posee un 30%, por lo tanto el procedimiento que brinda mayor ductilidad es el S03, teniendo en cuenta que este se realizó con los parámetros que actualmente lleva a cabo en la industria petrolera.

Se puede observar que el procedimiento S02 posee el valor más bajo en los ensayos y además es inferior al mínimo aceptado de 27 J. Por otro lado se puede observar una tendencia en los valores máximos si estos se relacionan con el calor aportado de cada uno, entre más calor se aporta la resistencia al impacto aumenta.

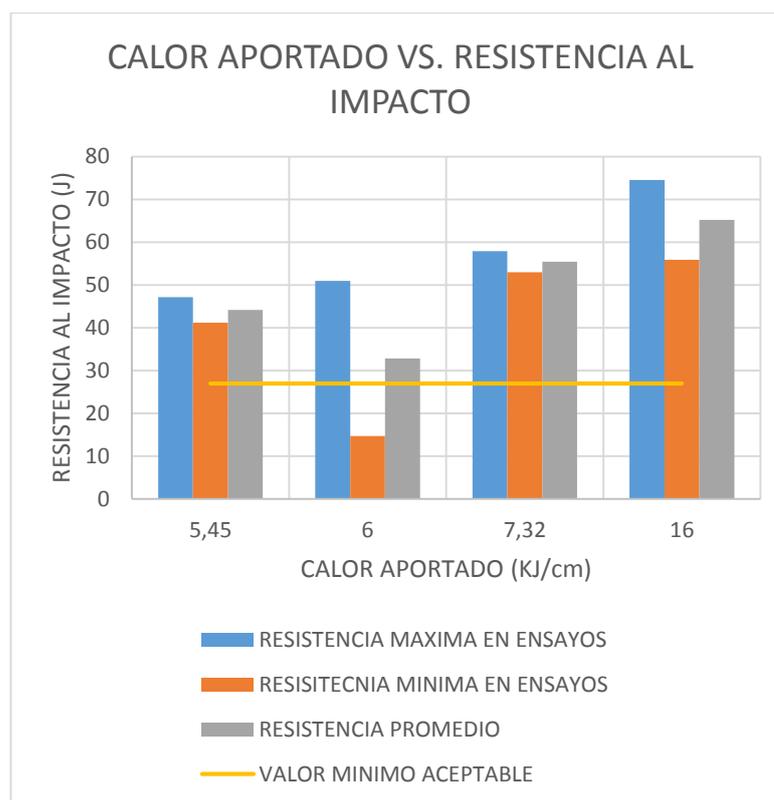


Figura No. 72: Calor aportado vs. Resistencia al Impacto

Al observar las fallas producidas en las probetas se determina que el procedimiento S03 es el más dúctil de todos teniendo una entrada de calor de 16 kJ/cm con un electrodo E7018, los otros procedimientos también muestran comportamiento dúctil con electrodo E9018 y asociando con la relación que existe entre la resistencia al impacto y el calor aportado se puede observar que entre más calor aportado la soldadura es más dúctil.

4.4.5. ENSAYO DE DUREZA

Para realizar los ensayos de dureza de las probetas se utilizó la distribución indicada en la Figura No. 73, siendo la zona crítica en el borde superior de la soldadura ya que este se encuentra en contacto directo con el medio ambiente y por este motivo se enfriará más rápido, pudiendo provocar la presencia de martensita en la ZAT (Zona Afectada Térmicamente).

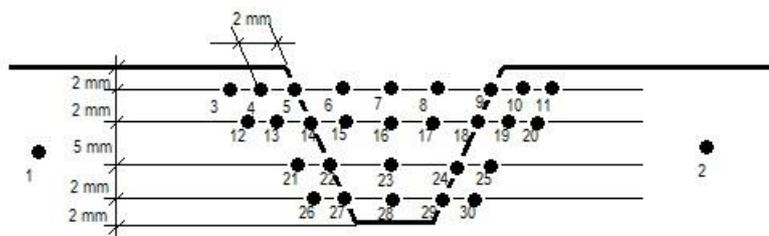


Figura No. 73: Ubicación de las indentaciones realizadas en los ensayos

4.4.5.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

Para realizar el ensayo se necesita probetas rectificadas para procurar que exista un ángulo de 90° entre el indentador y la superficie, además es necesario realizar una macrografía para identificar la ZAT y realizar la identificación de los puntos, después se procede a aplicar carga y se lee la lectura.

Para este ensayo se usara el durómetro Rams Rockford del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, el cual debe ser calibrado dependiendo de la escala Rockwell que se necesite, para este caso se utilizara la escala Rockwell C debido a que se espera durezas altas.



Figura No. 74: Calibración del durómetro a escala Rockwell C.

4.4.5.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Para los criterios de aceptación se debe remitir a la norma NACE MR0175 la cual en su tabla A.1 del anexo A (Ver ANEXO 11) indica que la máxima dureza Rockwell C aceptable es de 22 HRC o su equivalente en Vickers de 275 HV.

4.4.5.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el ensayo de dureza se utilizara el durómetro Rams Rockford de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Tabla No. 28: Especificaciones técnicas el durómetro Rams Rockford

EQUIPO: Durómetro Rockwell

CÓDIGO: MM-07	MARCA: RAMS
MANUAL: MMM-07	MODELO: 10 AR 10
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: N/A	REFRIGERANTE: N/A
FASES: N/A	TIPO DE MOTRO: N/A
CICLOS: N/A	POTENCIA MOTOR: N/A
PESO: 30 kg	VELOCIDAD MÁX MOTOR: N/A
CAPACIDAD MÁXIMA: 100B, 100C	COMBUSTIBLE: N/A



Figura No. 75: Máquina de ensayos universales AMSLER.

4.4.5.4. RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUREZA Y ANALISIS

Los resultados obtenidos de los ensayos de dureza están resumidos en la siguiente tabla donde se muestra las indentaciones superficiales, las cuales son las más críticas debido a su enfriamiento brusco por estar en contacto directo con el ambiente. Los resultados de laboratorio se pueden observar en el ANEXO 12.

Tabla No. 29: Resultados de los ensayos de dureza HV.

IDENTACIÓN	S01 5,45 kJ/cm	S02 6 kJ/cm	S04 7,32 kJ/cm	S03 16 kJ/cm
3	213 HV	250 HV	250 HV	184 HV
4	250 HV	250 HV	259 HV	250 HV
5	250 HV	234 HV	250 HV	213 HV
6	227 HV	234 HV	227 HV	163 HV
7	213 HV	206 HV	227 HV	167 HV
8	234 HV	250 HV	234 HV	160 HV
9	250 HV	250 HV	250 HV	272 HV
10	250 HV	250 HV	250 HV	254 HV
11	195 HV	243 HV	254 HV	189 HV

El procedimiento S04 posee una dureza máxima de 259 HV y el procedimiento S03 posee una dureza máxima de 254 HV las cuales son mayores al máximo valor de dureza permitido por la norma NACE MR0175 de 250 HV. En la siguiente figura se muestra las durezas en función de la ubicación de la indentación.

