



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE SOLDABILIDAD DE ACEROS USADOS EN ACCESORIOS DE COMPLETACIÓN DE POZOS PETROLEROS BAJO LA NORMA ASME-BPVC SECTION IX

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

VACA TIPANTUÑA DAVID ALEJANDRO

david.vaca01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO

homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **DAVID ALEJANDRO VACA TIPANTUÑA**, bajo mi supervisión.

Ing. Homero Barragán, M. Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

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

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

David Alejandro Vaca Tipantuña

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a mis padres, ellos han sido el apoyo incondicional y bendición que Dios a puesto en mi vida.

David Vaca

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la salud y vida para aprender sobre la ciencia y formar un camino dentro de su voluntad.

A mis padres Carlos y Leonor, por siempre apoyarme a superar los retos de la vida siendo ellos mi inspiración para trabajar por lo que quiero y siempre dar lo mejor de mí.

A la querida Escuela Politécnica Nacional, por formar buenos profesionales gracias a sus excelentes profesores quienes nos han brindado de su conocimiento y experiencia.

A la mejor Facultad del mundo Ingeniería Mecánica, por ofrecerme tantos retos y oportunidades, así como un buen compañerismo que han hecho de mí una persona que aprecia el trabajo, esfuerzo y valor de las personas.

Al Ingeniero Homero Barragán, por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de titulación bajo su dirección y tutela, siempre estuvo dispuesto a cubrir cualquier duda y sugerencia.

Al Ingeniero Gabriel Velasteguí, por su gran ayuda brindada cuando tenía dudas. Le agradezco por su tiempo y la oportunidad de haber formado parte del laboratorio de soldadura y su ambiente de trabajo.

Al mejor soldador que conozco Jorge Guzmán, con quien formamos una amistad desde que realicé mis prácticas en el laboratorio. Una persona que no se guarda nada y muestra su sinceridad.

A la empresa SERTECPET S.A. por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de realizar mis pasantías profesionales y mi trabajo de titulación.

A la Planta de Producción de Sertecpet, por enseñarme sobre la industria del petróleo y gas. Además de conocer a sus excelentes trabajadores, los cuales me compartieron de su conocimiento y amistad.

David Vaca

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Aceros Aleados.....	3
1.1.1 Efectos de los elementos aleantes en el acero.....	3
1.1.2 Designación de los Aceros Aleados.....	4
1.2 Clasificación de los Aceros Aleados.....	5
1.2.1 Aceros de alta aleación.....	5
1.2.2 Aceros de baja aleación.....	5
1.3 Aceros de baja aleación tratados térmicamente.....	7
1.3.1 Definición y Aplicaciones.....	7
1.3.2 Composición Química y Propiedades Mecánicas.....	7
1.3.3 Transformación y microestructura del acero.....	8
1.3.4 Tratamiento Térmico.....	10
1.4 Soldabilidad de los aceros aleados tratados térmicamente.....	13
1.4.1 Ensayos de Soldabilidad.....	15
1.4.2 Carbono Equivalente.....	15
1.4.3 Procesos de soldadura por arco eléctrico.....	16
1.4.4 Metalurgia en la Soldadura.....	18
1.4.5 Precalentamiento.....	22

1.4.6	Problemas en la soldadura.....	25
1.4.7	Material de aporte.....	28
1.4.8	Tratamiento térmico posterior a la soldadura	29
1.5	Selección del procedimiento de soldadura	31
2	METODOLOGÍA	33
2.1	Determinación de la susceptibilidad al fisuramiento	33
2.1.1	Susceptibilidad al fisuramiento en caliente	33
2.1.2	Susceptibilidad al fisuramiento en frío (enfriamiento).....	35
2.2	Procedimiento para la ejecución de la soldadura	36
2.3	Especificaciones del proceso de soldadura (WPS)	38
2.3.1	Material Base.....	38
2.3.2	Material de aporte.....	38
2.3.3	Diseño de la Junta.....	40
2.3.4	Posición de soldadura	41
2.3.5	Pre calentamiento.....	41
2.3.6	Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura	42
2.3.7	Variables Eléctricas	44
2.3.8	Técnica	44
2.4	Procedimiento Experimental.....	44
2.4.1	Datos recopilados de la soldadura.....	46
2.4.2	Equipos y materiales	48
2.5	Calificación de los procesos de soldadura de acuerdo con ASME BPVC	
	Sección IX.....	50
2.5.1	Ensayo radiográfico.....	50
2.5.2	Elaboración de las probetas para ensayos de doblado y tracción.....	52
2.5.3	Ensayo de Tracción.....	53
2.5.4	Ensayo de Doblado	55
2.5.5	Metalografías	57
2.5.6	Ensayo de dureza.....	57

3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.1	Resultados obtenidos	59
3.1.1	Ensayo radiográfico.....	59
3.1.2	Ensayo de doblado lateral.....	60
3.1.3	Ensayo de tracción	64
3.1.4	Ensayo metalográfico	66
3.1.5	Ensayo de dureza.....	74
3.2	Discusión de resultados.....	78
3.2.1	Ensayos para calificación de procedimiento.....	78
3.2.2	Ensayos complementarios	82
4	CONCLUSIONES	86
	Referencias Bibliográficas	88
	Anexos	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de fase Fe-Fe ₃ C	9
Figura 1.2 Efecto de la temperatura de revenido sobre el esfuerzo de tracción y la ductilidad de los aceros 4130, 4140 y 4340 (templado y revenido en aceite desde los 857°C por cuatro horas).	13
Figura 1.3 Ilustración de un diagrama de enfriamiento continuo para aceros	18
Figura 1.4 Relación entre el contenido de carbono y la dureza máxima en los aceros con microestructuras de 50 y 100% de martensita.	19
Figura 1.5 Diagrama de transformación por enfriamiento continuo del acero AISI 4340.	19
Figura 1.6 Partes constituyentes de una junta soldada para un acero estructural con 0.15% C.	20
Figura 1.7 (a) Diagrama de enfriamiento continuo en condiciones de soldadura; (b) Gráfico de dureza vs. Tiempo de enfriamiento Δt para un acero con C=0.18%, Mn=1.4%, Si=0.4%.	21
Figura 1.8 Diagrama de transformación por enfriamiento continuo del acero AISI 4140.	21
Figura 1.9 Difusión del hidrógeno desde el metal base hacia el HAZ durante la soldadura.	27
Figura 1.10 Efecto del hidrógeno en la resistencia a la tracción en una muestra.	28
Figura 1.11 Diagrama TTT para una composición hipoeutectoide (0.5 por ciento en peso de C) comparado con el diagrama de fases Fe-Fe ₃ C.	30
Figura 1.12 Diagrama de transformación isotérmica del acero AISI 4140 (C-0.37, Cr-0.95, Mn-0.77, Mo-0.21 Austenitizado a 843°C, tamaño de grano 7-8).	31
Figura 2.1 Dimensiones de los cupones elaborados para la calificación de soldadura según el código ASME IX (dimensiones en pulgadas).....	37
Figura 2.2 Diseño de la junta a tope (dimensiones en pulgadas).	41
Figura 2.3 Posiciones de soldadura para tubería.	41
Figura 2.4 Precalentamiento con llama	45
Figura 2.5 Soldadura de la tubería.....	45
Figura 2.6 Medición de la temperatura entre pases.	45
Figura 2.7 Limpieza entre pases con grata.	46
Figura 2.8 Cordón de soldadura acero AISI 4140	46
Figura 2.9 Programación de la temperatura del horno	46
Figura 2.10 Montaje de la tubería soldada.	52
Figura 2.11 Localización de las probetas en tubería para su sustracción.	53

Figura 2.12 Dimensiones de probetas para tracción.....	54
Figura 2.13 Maquinado de probetas para ensayos mecánicos.....	54
Figura 2.14 Probetas de tracción.....	54
Figura 2.15 Ensayo de tracción.....	55
Figura 2.16 Dimensiones de probetas para doblado (dimensiones en pulgadas).....	56
Figura 2.17 Dobladora Hidráulica.....	56
Figura 3.1 Inclusiones lineales.....	59
Figura 3.2 Inclusiones redondas.....	60
Figura 3.3 Falla por fatiga en la junta 2 (izquierda) y junta 4 (derecha).....	79
Figura 3.4 Perforación en el metal base en la junta 4.....	79
Figura 3.5 Fisura en el primer pase de la junta 4.....	80
Figura 3.6 Influencia del carbono en la resistencia a la tracción de las juntas soldadas.	80
Figura 3.7 Resistencia a la tracción de las juntas soldadas.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Análisis Químico.....	8
Tabla 1.2 Propiedades Mecánicas.....	8
Tabla 1.3 Condiciones de Tratamientos Térmicos para los aceros AISI 4140 y AISI 4145	11
Tabla 1.4 Propiedades de las juntas soldadas por arco eléctrico a la tracción transversal en los aceros de baja aleación después de un temple y revenido.....	17
Tabla 1.5 Temperaturas mínimas recomendadas para el precalentamiento y control entre pases de los aceros AISI de baja aleación.....	23
Tabla 1.6 Temperaturas de precalentamiento estimadas para el acero AISI 4140.....	24
Tabla 1.7 Problemas comunes en la soldadura y sus soluciones prácticas.....	25
Tabla 1.8 Clasificación de los electrodos usados en los aceros de baja aleación tratados térmicamente.....	29
Tabla 2.1 Composición química de los aceros AISI 4140 y 4145	34
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de los aceros AISI 4140 y 4145.....	34
Tabla 2.3 Características químicas y mecánicas del electrodo E-7010	39
Tabla 2.4 Características químicas y mecánicas del electrodo E-6010	39
Tabla 2.5 Características químicas y mecánicas del electrodo E-11018-M	40
Tabla 2.6 Temperaturas críticas aproximadas y puntos M_s/M_f para los aceros al carbono y aleados	43
Tabla 2.7 Junta 1 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4140 80 ksi	47
Tabla 2.8 Junta 2 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4140 80 ksi	47
Tabla 2.9 Junta 3 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4140 110 ksi	47
Tabla 2.10 Junta 4 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4145 120 ksi	48
Tabla 2.11 Junta 5 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4145 120 ksi	48
Tabla 2.12 Resumen de los parámetros de soldadura.....	48
Tabla 2.13 Características de la soldadora	49
Tabla 2.14 Características del horno	49
Tabla 2.15 Características del pirómetro	50
Tabla 2.16 Límites de espesores para la calificación del procedimiento y sus ensayos en las probetas	52
Tabla 3.1 Resultados del ensayo de doblado lateral.....	60
Tabla 3.2 Registro fotográfico de las probetas de doblado	61
Tabla 3.3 Resultados del ensayo de tracción	64
Tabla 3.4 Registro fotográfico de las probetas de tracción	65
Tabla 3.5 Análisis metalográfico (micrografía)	66

Tabla 3.6 Macrografía de la soldadura	72
Tabla 3.7 Valores de dureza de las probetas	74
Tabla 3.8 Dureza del metal base	77
Tabla 3.9 Respuesta mecánica de las juntas soldadas	81
Tabla 3.10 Calificación del ensayo radiográfico	82
Tabla 3.11 Microestructuras observadas en el microscopio metalográfico	83

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 Carbono equivalente	15
Ecuación 1.2 Fórmula empírica para determinar la mínima temperatura de precalentamiento	24
Ecuación 1.3 Fórmula de Seferian para aceros aleados.....	25
Ecuación 1.4 Relación del carbono equivalente con el espesor del material	25
Ecuación 2.1 Indicador de la susceptibilidad al fisuramiento en caliente	33
Ecuación 2.2 Fórmula empírica para determinar la temperatura de transformación de la martensita en los aceros.	42
Ecuación 2.3 Fórmula para el cálculo del aporte térmico	44

RESUMEN

El presente trabajo tuvo por objetivo el estudio y evaluación de la soldabilidad en el acero AISI 4140 usando el procedimiento de soldadura por arco eléctrico SMAW. Este acero es usado por la empresa SERTECPET S.A. para la construcción de herramientas de completación de fondo bajo la norma API Specification 19 AC. La característica principal de este material es que posee altos valores de resistencia a la tracción y límite de fluencia debido a la cantidad de carbono y elementos aleantes como el Cr y Mo lo que causa que este sea más susceptible al fisuramiento. El código ASME sección IX fue usado para la calificación del procedimiento de todas las juntas soldadas realizando ensayos mecánicos y no destructivos.