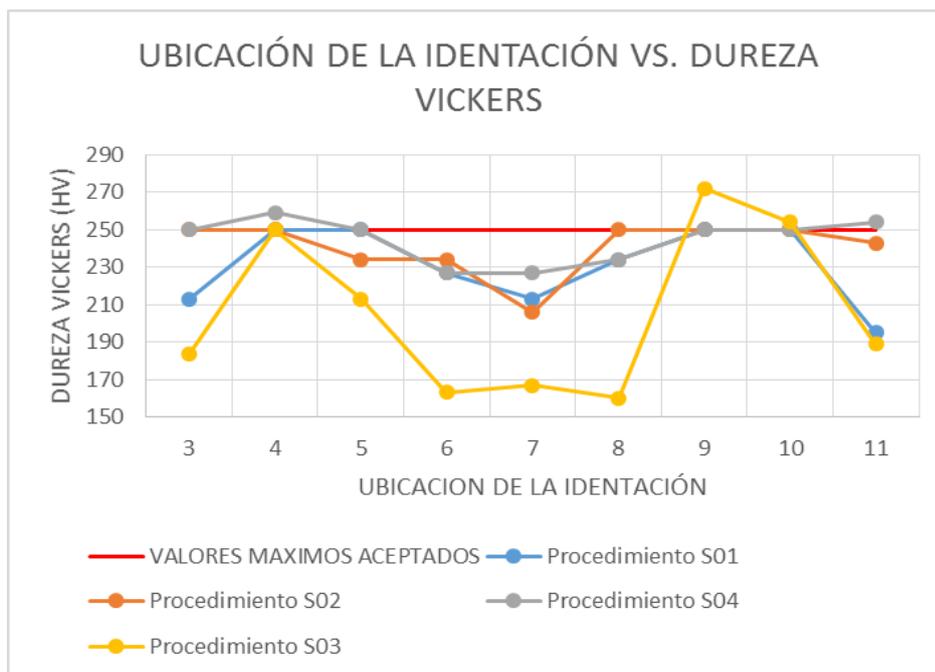


Figura No. 76: Calor aportado vs. Resistencia al Impacto

Se puede observar que en los puntos 4, 5, 9 y 10 se obtienen los valores más altos de cada procedimiento, lo que se debe fundamentalmente a que están ubicados en la ZAT.

4.4.6. METALOGRAFÍAS

Se utilizara la metalografía para descartar la presencia de martensita y así corroborar los resultados de dureza. Para realizarlas es necesario delimitar la ubicación la cual se muestra en la siguiente figura.



Figura No. 77: Ubicación de las indentaciones realizadas en los ensayos

Donde los puntos a estudiar serán el material base (a), la primera capa (b), la segunda capa (c) y el cordón de relleno (d).

4.4.6.1. PROCEDIMIENTO PARA LA METALOGRAFIALA

METALOGRAFIA

Para realizar las metalografías es necesario no comprometer la estructura metalográfica con corte térmico, por este motivo se realizó el corte en frío con una sierra de vaivén irrigada con líquido refrigerante, además la superficie debe de estar completamente plana por lo cual se realiza un rectificado después del corte.



Figura No. 78: Lapeadora Casera.

La probeta debe quedar con un pulido tipo espejo para lo cual se puede utilizar distintos procedimientos y por motivo de tiempo en este caso se utilizó el lapiado con lijas número 120, 240, 360, 600, 1000, 1200 y 1500 sucesivamente, sin embargo el pulido final se debe realizar en la pulidora de paño con alúmina.



Figura No. 79: Pulidora de Paño.

Después con las recomendaciones del Handbook de la ASM (ASM, 2004) se realiza el ataque químico durante 10 segundos con nital al 3% el cual es una solución compuesta de 3 ml de ácido nítrico y 97 ml de alcohol metílico.



Figura No. 80: Probeta atacada químicamente con nital al 3%.

Para finalizar se coloca en el microscopio metalúrgico para observar la estructura metalográfica con una ampliación de 100x y tomar las fotografías respectivas.



Figura No. 81: Microscopio metalúrgico.

4.4.6.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

No debe existir la presencia de martensita en las metalografías ya que este microconstituyente posee una dureza entre 27 a 65 HRC (EcuRed, 2014), la cual es mayor al máximo valor aceptable planteado por la norma NACE MR0175.

4.4.6.3. RESULTADOS DE LAS METALOGRAFÍAS Y ANALISIS

Para descartar la presencia de martensita es necesario tomar como referencia el Handbook de la ASM, en el cual nos presenta la forma típica de la martensita en las metalografías.



Figura No. 82: Metalografía de martensita en un acero austeníticos.

Al comparar las metalografías obtenidas con las dadas por la ASM se puede evidenciar que no existe martensita en ninguna de las zonas analizadas en las metalografías, lo cual corrobora los ensayos de dureza.

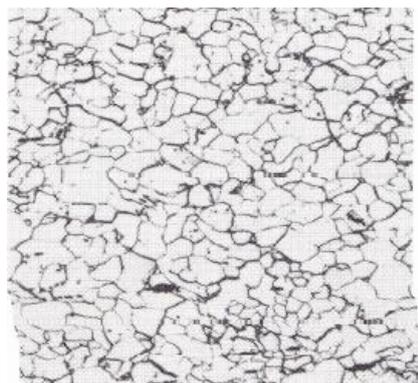
Además al comparar las metalografías obtenidas con las del Handbook de la ASM podemos identificar las distintas metalografías presentes en las mismas.



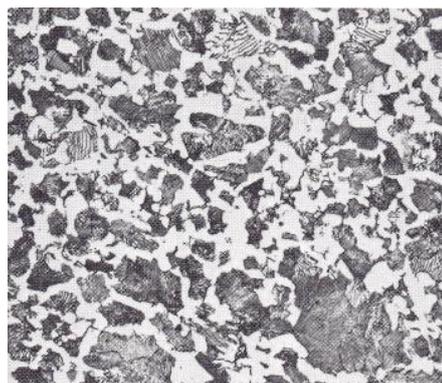
a)



b)



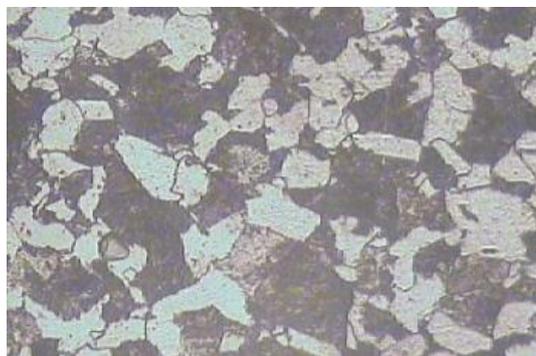
c)



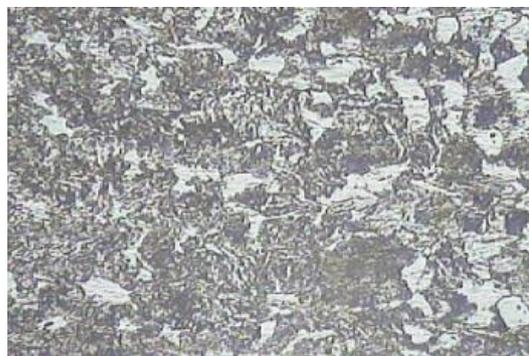
d)

Figura No. 83: Metalografías a) Matriz ferrítica con islas de perlita Fig. 129, b) Presencia de ferrita (áreas blancas) y perlita (áreas opacas) Fig. 126, c) Grano fino de perlita Fig. 50 y d) Ferrita y perlita Fig. 130. (ASM, 2004)

Al comparar con los resultados obtenidos con las metalografías de la figura anterior se puede determinar los diferentes microconstituyente de los diferentes procesos en las distintas ubicaciones.



a)



b)

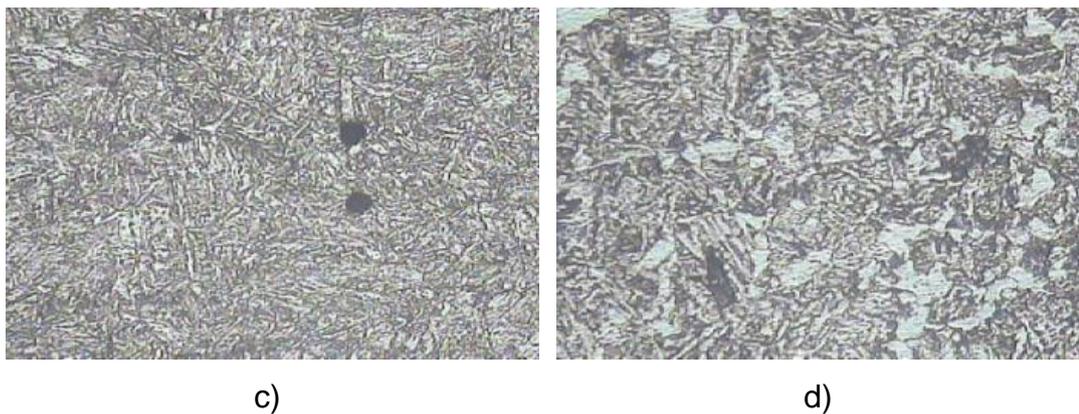


Figura No. 84: Metalografías del procedimiento S01 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) Matriz ferrítica perlítica de grano fino y d) Perlita gruesa.

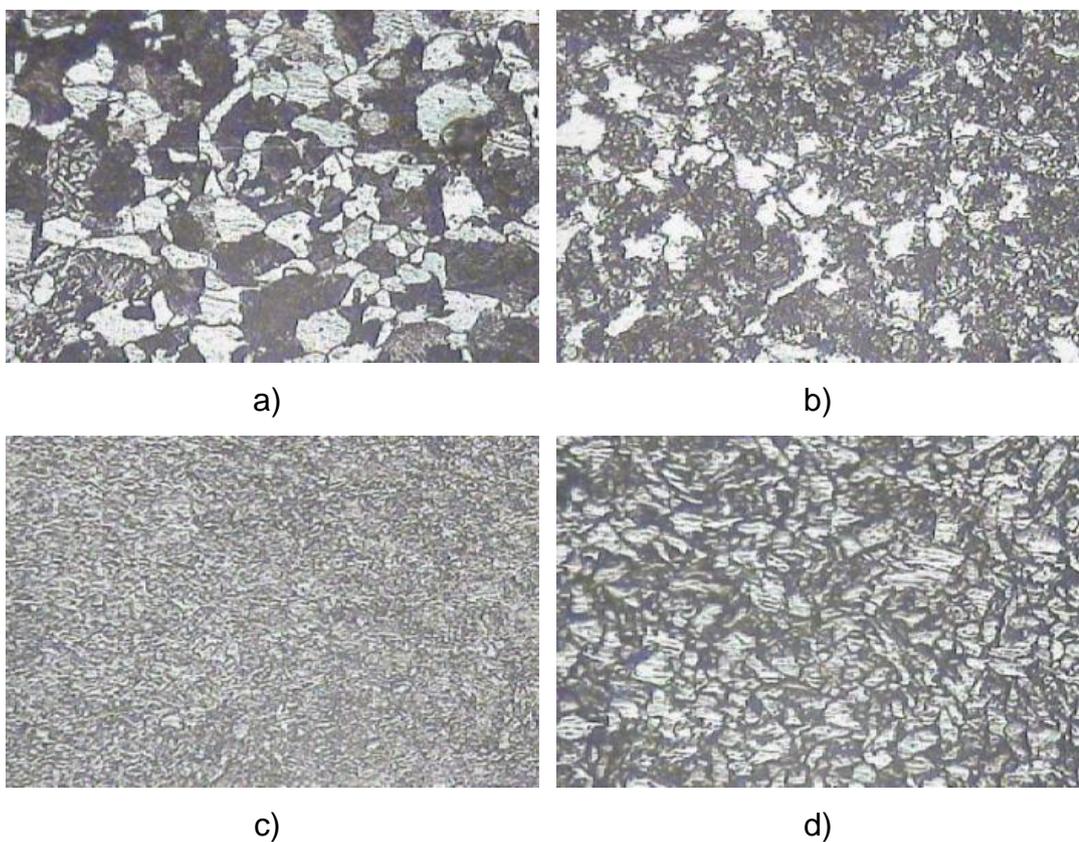


Figura No. 85: Metalografías del procedimiento S02 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) Matriz ferrítica perlítica de grano fino y d) Matriz ferrítica perlítica.