El método empleado fue investigativo y experimental ya que las variables de soldadura fueron seleccionadas en base a un estudio del material, sus propiedades tanto mecánicas como metalúrgicas y diagramas de tratamientos térmicos.

Los mejores resultados obtenidos fueron con el acero AISI 4140 (110 ksi) cuando se le aplica un precalentamiento por debajo de la temperatura de transformación martensítica (M_s), usando un material de aporte de bajo contenido de carbono e hidrógeno para evitar un exceso de precipitados en la zona afectada por el calor (ZAC) y aplicando un tratamiento térmico posterior a la soldadura con enfriamiento rápido. Además, este material es compatible con el acero AISI 4145 ya que el mismo procedimiento usado pudo satisfacer los requerimientos de la norma sin la aplicación de un tratamiento térmico posterior.

Palabras clave: acero, carbono, junta, precalentamiento, tratamiento térmico, soldabilidad.

ABSTRACT

The present work has aimed to study and evaluate the AISI 4140 steel weldability making use of the welding, shielded metal-arc (SMAW). This steel is employed by the company SERTECPET S.A. in order to manufacture bottom hole completion tools under the API specification 19-AC. The main properties of this material are the high tensile strength and yield strength values due to the amount of carbon and alloy elements such as Cr and Mo that have a significant effect on cracking susceptibility of the weld metal. The ASME Boiler and Pressure Code was adopted to provide the qualification of the procedures employed in welding AISI 4140 steel joints evaluating their mechanical performance with the application of mechanical and nondestructive tests.

An experimental method was used to resolve the welding variables, it has been based on the characteristics and properties of the material, also the heat treatment diagrams and metallurgy of the steel.

The best results were obtained with the AISI 4140 (110 ksi) steel when the preheat temperature is applied under the martensite transformation temperature (M_s), the filler metal ought to have a lower content of carbon and hydrogen to prevent the massive formation of carbide precipitates in the heat affected zone (HAZ) and it's recommendable the practice of post weld heat treatment (PWHT) with fast rate cooling if it's possible. The AISI 4145 was also compatible with the AISI 4140 steel and the procedure used in this investigation without the PWHT.

Keywords: carbon, heat treatment, joint, preheat, steel, weldability.

“ESTUDIO DE SOLDABILIDAD DE ACEROS USADOS EN ACCESORIOS DE COMPLETACIÓN DE POZOS PETROLEROS BAJO DE LA NORMA ASME-BPVC SECTION IX”

INTRODUCCIÓN

Los accesorios de completación en pozos dentro de la Industria del Petróleo y Gas cumplen el propósito de converger, bombear y controlar la producción e inyección de fluidos. El sistema de completación debe cumplir un trabajo adecuado, seguro y eficiente por lo que las herramientas o accesorios están construidos bajo las normas y procesos más rigurosos de la industria.

La empresa SERTECPET S.A. en su Planta de Producción realiza la manufactura de estas herramientas bajo ANSI/API-SPECIFICATION-19-AC, esta norma proporciona los criterios para el diseño, control y validación. En la especificación también se dictan los lineamientos para la soldadura resaltando que este procedimiento debe cumplir con la calificación de ASME-BPVC SECTION IX o una norma internacional o nacional equivalente.

El código ASME de calderas y recipientes a presión califica a los soldadores, operadores y procesos de soldadura una vez se demuestre que el procedimiento propuesto es capaz de producir juntas que cumplan con los requerimientos mecánicos solicitados para la aplicación.

La norma API-RECOMMENDED-PRACTICE-7G indica que los materiales utilizados en la manufactura de estas herramientas son los aceros AISI-4135, 4137, 4140 o 4145. Por lo general estos materiales no se sueldan al menos que exista un procedimiento adecuado para prevenir el fisuramiento o realizar un reacondicionamiento de las secciones en donde se realizó la soldadura.

Por lo tanto, se desea realizar un estudio que permita la elaboración de un procedimiento con las especificaciones de la soldadura para los aceros AISI-4140 con tres valores distintos de resistencia a la tracción, además de la unión entre los aceros AISI-4140 y AISI-4145 con el fin de comprobar la influencia de los procesos adicionales al soldar aceros que posean distintas composiciones químicas y propiedades mecánicas.

Objetivo general

Realizar un estudio de soldabilidad de aceros usados en accesorios de completación de pozos de petróleo y gas bajo la norma ASME-BPVC-SECTION-IX.

Objetivos específicos

- Determinar los parámetros y condiciones necesarias para soldar los aceros AISI 4140 y 4145 bajo la norma ASME-BPVC-Section-IX.
- Establecer los procedimientos especiales de acuerdo a los requisitos de la norma de aceptación de la soldadura.
- Analizar las propiedades mecánicas de las juntas soldadas mediante los ensayos de calificación de procesos para comprobar la soldabilidad de los materiales.
- Estudiar la caracterización metalúrgica de los aceros que fueron expuestos a un procedimiento especial.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Aceros Aleados

Los aceros aleados son aquellos que además del carbono contienen elementos como Ni, Cr, Mo, V, Si, Cu, Al, W, Ti, Co, Zr, Pb, B y otros, añadidos expresamente al acero para mejorar sus propiedades. Si el contenido global en estos elementos es inferior al 5 por ciento en peso, se habla de aceros de baja aleación, si los elementos aleantes superan el 5 por ciento en peso, se habla de aceros de alta aleación. (Shackelford F. James, 2007).

Los elementos que son agregados a la aleación de carbono proporcionan ciertos efectos finales en el acero, entre los cuales están: aumento en la resistencia, dureza, resistencia a la fatiga y tenacidad, mejora en las propiedades mecánicas tanto en altas como a bajas temperaturas, aumento en la templabilidad, incremento en la resistencia al desgaste y la corrosión.

En la fabricación de los aceros aleados se considera el comportamiento del elemento aleante ya que cuando un tercer elemento se añade al acero, el diagrama Fe-Fe₃C deja de ser un diagrama binario en condiciones de equilibrio químico y termodinámico. La presencia de un nuevo elemento en la aleación cambiará la posición del punto eutectoide y la localización de las zonas de austenita y ferrita en el diagrama de fases. Esto es importante cuando se quiere hacer un tratamiento térmico al acero aleado, puesto que se presentará un cambio en la temperatura crítica y por consecuencia un aumento o disminución de la temperatura de endurecimiento respecto de la correspondiente de un acero al carbono.