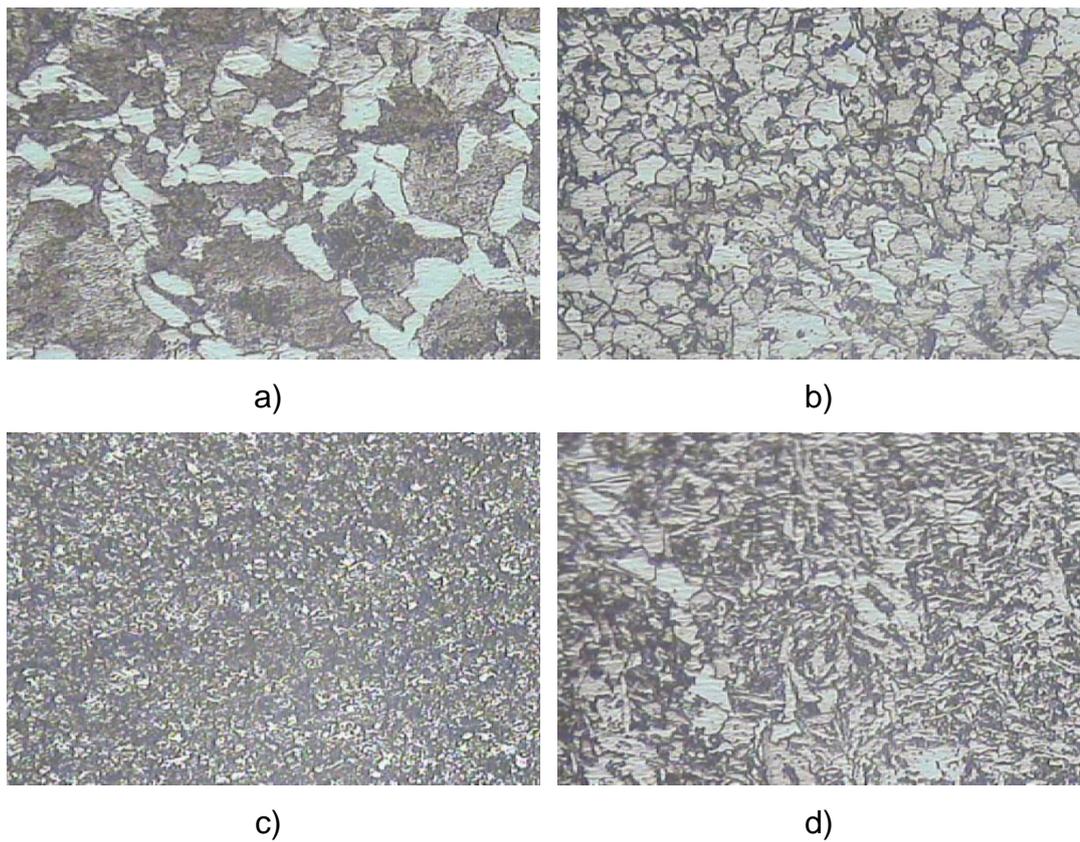
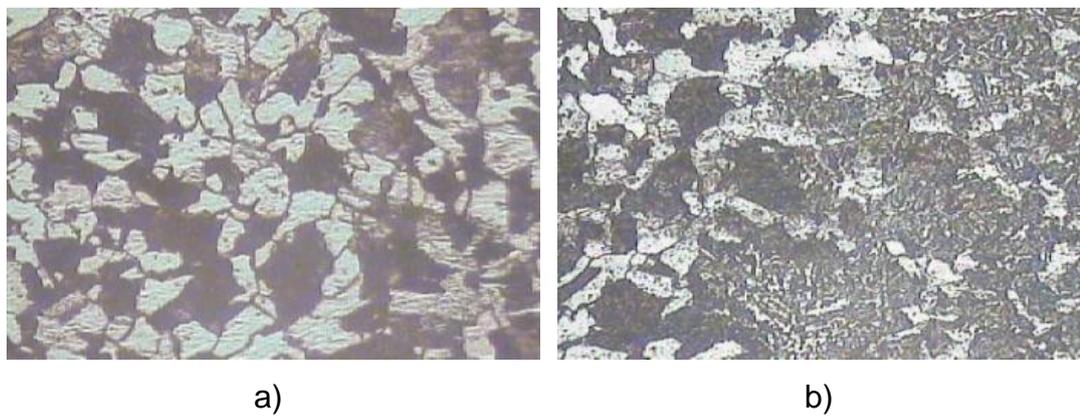


Figura No. 86: Metalografías del procedimiento S03 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) Matriz ferrítica perlítica de grano fino y d) Matriz ferrítica perlítica.



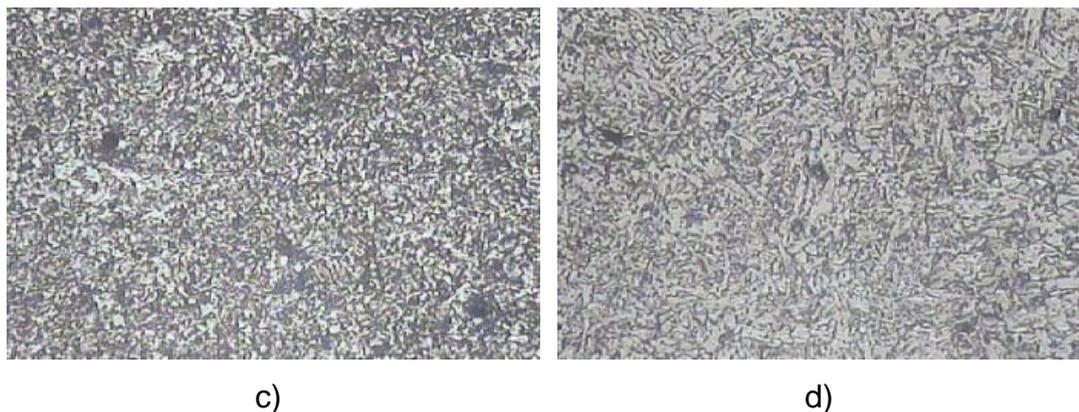


Figura No. 87: Metalografías del procedimiento S04 a) Matriz ferrítica con islas de perlita, b) Zona de transición, c) matriz perlítica ferrítica de grano fino y d) Perlita gruesa.

4.5. ANALISIS DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE WPS

Para realizar este análisis se tomara en cuenta el procedimiento empleado actualmente por la industria petrolera, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos destructivos y además los tiempos de ejecución de cada uno.

4.5.1. ANALISIS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Al realizar los ensayos destructivos se identificó que procedimientos cumplían con los valores máximos y mínimos decretados tanto por el código BPVC ASME Sección IX, como también la especificación API 6A y la normativa NACE MR0175. Estos resultados se encuentran resumidos en la siguiente tabla.

Tabla No. 30: Resultados de los WPS's

Procedimiento	Tracción	Doblado Lateral	Impacto	Dureza	Metalografías
S01	Aprueba	Aprueba	Aprueba	Aprueba	Aprueba
S02	Aprueba	Aprueba	Reprueba	Aprueba	Aprueba
S03	Reprueba	Aprueba	Aprueba	Reprueba	Aprueba
S04	Aprueba	Aprueba	Aprueba	Reprueba	Aprueba

Al observar en conjunto todos los ensayos realizados el único procedimiento que cumple con todos los ensayos es el procedimiento S01, siendo descartados los demás procedimientos, además también se observa que el procedimiento que se está usando actualmente no está cumpliendo con los estándares de calidad determinados por el código BPVC ASME Sección IX, la especificación API 6A y la norma NACE MR0175, por lo cual es necesario adoptar el procedimiento S01.

4.5.2. GENERACIÓN DE WPS FINAL

Para realizar el WPS hay que tomar en cuenta QW-200.1, donde determina como se debe elaborar el mismo, además se debe tomar en cuenta el formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX, en QW-482, en el cual está dividido en nueve secciones las cuales son:

- Junta QW-402
- Material base QW-403
- Material de aporte QW-404
- Posición QW-405
- Pre calentamiento QW-406
- Post calentamiento QW-407
- Gas QW-408
- Características eléctricas QW-408
- Técnica QW-409

En estas secciones también hay que tomar en cuenta las variables esenciales y no esenciales que están dictadas en QW-290. A continuación se muestra el ejemplo sugerido en QW-482.

QW-482 FORMATO SUGERIDO PARA ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTO DE SOLDAR (WPS)
(Vea QW-200.1, Sección IX, Código de Calderas y Recipientes de Presión de la ASME)

Nombre de la Compañía _____ Por: _____																																								
Especificación de Procedimiento de Soldar No. _____ Fecha _____ No.(s) de QPR que Apoya (n) _____																																								
Revisión No. _____ Fecha _____																																								
Proceso(s) de Soldar _____ Tipo(s) _____ <small>(Automático, Manual, Con Máquina, o Semi-Auto.)</small>																																								
<p>JUNTAS (QW-482)</p> <p>Diseño de Junta _____</p> <p>Respaldo (Si) _____ (No) _____</p> <p>Material de Respaldo (Tipo) _____</p> <p><input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Metal Que No Se funde</p> <p><input type="checkbox"/> No Metálico <input type="checkbox"/> Otro</p> <p>Los Croquis, Dibujos de Producción Símbolos de Soldadura ó Descripción Escrita deberán mostrar el arreglo general de las partes que se van a soldar. En donde sea aplicable, se puede especificar el espaciamento arreglo de raíz y los detalles de la ranura de soldar.</p> <p>(A la opción del Fabte., se pueden anexar croquis para ilustrar diseño de junta, capas de soldadura y serie de cordones, p. ej. para procedimientos de tenacidad de muesca, para procedimientos de procesos múltiples, etc.</p>	<p>Detalles</p>																																							
<p>*METALES BASE (QW-403)</p> <p>No. P. _____ No. Grupo _____ a No. P. _____ No. Grupo _____</p> <p style="text-align: center;">O</p> <p>Especificación, Tipo y Grado _____</p> <p>a Especificación, Tipo y Grado _____</p> <p style="text-align: center;">O</p> <p>Análisis Quím. y Prop. Mec. _____</p> <p>a Análisis Quím. y Prop. Mec. _____</p> <p>Orden de Espesores:</p> <p style="padding-left: 20px;">Metal Base: Ranura _____ Filete _____</p> <p style="padding-left: 20px;">Orden de Deám. de Tubo: Ranura _____ Filete _____</p> <p>Otros _____</p>																																								
<p>*METALES DE APORTE (QW-404)</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>No. Espec. (SFA) _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>No. AWS (Clase) _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>No. F _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>No. A _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tamaño de Metales de Aporte _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Metales de Soldadura</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Orden de Espesores:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 40px;">Ranura _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 40px;">Filete _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fundente de Electrodo (Clase) _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Nombre Comercial de Fundente _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Met. Inserto Consumible _____</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Otros _____</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		No. Espec. (SFA) _____			No. AWS (Clase) _____			No. F _____			No. A _____			Tamaño de Metales de Aporte _____			Metales de Soldadura			Orden de Espesores:			Ranura _____			Filete _____			Fundente de Electrodo (Clase) _____			Nombre Comercial de Fundente _____			Met. Inserto Consumible _____			Otros _____		
No. Espec. (SFA) _____																																								
No. AWS (Clase) _____																																								
No. F _____																																								
No. A _____																																								
Tamaño de Metales de Aporte _____																																								
Metales de Soldadura																																								
Orden de Espesores:																																								
Ranura _____																																								
Filete _____																																								
Fundente de Electrodo (Clase) _____																																								
Nombre Comercial de Fundente _____																																								
Met. Inserto Consumible _____																																								
Otros _____																																								

*Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.

Figura No. 88: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX
(Frontal)
(The Amercias Society of Mechanical Engineers, 2013)

QW-482 (Respaldo)

		WPS No. _____		Rev. _____																
POSICIONES (QW-405) Posición(es) de Ranura _____ Progresión de Soldadura: P. Arriba _____ P. Abajo _____ Posición(es) de Filete _____		TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR A SOLDADURA (QW-407) Orden de Temperaturas _____ Orden de Tiempos _____																		
PRECALENTAMIENTO (QW-406) Temp. Prealent. Min. _____ Temp. Entre Pasos. Máx. _____ Mantenancia de Prealent. _____ (Calentamiento continuo o especial donde sea aplicable se deberá registrar)		GAS (QW-408) <table style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: center;">Composición en por ciento</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">Gas(es)</th> <th style="text-align: center;">(Mezcla)</th> <th style="text-align: center;">Gasto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="border: none;">Protección</td> <td style="border: none;">_____</td> <td style="border: none;">_____</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">Arrastre</td> <td style="border: none;">_____</td> <td style="border: none;">_____</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">Respaldo</td> <td style="border: none;">_____</td> <td style="border: none;">_____</td> </tr> </tbody> </table>				Composición en por ciento			Gas(es)	(Mezcla)	Gasto	Protección	_____	_____	Arrastre	_____	_____	Respaldo	_____	_____
Composición en por ciento																				
Gas(es)	(Mezcla)	Gasto																		
Protección	_____	_____																		
Arrastre	_____	_____																		
Respaldo	_____	_____																		
CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409) Corriente CA ó CD _____ Polaridad _____ Amps (Orden) _____ Volts (Orden) _____ (El orden de amps y volts se deberá registrar para cada tamaño de electrodo, posición, y espesor, etc. Esta información se puede poner en lista en forma tabular similar a la que se muestra abajo.) Tamaño y Tipo de Electrodo de Tungsteno _____ (Tungsteno Puro, Toriado 2% etc.) Modo de Transfer. Metal para GMAW _____ (Arco pulver., arco corto circ, etc.) Orden veloc. aliment. Electrodo de Alambre _____																				
TECNICA (QW-410) Cordón long. ó Cordón de vaivén _____ Tamaño Orificio o de Taza de Gas _____ Limpieza Inicial y Entre Pasos (Cepillado, Esmerilado, etc.) _____ Método de Cincelado Posterior _____ Oscilación _____ Tubo de Contacto a Distancia de Trabajo _____ Paso Múltiple ó Simple (por lado) _____ Electrodo Múltiples ó Simple _____ Velocidad de Recorrido (Orden de) _____ Martillado _____ Otros _____																				
Capa(s) de Soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Orden Volt.	Orden de Veloc. Recorrido	Otros (p. ej., Notas, Comentarios, Adición de Alambre Caliente, Técnica, Angulo de Soplete, Etc.)												
		Clase	Diám.	Tipo Polar	Orden Amp.															