1.1.1 Efectos de los elementos aleantes en el acero

Los aceros forman uno de los grupos de aleaciones muy comunes en uso. La sinergia entre los elementos aleantes y el tratamiento térmico produce una variedad enorme de microestructuras y propiedades. En general, cuanto mayor porcentaje de estos elementos contengan los aceros, mayores serán sus propiedades particulares.

- **Carbono:** la cantidad de carbono tiene el efecto más significativo en las propiedades de los aceros, a mayor contenido de carbono, mayor será la templabilidad, dureza y resistencia al desgaste. La ductilidad, tenacidad y la soldabilidad disminuyen con el incremento del carbono.

- **Fósforo:** se encuentra en menor porción que el carbono y el azufre. El incremento del fósforo aumenta la resistencia, templabilidad, maquinabilidad y la resistencia a la corrosión,

pero disminuye la ductilidad y tenacidad. La disminución en ductilidad y tenacidad son mayores en los aceros con tratamiento térmico de revenido y temple de alto grado de carbono.

- **Azufre:** combinada con el manganeso mejora la maquinabilidad, reduce la resistencia al impacto y la ductilidad. La soldabilidad disminuye con el aumento de azufre en los aceros. Este elemento es muy perjudicial para la calidad de la superficie del acero, particularmente en los aceros de bajo contenido de carbono y manganeso. Por esta razón se debe verificar la cantidad de este elemento en la mayoría de los aceros.

- **Silicio:** es uno de los principales desoxidantes usados en la elaboración de los aceros, mejora la dureza, resistencia a la corrosión y disminuye la pérdida de histéresis magnética.

- **Cobre:** en cantidades apreciables es perjudicial para las operaciones de trabajo en caliente. El cobre afecta negativamente a la soldadura por forja, pero no afecta a la soldadura por arco y oxiacetilénica, además es perjudicial para calidad en el acabado de la superficie del acero. Sin embargo, el cobre mejora la resistencia a la corrosión atmosférica.

- **Cromo:** generalmente es agregado al acero para incrementar la resistencia a la corrosión y oxidación, incrementar la templabilidad, tenacidad y para mejorar la resistencia a las altas temperaturas o mejorar la resistencia a la abrasión en los compuestos de alto carbono. La naturaleza del cromo trabaja en conjunto con el molibdeno produciendo mejores propiedades mecánicas.

- **Níquel:** es usado como elemento aleante en los aceros de construcción ya que es un fortalecedor ferrítico. Este elemento permanece en la fase ferrítica. En combinación con el cromo, el níquel produce aceros aleados con mayor templabilidad, alta resistencia al impacto y la mayor resistencia a la fatiga que puede ser lograda en los aceros al carbono.

- **Molibdeno:** mejora la templabilidad, resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la temofluencia y dureza, minimiza la fragilización por revenido, es agregado al acero estructural en las cantidades desde 0.10 a 1.00%. Las aleaciones de aceros que contienen 0.15 a 0.30% de Mo muestran una susceptibilidad minimizada a la fragilización en el temple.

1.1.2 Designación de los Aceros Aleados

Para diferenciar a los aceros es importante conocer el sistema de designación de estas aleaciones. Existe un método establecido por el Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI

siglas en inglés para American Iron and Steel Institute) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE siglas en inglés para Society of Automotive Engineers) que se basa en un sistema numérico que indica de manera aproximada el contenido de los elementos importantes en el acero. La designación consta de cuatro o cinco dígitos, el primer dígito de ellos corresponde al tipo de acero:

- 1xxx: para los aceros al carbono.
- 2xxx: corresponde a los aceros al níquel.
- 3xxx: está referido para los aceros al níquel-cromo.
- 4xxx: correspondiente a los aceros al molibdeno.

El segundo dígito indica el porcentaje del elemento aleante; y los dos últimos indican el contenido de carbono en peso. Por ejemplo, el acero AISI 4130, es un acero al cromo-molibdeno con porcentajes Cr 0.50, 0.80 y 0.95; Mo 0.12, 0.20 y 0.30 y con un 0.30 por ciento en peso de carbono.

1.2 Clasificación de los Aceros Aleados

Dentro de los aceros aleados se puede hacer una clasificación según el porcentaje en peso del elemento significativo en la aleación, estos pueden ser los aceros de baja aleación (elementos aleantes < 5%) y los aceros de alta aleación (elementos aleantes >5%).

1.2.1 Aceros de alta aleación

Los aceros de alta aleación están definidos por su alto porcentaje de elementos aleantes. El acero inoxidable es un ejemplo de este grupo el cual contiene al menos un doce por ciento de cromo. El cromo entrega una capa delgada de óxido sobre la superficie del acero, también le da una amplia protección contra la erosión. Estos aceros son un poco más costosos que los aceros de baja aleación, a veces, por sus altos niveles de carbono y manganeso que son agregados para dar una naturaleza austenítica al acero. En las soldaduras de aceros de alta aleación la cantidad de nitrógeno podría ser aumentada para obtener mejores propiedades mecánicas de soldadura.

1.2.2 Aceros de baja aleación

Estos aceros contienen, como su nombre lo indica, pequeñas cantidades de la amplia variedad de elementos de aleación agregados a la misma para impartir ciertas propiedades especiales. La composición del metal soldado puede coincidir en general con el metal base,

o puede diferir significativamente dependiendo de las propiedades requeridas en la junta y el tratamiento térmico posterior a la soldadura si lo requiera.

Se pueden subdividir estos aceros en cuatro grupos de acuerdo con su resistencia, condición de tratamiento térmico o aplicaciones específicas.

- 1) Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA steels):** Comprende aquellos aceros que han sido diseñados para proveer mejores propiedades mecánicas, y gran resistencia a la corrosión atmosférica que los aceros al carbono convencionales. Estos aceros comúnmente no son considerados aceros aleados porque realmente son diseñados para alcanzar una propiedad mecánica específica en lugar de una composición química. La composición química de estos aceros puede variar dependiendo del espesor del producto que desee alcanzar un cierto requerimiento.

Los elementos aleantes en este acero refuerzan la fase ferrítica, promoviendo la tenacidad, y ayudando al control del tamaño de grano.