Figura No. 89: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX (Trasera)
 (The Americas Society of Mechanical Engineers, 2013)

El WPS del procedimiento S01 se encuentra elaborado en el ANEXO 4, donde también se encuentran los WPS's de los demás procedimientos utilizados para la elección de la mejor alternativa como también el procedimiento de comparación el cual se utiliza actualmente en la industria petrolera ecuatoriana.

4.5.3. GENERACIÓN DE PQR

Para realizar el PQR hay que tomar en cuenta QW-200.2, donde determina con que información es necesario llenar el mismo, además se debe tomar en cuenta el formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX, en QW-483, en el cual está dividido en nueve secciones las cuales son:

- Junta QW-402
- Material base QW-403
- Material de aporte QW-404
- Posición QW-405
- Pre calentamiento QW-406
- Post calentamiento QW-407
- Gas QW-408
- Características eléctricas QW-408
- Técnica QW-409

Sin embargo también se requiere los resultados de los ensayos realizados a las probetas, los cuales deben ser certificados por un laboratorio, siendo el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE para este caso.

En el PQR se debe de evidenciar las variables esenciales y no esenciales delimitadas en el WPS. A continuación se muestra el ejemplo sugerido en QW-483.

QW-483 FORMATO SUGERIDO PARA REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO (PQR)
(Vea QW-200.2, Sección IX, Código de Calderas y Recipientes de Presión de ASME)
Registro Condiciones Reales Usadas para Soldar Muestras de Prueba.

Nombre de la Compañía _____
 Registro de Calificación de Procedimiento No. _____ Fechas _____
 WPS No. _____
 Proceso(s) de Soldar _____
 Tipos (Manual, Automático, Semiauto.) _____

JUNTAS (QW-402) Diseño de Ranura de Muestra de Prueba (Para calificaciones en combinación, el espesor de metal de soldadura depositado se registrará para cada metal de aporte o proceso usado.)																			
METALES BASE (QW-403) Espec. Material _____ Tipo ó Grado _____ No. P- _____ a No. P- _____ Espesor de Muestra de Prueba _____ Diámetro de Muestra de Prueba _____ Otros _____	TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR A SOLDADURA (QW-407) Temperatura _____ Tiempo _____ Otros _____																		
METALES DE APORTE (QW-404) Especificación de SFA _____ Clasificación de AWS _____ Metal de Aporte No. F- _____ Análisis Metal Soldadura No. A- _____ Tamaño de Metal de Aporte _____ Otros _____ Espesor de Metal de Soldadura _____	GAS (QW-408) <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2" style="text-align: center;">Composición en Por Ciento</th> <th rowspan="2">Gasto</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">Gas(es)</th> <th style="text-align: center;">(Mezcla)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Arrastre</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Respaldo</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> </tbody> </table>		Composición en Por Ciento		Gasto	Gas(es)	(Mezcla)	Protección	_____	_____	_____	Arrastre	_____	_____	_____	Respaldo	_____	_____	_____
	Composición en Por Ciento		Gasto																
	Gas(es)	(Mezcla)																	
Protección	_____	_____	_____																
Arrastre	_____	_____	_____																
Respaldo	_____	_____	_____																
POSICION (QW-405) Posición de Ranura _____ Progresión de Soldadura (para Arriba, Para Abajo) _____ Otros _____	CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409) Corriente _____ Polaridad _____ Amps. _____ Volts. _____ Tamaño Electrodo de Tungsteno _____ Otros _____																		
PRECALENTAMIENTO (QW-406) Temp. Pre calentamiento _____ Temp. Entre Pasos _____ Otros _____	TECNICA (QW-410) Velocidad de Recorrido _____ Cordón Corrido ó de Vaivén _____ Oscilación _____ Multipasos o Paso Simple (por lado) _____ Electrodo Múltiples ó Simple _____ Otros _____																		

Esta forma - en inglés - (E00007) se puede obtener de Orden Dept., ASME, 22 Law Drive, Box 2300, Fairfield, NJ 07007-2300

Figura No. 90: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX
(Frontal)
(The Americas Society of Mechanical Engineers, 2013)

QW-483 (Respaldo)

Prueba de Tensión (QW-150)

PQR No. _____

Espécimen No.	Ancho	Espesor	Area	Carga Ultima total lb.	Esfuerzo Unitario Ultimo lb/pulg. ²	Tipo de Falla y Ubicación

Pruebas de Doblez Guiado (QW-160)

Tipo y Figura No.	Resultado

Pruebas de Tenacidad (QW-170)

Espécimen No.	Ubicación de Muesca	Tipo Muesca	Temp. Prueba	Valores		Impacto Mils.	Piso de Gota	
				Fl. lbs.	% Corte		Rotura	Sin Rotura

Prueba de Soldadura Con Filete (QW-180)

Resultado- Satisfactorio: Si _____ No _____ Penetración dentro Metal Base: Si _____ No _____

Macro - Resultados _____

Otras Pruebas

Tipo de Prueba _____

Análisis de Depósito _____

Otros _____

Nombre del Soldador _____ No. Reloj _____ Sello No. _____

Pruebas conducidas por: _____ Laboratorio de Pruebas No. _____

Certificamos que las declaraciones de este registro son correctas y que las soldaduras de prueba fueron preparadas , soldadas y probadas de acuerdo con los requerimientos de la Sección IX del Código de ASME.

Fabricante _____

Fecha _____ Por _____

(Los detalles de registro de pruebas son sólo ilustrativos y se pueden modificar para conformar con el tipo y número de pruebas requeridos por el Código.)