La fabricación de este acero es normalmente realizada en la condición de laminado para alcanzar sus propiedades mecánicas. Además, puede ser trabajado en condiciones térmicas de normalizado para lograr una dureza específica. El valor mínimo de resistencia a la fluencia de este acero está en el rango de 42 a 85 ksi, y el esfuerzo a la tracción está en el rango de 60 a 90 ksi.

La soldabilidad de la mayoría de los aceros de alta resistencia y baja aleación es similar a la de un acero revenido. El contenido de carbono equivalente se debe mantener en niveles bajos para una buena soldabilidad.

- 2) Aceros Templados y Revenidos (Q&T steels):** estos aceros son fabricados como su nombre lo indica en la condición térmica de templado y revenido con un esfuerzo de fluencia en el rango de 50 a 150 ksi dependiendo de su composición química, espesor y tratamiento térmico. El tratamiento térmico de la mayoría de estos aceros consiste en el austenitizado, templado y revenido. Algunos de estos aceros se consideran dentro de la clasificación de los aceros al carbono y otras aleaciones se encuentran dentro de la designación AISI.

Las estructuras soldadas fabricadas con estos aceros generalmente no necesitan un tratamiento térmico posterior a la soldadura, excepto un alivio de esfuerzos en situaciones especiales.

- 3) Aceros de baja aleación tratados térmicamente (HTLA steels):** la alta dureza de muchos aceros de baja aleación impide soldarlos en la condición de templado debido a sus tendencias al agrietamiento en frío.

El contenido de carbono de estos aceros generalmente se encuentra en el rango de 0.25 a 0.45%, comparado con el rango de los aceros templados y revenidos de 0.10 a 0.25%. Estos aceros normalmente son soldados en la condición de recocido o en el límite del temple para luego hacer un tratamiento térmico a toda la soldadura y alcanzar la resistencia y la dureza requerida.

- 4) Aceros al cromo-molibdeno (Cr-Mo steels):** los aceros aleados de esta familia contienen un porcentaje de cromo en el rango de 0.5 a 9% y un porcentaje de molibdeno de 0.5 a 1%. El contenido de carbono normalmente es menor del 0.20% para una buena soldabilidad, aunque las aleaciones tengan una alta tenacidad. El cromo le proporciona a la aleación una resistencia a la oxidación y corrosión, el molibdeno incrementa la resistencia a las elevadas temperaturas. Estos aceros son suministrados en la condición de recocidos, normalizados y revenidos. Los aceros del Cr-Mo son usados en la industria del petróleo y las plantas de generación de energía por vapor. Algunos de estos aceros se especifican con las normas ASTM.

1.3 Aceros de baja aleación tratados térmicamente

1.3.1 Definición y Aplicaciones

Es un acero de aleación cuyo contenido en peso de carbono está en el rango de 0.25 a 0.45%, tiene un uso importante en la industria petrolera, son usados en la fabricación de herramientas, recipientes con paredes muy largas y pesadas para los procesos de hidrotatamiento, su aleación cromo-molibdeno previene el daño del recipiente por las altas presiones que ejerce el hidrógeno.

Debido a su contenido de carbono, estos aceros pueden ser tratados térmicamente para elevar sus niveles de resistencia y dureza. Además, algunos de estos aceros tienen el contenido suficiente de aleantes para darle alta tenacidad. Esta combinación de carbono y elementos de aleación hace necesario la aplicación de un precalentamiento para producir buenas soldaduras. El control de las temperaturas de precalentamiento y entre pases deben ser controladas para el beneficio de la unión soldada, así como también para la zona afectada por el calor.

1.3.2 Composición Química y Propiedades Mecánicas

Dentro de la norma ASME Sección II “Especificaciones de Materiales Ferrosos parte A”, la composición química de la mayoría de los aceros de baja aleación se encuentra en algunas normas internacionales, una de estas es la ASTM A519-06 “Especificación Estándar para

la Tubería de Acero al Carbono y Acero Aleado”. Esta norma cubre los grados del carbono y elementos de aleación para la fabricación de tubería de acero.

En las tablas 1.1 y 1.2 se describen la composición química y propiedades mecánicas del acero AISI 4140 respectivamente.

Tabla 1.1 Análisis Químico

Grado Designación	Composición química en peso %							
	C	Mn	P(máx)	S(máx)	Si	Ni	Cr	Mo
4140	0.38- 0.43	0.75- 1.00	0.040	0.040	0.15- 0.35	...	0.80- 1.10	0.15- 0.25
4145	0.43- 0.48	0.75- 1.00	0.040	0.040	0.15- 0.35	...	0.80- 1.10	0.15- 0.25

(Fuente: ASTM A519, 2006)

Tabla 1.2 Propiedades Mecánicas

Grado Designación	Condición	Esfuerzo de fluencia		Último esfuerzo a la tracción		Elongación en 2 in o 50 mm (%)	Dureza Rockwell escala B
		ksi	Mpa	Ksi	Mpa		
4140	Laminado en caliente	90	621	120	855	15	100
	Trabajado en frío	100	689	120	855	10	100
	Recocido	60	414	80	552	25	85
	Normalizado	90	621	120	855	20	100

(Fuente: ASTM A519, 2006)

1.3.3 Transformación y microestructura del acero

El diagrama de fase de las aleaciones hierro-carbono que se muestra en la figura 1.1 es uno de los más importantes para el estudio del acero, se emplea para la representación de las transformaciones que experimentan los aceros al carbono con los cambios de temperatura, asumiendo que el calentamiento o enfriamiento de la mezcla se realiza lentamente para que los procesos de difusión se completen.