Figura No. 91: Formato sugerido por el código BPVC ASME Sección IX (Trasera) (The Americas Society of Mechanical Engineers, 2013)

El PQR del procedimiento S01 se encuentra elaborado en el ANEXO 14, donde también se encuentran los PQR's de los demás procedimientos los

cuales no pasaron la pruebas respectivas, por lo cual no pueden ser calificados.

CAPITULO V

ANALÍSIS FINANCIERO

5.1. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN WPS CALIFICADO

El análisis financiero de la propuesta presentada se centra en una descripción general de los costos de materiales y mano de obra, además del estudio previo realizado.

5.1.1. COSTOS DE CONSUMIBLES Y MATERIAL BASE

Para establecer los costos de consumibles es necesario determinar el peso de material de aporte, el cual depende del tipo de junta empleada y está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Peso de MA} = \frac{AJ * LJ * \rho_{\text{Acero}}}{E} \quad (9)$$

Donde AJ representa el área transversal de la junta soldada la cual es 0.000486 m², LJ es la longitud de la junta soldada la cual es 0.28 m, ρ_{Acero} es la densidad del acero que es 7850 kg/m³ y E que es la eficiencia de deposición de material de aporte que para el proceso SMAW es de 70%.

Tabla No. 31: Costos de Consumibles.

ITEM	CANTIDAD	COSTO
Material base AISI 4130	204 kg	1738.08
Electrodo E7018	1.52 kg	6.84
Electrodo E9018	4.57 kg	29.70
GLP	15 kg	22.27
TOTAL		1796.89

5.1.2. COSTOS DE ELECTRICIDAD

Otro factor a tener en consideración es el consumo eléctrico, tanto de la soldadora como de iluminaria y herramientas utilizadas. En el consumo eléctrico producido por la soldadora se debe tomar en cuenta las pérdidas de energía dadas por la soldadora como también la máxima carga, teniendo esto en consideración la relación para determinar el consumo es:

$$kWh = \frac{\text{Voltios} * \text{Amperios} * \text{Factor de Potencia} * \text{Tiempo(horas)}}{1000} \quad (10)$$

Sin embargo para cualquier proceso de soldadura por fusión se puede considerar como 4 kWh por cada kilogramo de material depositado (Naranjo, 2008).

También se debe considerar el precio oficial de la energía en Ecuador, el cual es de 9.33 ctvs por cada kWh.

Tabla No. 32: Costos de Electricidad.

ITEM	CANTIDAD	COSTO
Amoladora	2.3 kWh	0.1866
Soldadora	24.36 kWh	2.2727
Lámparas	0.05 kWh	0.0046
TOTAL		2.4639

5.1.3. COSTOS DE MANO DE OBRA

El costo de mano de obra está definido como la retribución económica a un esfuerzo físico o mental, en este caso se debe tomar en cuenta la mano

de obra del inspector que realiza la calificación, el soldador el cual debe ser hábil y además los ayudantes de cada uno de ellos.

Tabla No. 33: Costos de Mano de Obra.

ITEM	CANTIDAD	COSTO
Inspector	2 días	250
Soldador	2 días	180
Ayudante del Inspector	2 días	100
Ayudante del Soldador	2 días	50
TOTAL		580

Como se trata de una calificación de un WPS, los soldadores cobran alrededor de 90 dólares el día de trabajo, además siempre deben de estar acompañados de un ayudante que les provea de lo necesario y haga la limpieza de la escoria después de cada pase.

5.1.4. COSTOS DE MOVILIZACIÓN, HOSPEDAJE Y ALIMENTACIÓN

Los costos de movilización en este proyecto abarcan la movilización del inspector y del ayudante durante el tiempo que se demore la calificación.

Tabla No. 34: Costos de Movilización, hospedaje y alimentación.

ITEM	CANTIDAD	COSTO
Pasajes Quito-Coca	2 pasajes	362.82
Movilización Hotel-Campamento	4 viajes	28
Hospedaje	2 días	84
Alimentación	2 días	36
TOTAL		510.82

5.1.5. COSTOS DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

En los costos de fabricación de las probetas se analizara las horas hombre-máquina utilizadas, además se tomara en cuenta un valor de 20 dólares la hora hombre-máquina la cual es un valor referencial-

Tabla No. 35: Costos de Mano de Obra.

ITEM	CANTIDAD	COSTO
Fresado de cupones	8 horas	160
Corte de cupones	8 horas	160
Manufactura de probetas de Tracción	4 horas	80
Manufactura de probetas de Impacto	2 horas	40
TOTAL		440

5.1.6. COSTOS DE ENSAYOS

Todos los ensayos fueron realizados en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, cuyos costos están detallados a continuación.

Tabla No. 36: Costos de Ensayos.

ITEM	CANTIDAD	COSTO
Ensayos de tracción	8 ensayos	200
Ensayos de doblado lateral	16 ensayos	320
Ensayos de impacto	16 ensayos	400
Ensayo de dureza	480 indentaciones	720
Metalografías	16 metalografías	320
TOTAL		1960

5.1.7. COSTOS DE CALIFICACIÓN DEL WPS

El costo de calificación de soldadura está determinado en un costo de 1500 dólares, debido a que se trata de un procedimiento experimental, pero que garantiza las propiedades mecánicas, y además está bajo el código BPVC ASME Sección IX y especificación API 6A.

5.2. COSTOS TOTAL DE LA INVERSIÓN PARA LA CALIFICACIÓN DEL WPS

El costo total de la inversión que se necesita para la calificación del WPS es la suma de los costos detallados anteriormente, además también hay que detallar un costo extra, el cual es la capacitación, tanto de los soldadores como de los responsables del control de calidad de la soldadura, ya que estos deben estar familiarizados con el nuevo procedimiento para poderlo utilizar adecuadamente.

Tabla No. 37: Costos de Ensayos.

ITEM	COSTO
Costo consumibles y material base	1796.89
Costo de la electricidad	2.4639
Costo de mano de obra	580
Costo de movilización, hospedaje y alimentación	510.82
Costo de fabricación de las probetas	440
Costo de ensayos	1960
Costo de calificación del WPS	1500
Costo de capacitación	1000
TOTAL	7798.28

Para realizar la implementación de este procedimiento de soldadura las empresas dedicadas a este servicio deben desembolsar una cantidad de 7798.28 dólares, lo cual le permitirá soldar con este nuevo procedimiento todos los cabezales petroleros y árboles de navidad que fabrican bajo la especificación API 6A.

5.3. TIEMPOS DE PRODUCCIÓN

Por otro lado hay que analizar los tiempos de ejecución del procedimiento S01, con respecto al procedimiento actual utilizado por la industria petrolera ecuatoriana ya que se debe determinar las diferencias en los tiempos de producción de los mismos.

Tabla No. 38: Tiempos de ejecución.

	S01	S03
Pre calentamiento	20 min	20 min
Ejecución de la Soldadura	30 min	90 min
Post calentamiento	120 min	N/A
Enfriamiento	240 min	60 min

La ejecución del procedimiento S01 es más lenta que el procedimiento S03, sin embargo este tiempo puede ser compensado por el postcalentamiento, ya que el procedimiento S01 no lo necesita, además el enfriamiento se lo puede realizar al medio ambiente, mientras que el procedimiento S03 necesita ser enfriado lentamente y esto se logra mediante fajas térmicas o cal, lo cual aumenta el tiempo de espera, lo cual implica costos a la empresa. Por este motivo la mejor elección que garantiza las

propiedades mecánicas y además favorece a los tiempos de producción es el procedimiento S01.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El acero AISI 4130 posee aleantes que pueden ser perjudiciales para la soldadura ya que la presencia de estos generan fisuras al momento de templarse, también por su contenido de carbono puede existir la presencia de martensita, sin embargo al momento de realizar los ensayos NDT se descartaron la presencia de fisuras superficiales o sub superficiales, y con las metalografías se descartó la presencia de martensita.
- Con una aportación de calor de 5.45 KJ/cm y una velocidad de avance del soldador de 33 cm/min se obtiene que la resistencia a la tracción es de 94,997 Ksi, que está sobre el valor mínimo de la norma el cual es de 85 Ksi. También se obtuvo que la energía que es capaz de absorber la soldadura es de 41.2 J que de igual manera es superior al mínimo establecido de la norma que es de 20 J, presenta una gran ductilidad y por último los valores de dureza tuvieron como valor máximo 250 HV siendo este mismo el valor máximo aceptado por la norma, por lo cual el procedimiento S01 es el más adecuado y el que cumple con toda las condiciones necesarias según el código BPVC ASME Sección IX y especificación API 6A.
- Al efectuar cualquiera de los procedimientos realizados se tiene la ventaja que no es necesario un PWHT, debido a que estos procedimientos han logrado satisfacer los requisitos de las normas y códigos, lo cual es favorable si esta soldadura se hace en campo.

- Para realizar la implementación de este procedimiento de soldadura es necesario realizar una inversión de 7798.28 dólares, los cuales cubren los costos de mano de obra, material base, material de aporte y la calificación dada por el inspector de soldadura.
- La técnica de revenido puede ser utilizada para generar procedimientos, sin embargo es necesario controlar adecuadamente el aporte de calor para que brinde los resultados deseados, ya que una leve variación en los parámetros de soldadura puede alterar las propiedades mecánicas de la junta soldada.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se debe realizar un control permanente del soldador con la finalidad de que mantenga los parámetros de soldadura a lo largo de todo el proceso de soldadura para que la técnica brinde los resultados deseados.
- Manufacturar las probetas evitando procesos de corte con aportación térmica tales como corte Oxiacetilénico o el corte con Plasma, ya que estos pueden afectar la metalurgia del material y por ende sus propiedades mecánicas.
- Es necesario realizar una adecuada capacitación a los soldadores e inspectores de soldadura para que el procedimiento se realice adecuadamente, además es necesario implementar medios adecuados para recalentar los electrodos, ya que si no están adecuadamente secos estos van a tender a fisurarse por la presencia del hidrogeno remanente.

BIBLIOGRAFÍA

- American Petroleum Institute. (2004). API 6A Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. Washington D.C.: API.
- American Society for Testing and Materials. (1995). ASTM E208 Standard Test Method for Conducting Drop Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels. ASTM.
- American Society for Testing Materials. (1995). ASTM E23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. United State of American: ASTM.
- ASM. (2004). ASM Metals Handbook "Metallographya and microstructure" (Vol. Volumen 9). United States.
- ASM International. (1993). Welding Brazing and Soldering. United States of America: ASM International.
- ASTM. (1977). ASTM A370 Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Washington: American Society for Testing and Materials.
- ATTAR Advanced Technology Testing and Research. (4 de Marzo de 2014). Post Weld Heat Treatment Training. Obtenido de <http://www.attar.com.au/Post-Weld-Heat-Treatment-Training/2/block-details.aspx>
- AZOM. (4 de Marzo de 2014). AISI 4130 Alloy Steel (UNS G41300) Mechanical Properties. Obtenido de <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6742#4>
- Callister, W. D. (2007). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona: Reverté S.A.
- Clarke, D. M. (4 de Marzo de 2014). Vickers Hardness Test of Case Hardened Steel. Obtenido de http://en.wikipedia.org/wiki/File:Case_hardened_steel-vickers_hardness_test.png
- Cleiton, C. (2009). Evaluation of AISI 4140 Steel Repair Without Post-Weld Heat Tratment. ASM International, 324-331.
- EcuRed. (27 de Abril de 2014). EcuRed. Obtenido de <http://www.ecured.cu/index.php/Martensita>
- Glachino, J. W., & Weeks., W. (2007). Técnica y práctica de la soldadura. Barcelona, España: REVERTÉ. S.A.
- Horwitz, H. (1967). Soldadura, Aplicaciones y practica. México: Alfaomega Grupo Editor.

- Jeffus, L. (2009). Soldadura. Principios y aplicaciones (Quinta Edición ed.). (S. Traducciones Vox Populi, Trad.) Madrid, España: Parainfo.
- Laufgang, S. G. (2006). Tratamiento Térmico de Soldadura. TERMO SOLDEX S.A.
- MISSION PETROLEUM S.A. (4 de Marzo de 2014). Productos. Obtenido de <http://www.mission-petroleum.com/productos.htm>
- Naranjo, C. R. (2008). Tecnología de la Soldadura. Sangolquí.
- Pilgarín, E. H. (2009). Efecto de la técnica de pases de revenido en las propiedades mecánicas del acero ASTM A743: Grado CA6NM. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Steel Founders Society of America and ASM International. (1995). Steel Casting Handbook. United States of America: ASM International.
- The Americas Society of Mechanical Engineers. (2013). Código ASME BPVC Sección IX "Welding, Brazing and Fusing Qualifications" (Vol. IX). Nueva York, Estados Unidos: ASME.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2007). Código ASME BPVC Sección II "Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals". Nueva York, Estados Unidos: ASME.
- Tupiza, C. (2011). Diseño de una casa sismo resistente de dos niveles en estructura metálica. Quito: EPN.
- Universidad Politécnica de Valencia. (5 de Abril de 2014). Ciencia de Materiales. Obtenido de http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13_2_2.html
- Welding Technology Institute of Australia. (2006). Temper Bead Welding. WTIA, 7.