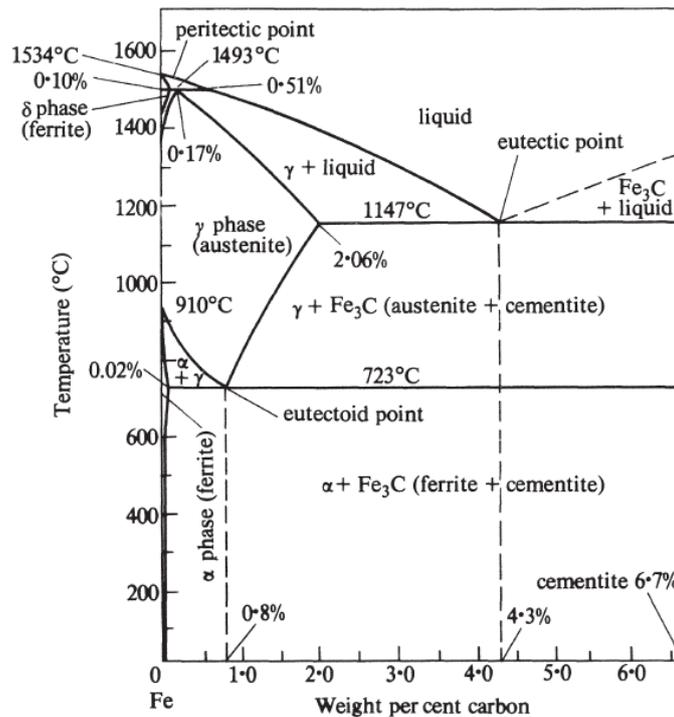


Figura 1.1 Diagrama de fase Fe-Fe₃C

(Fuente: J.F. Lancaster, 1980)

Los aceros al carbono y los aceros aleados se transforman en austenita a una temperatura por debajo del punto de solidificación, para finalmente transformarse a ferrita y cementita. En temperaturas donde el acero cae dentro de la región designada como fase- γ el acero es austenítico. La temperatura crítica superior A_{c3} (911°C) es donde la ferrita que contiene una pequeña cantidad de carbono en solución sólida es precipitada dejando granos de austenita que llegan a ser más pequeños y son progresivamente enriquecidos en carbono mientras la temperatura disminuye. A los 723°C (temperatura crítica inferior, A_{c1}) la austenita restante, la cual contiene alrededor de 0.8% de carbono, se transforma en perlita, que es una mezcla eutectoide de ferrita y cementita (Fe₃C). La estructura que se obtiene por enfriamiento lento consiste en granos mezclados de ferrita y perlita. La cementita se descompone en hierro más grafito si se mantiene a elevadas temperaturas por tiempos prolongados, esta es la razón por que el sistema Fe- Fe₃C es un sistema metaestable. (J.F. Lancaster, 1980).

En los aceros de bajo contenido de carbono, la primera fase que se forma en el enfriamiento debajo de la temperatura de transformación es la ferrita α (ferrita pro-eutectoide). Entre las capas de ferrita, la austenita restante se transforma de acuerdo con la velocidad de enfriamiento y contenido de elementos de aleación.

En el caso de una soldadura con múltiples pases, se forma una zona afectada por el calor diferente en cada capa del metal soldado dando como resultado una estructura compleja. Sin embargo, el efecto principal de los pases consecuentes es la refinación del grano y el mejoramiento de las propiedades del metal subyacente.

1.3.4 Tratamiento Térmico

Los tratamientos térmicos son la modificación de las microestructuras de una aleación metálica como consecuencia de la realización de calentamientos y enfriamientos controlados. En el caso de los aceros existen los tratamientos térmicos que no modifican la composición química del producto y aquellos que modifican las piezas con nuevos elementos químicos, este último se denomina tratamiento termoquímico (Rodríguez P., 2018).

El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales ciertas propiedades específicas para su uso final. A veces son realizados sobre una parte o la totalidad de una pieza siguiendo un proceso de manufactura.

En general los tratamientos térmicos constan de ciertas etapas que son:

- 1) **Calentamiento:** durante esta etapa cuando el acero llega a alrededor de los 732°C, la perlita se transforma en austenita; esto quiere decir que cambia de hierro α a hierro γ , por lo tanto, el acero que estaba dilatado se contrae durante la transformación y luego vuelve a dilatarse. Las tensiones internas se crean al principio por la dilatación desigual de las zonas calientes y frías en los aceros y después por las contracciones que ocurren en el acero al atravesar las zonas críticas. Es necesario llegar hasta la austenización del acero para generar austenita, que posteriormente se transformará durante el enfriamiento, y para esto, se deben traspasar las líneas de temperatura crítica según el tratamiento térmico que se efectúe y el tipo de acero con el que se cuente.
- 2) **Permanencia:** es el tiempo que le toma a la pieza igualar el contenido de carbono en todas sus regiones, ya que algunas regiones pueden tener más carbono que otras, y al rebasar la temperatura crítica superior, todo el carbono forma solución con la austenita. La igualación del contenido de carbono puede retardarse por segregaciones no metálicas o por la presencia de elementos de aleación como el cromo y el tungsteno.
- 3) **Enfriamiento:** es la etapa más importante, ya que establece el tipo de tratamiento; en el tipo de enfriamiento que se dé a una pieza se notará la diferencia entre cada tratamiento (Sánchez & Campos, 2010).

El acero de baja aleación tratado térmicamente AISI 4140 es fabricado en la condición de templado y revenido. El acero AISI 4145 tiene otros tratamientos térmicos como el normalizado que le brindan ciertas propiedades al material. Las condiciones que sigue el fabricante se muestran en la tabla 1.3

Tabla 1.3 Condiciones de Tratamientos Térmicos para los aceros AISI 4140 y AISI 4145

AISI 4140 80 ksi		
Templado		
Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Método de enfriamiento
817-837	55	Enfriamiento por agua
Revenido		
Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Método de enfriamiento
715-728	110	Enfriamiento por aire
AISI 4140 110 ksi		
Templado		
Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Método de enfriamiento
817-837	63	Enfriamiento por agua
Revenido		
Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Método de enfriamiento
598-611	127	Enfriamiento por aire
AISI 4145 120 ksi		
Normalizado		
Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Método de enfriamiento
912	200	Enfriamiento por aire
Austenizado		
Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Método de enfriamiento
843	34	Enfriamiento por agua
Revenido		
Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Método de enfriamiento
593	85	Enfriamiento por aire

(Fuente: Sertecpet S.A., 2019)

Cabe mencionar las definiciones de cada uno de estos tratamientos térmicos para conocer los parámetros a los cuales son ejecutados:

Normalizado: es un tratamiento térmico que consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente superior a la crítica (30 a 50°C sobre A_{c3} o A_{cm}), permanencia y seguido de un

enfriamiento en aire. El propósito del normalizado es refinar o reducir el grano del acero colado produciendo una estructura equiaxial, dando lugar a mejores características mecánicas, se aplica antes del temple y revenido como tratamiento preliminar para facilitar el afinamiento del grano y permitir en los tratamientos térmicos posteriores la rápida difusión de los constituyentes. Al elevarse el contenido de C en el acero, aumenta la diferencia de las propiedades entre el acero recocido y el normalizado. Para aceros que contienen hasta 0.4%C, el normalizado aumenta la dureza. Después del normalizado los aceros adquieren una estructura de grano fino, mayor resistencia y dureza que después del recocido. La temperatura del normalizado para los aceros con 0.4%C es de 860°C o se puede usar una temperatura de 40 a 60°C por encima de la temperatura A_{c3} (Rodríguez P., 2018).

Temple: es el tratamiento térmico que consiste en el calentamiento del acero hasta una temperatura óptima, manteniéndolo así por un determinado tiempo para garantizar la homogeneidad de la austenita y enfriándolo rápidamente en un medio con la severidad de enfriamiento suficiente para producir la microestructura y las propiedades deseadas. La estructura deseada es la martensita porque produce la máxima resistencia y dureza. La velocidad en el temple (entre 20 y 2500°C/s) está directamente influida por la forma y las dimensiones de la pieza, además del medio de enfriamiento.

El calentamiento del acero en el temple se realiza en un horno, siendo lento hasta los 500°C y rápido hasta la temperatura del temple, por encima de A_{c3} si el acero es hipoeutectoide. En general la temperatura utilizada en el temple para los aceros de 0.4%C es de 840°C o se puede usar una temperatura de 20 a 40°C por encima de la temperatura A_{c3} para aceros con contenido de carbono < 0.9% (Rodríguez P., 2018).

Revenido: consiste en el calentamiento moderado que se aplica al acero templado a temperaturas cercanas del punto crítico inferior A_{c1} . Este tratamiento modifica las propiedades del metal endurecido, el revenido es la operación final del tratamiento térmico que se realiza después del temple con el fin de disminuir las tensiones internas y obtener estructuras de mayor equilibrio. Es recomendable revenir el acero inmediatamente después del templado.

En el revenido, el proceso de calentamiento debe llevarse a temperaturas que dependen de la aplicación o propiedad requerida en el acero. El intervalo de revenido de 200 a 450°C entra en las aplicaciones que requieren alta dureza y alta tenacidad; para dureza o resistencia al desgaste, la temperatura de revenido se encuentra por debajo de 200°C, mientras que si se busca una buena tenacidad se debe trabajar por encima de los 450°C.

El tiempo de calentamiento en el revenido se puede determinar en forma experimental o por fórmulas empíricas. Es necesario que la permanencia a la temperatura no sea excesiva para evitar el crecimiento del grano y la descarburación superficial. Si se usa un horno eléctrico el tiempo de calentamiento es de 40 a 50 min/mm cuando la pieza tiene forma redonda, mientras que si se usa el calentamiento con llama el tiempo de la llama será de 35 a 40 min/mm (Rodríguez P., 2018).

El efecto de la temperatura de revenido sobre el esfuerzo de tracción y la ductilidad de los metales soldados en las composiciones de los aceros 4130, 4140 y 4340 se muestra en la figura 1.2.

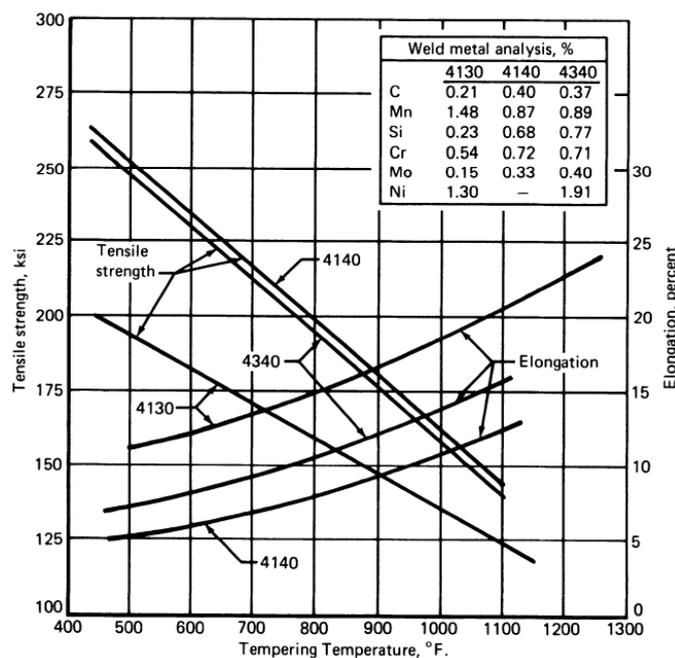


Figura 1.2 Efecto de la temperatura de revenido sobre el esfuerzo de tracción y la ductilidad de los aceros 4130, 4140 y 4340 (templado y revenido en aceite desde los 857°C por cuatro horas).

(Fuente: AWS Welding Handbook, 1984)

Las tensiones residuales originadas por el temple pueden reducirse en gran medida cuando la temperatura del revenido alcanza los 200°C y desaparecen casi por completo a los 500°C. Elevar demasiado la temperatura de revenido a un intervalo entre 550 a 650°C puede provocar la pérdida de tenacidad y la fragilidad del acero (Sánchez & Campos, 2010).

1.4 Soldabilidad de los aceros aleados tratados térmicamente

Los aceros de baja aleación son, desde un punto de vista de la soldadura, aleaciones que no tienen la capacidad de conservar sus propiedades después de la soldadura, estos deben ser tratados térmicamente después de la soldadura para obtener la mejor combinación de las propiedades que ofrece el acero. Estos aceros generalmente tienen un mediano contenido de carbono en comparación a los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Consecuentemente, estos aceros tienen la capacidad de obtener propiedades mecánicas altas, pero sufrir de una falta de tenacidad. (AWS Welding Handbook, 1984).

Estos aceros son soldados en varias condiciones de tratamiento térmico como son: recocido, normalizado, templado y revenido. Las juntas soldadas suelen ser tratadas térmicamente antes de su uso para mejorar la ductilidad y tenacidad y reducir los esfuerzos producidos en la soldadura.

La aplicación de un precalentamiento en el acero tiene la función de mantener los niveles de hidrógeno bajos y evitar agrietamientos. El control apropiado del azufre y fósforo también son muy importantes. El límite comercial de estos dos elementos es de 0.04%; pero las investigaciones han mostrado que, aunque exista la mitad en porcentaje de estos compuestos, esto podría incrementar la sensibilidad al agrietamiento en estos aceros. El azufre aumenta la sensibilidad del agrietamiento en caliente (particularmente en el metal soldado), mientras que el fósforo reduce la ductilidad y tenacidad, e incrementa la sensibilidad al agrietamiento en frío. Ambos en el metal base y en el metal soldado.

El contenido relativo de carbono de estos aceros también contribuye con el agrietamiento en caliente en el metal soldado debido al incremento de temperatura sobre la fase de solidificación lo que también produce un incremento de la segregación que a su vez reduce la resistencia a las altas temperaturas y la ductilidad. Estas condiciones, en combinación con la contracción del metal pueden causar su fisuramiento de la misma manera que se producen las roturas en los aceros fundidos. Las grietas en caliente frecuentemente son encontradas en los cráteres del primer pase en una soldadura de múltiples pases, y en una soldadura con filete cóncavo.

Estudios de soldadura de un acero 4340 indican que su resistencia al agrietamiento en caliente puede ser mejorada si se mantienen los niveles de azufre y fósforo por debajo del 0.025%. El uso de un material de aporte con bajo contenido de carbono y elementos de aleación también pueden ayudar a mejorar la resistencia al fisuramiento. Estas condiciones pueden ser aplicadas para cualquier otro acero de baja aleación.

En algunas soldaduras de reparación, donde no es factible el recocido, revenido o alivio de esfuerzos, se pueden usar electrodos para aceros inoxidables austeníticos o electrodos de

aleaciones de níquel para obtener menor resistencia y mayor ductilidad que el metal base, además pueden resultar de la soldadura altos esfuerzos de contracción en la deformación plástica del metal soldado en lugar de agrietamientos en la zona afectada por el calor.

1.4.1 Ensayos de Soldabilidad

Los ensayos de soldabilidad son ampliamente usados para evaluar los procesos de soldadura y determinar su desempeño de servicio en las uniones soldadas. Existen un sin número de ensayos de soldabilidad estandarizados. Para la evaluación mecánica de las juntas soldadas existen una cierta cantidad de ensayos estandarizados como son: el ensayo de tracción, fatiga, doblado, así como el ensayo de dureza que, aunque no cuantifica un rendimiento mecánico, puede ser un indicador útil del esfuerzo y la ductilidad.

Muchos ensayos de soldabilidad han sido desarrollados para ciertos tipos de agrietamientos en la soldadura, por ejemplo, el ensayo de Varestraint fue desarrollado para evaluar la susceptibilidad de agrietamiento por solidificación. Otro tipo de ensayo es la evaluación de la susceptibilidad al fisuramiento debido al recalentamiento, envejecimiento e hidrógeno inducido. Dentro de este grupo existen dos ensayos estandarizados que son ISO 17641 y 17642 para los ensayos de agrietamiento de caliente y en frío respectivamente. Estos ensayos son realizados bajo condiciones controladas que permiten conocer la influencia de variables importantes como la temperatura, tiempo, esfuerzos, deformación, etc. que están relacionados al mecanismo de fisuramiento a ser determinado.

1.4.2 Carbono Equivalente

Un indicador clave para conocer la dificultad de soldar cualquier acero al carbono o acero aleado es el carbono equivalente (CE, siglas en inglés para Carbon Equivalent). El carbono equivalente, es un factor que determina la susceptibilidad de un acero a la fragilidad debido al hidrógeno, además del agrietamiento causado por la soldadura, una fórmula comúnmente usada es:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Ecuación 1.1 Carbono equivalente

(Fuente: ASME IX, 2019)

Esta fórmula no toma en cuenta al silicio, el cual tiene el mismo efecto que el manganeso en el endurecimiento del metal soldado y la zona afectada por el calor. Así también el silicio

no es tomado en cuenta ya que no influye en el agrietamiento a causa del hidrógeno. El valor para mantener un riesgo mínimo del agrietamiento por el hidrógeno es de $CE=0.45$.

Algunas fórmulas han sido desarrolladas para producir distintos resultados, todas estas muestran que el incremento de CE está relacionado con el incremento del riesgo al fisuramiento por una variedad de causas, y la degradación del metal base debido a los efectos del calor en la soldadura. Estos riesgos deben ser controlados por un proceso de soldadura que tenga en consideración ciertos parámetros como son: el precalentamiento, un tratamiento posterior a la soldadura, selección del material de aporte, control del proceso de soldadura como el calor de entrada, etc.

El carbono equivalente es mucho más importante cuando el espesor de la sección a ser soldada aumenta. Una regla es considerar este factor cuando el espesor de la sección a ser soldada es mayor a $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) ya que por encima de este valor de espesor el flujo de calor de la soldadura incrementa rápidamente. La fórmula del carbono equivalente es aplicable para la mayoría de los aceros aleados, pero podría no ser aplicado para aceros con alto contenido de elementos aleantes, como el acero 9%Cr 1%Mo. Para este tipo de acero existen diferentes fórmulas para calcular el número de carbono equivalente (Lancaster, 1980).

1.4.3 Procesos de soldadura por arco eléctrico

1.4.3.1 Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)

Es un proceso por arco eléctrico en el cual la coalescencia de los metales es producida por el calor generado de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo revestido y la superficie del material base en la junta que se está soldando.

El núcleo del electrodo revestido consiste en una varilla metálica de material extruido o fundido. El núcleo de la varilla conduce la corriente eléctrica hacia el arco y le proporciona el material de aporte a la junta. El recubrimiento ayuda en la protección del metal fundido de la atmósfera y mejora la estabilidad del arco.

La protección del arco se obtiene desde los gases que se forman como resultado de la descomposición de algunos elementos que componen el recubrimiento. Estos elementos pueden variar dependiendo el tipo de electrodo. Los elementos que componen el revestimiento y la varilla del núcleo controlan las propiedades mecánicas, la composición química y estructura metalúrgica del metal soldado, así como las características del arco del electrodo.

El procedimiento SMAW es usado frecuentemente en la soldadura de los aceros de baja aleación que son fabricados con un tratamiento térmico. La selección del electrodo está basada en la composición y en el espesor del acero, además del esfuerzo a la tracción requerido en la junta. La composición del material de aporte es normalmente similar al del metal base, los fabricantes de electrodos son los encargados de recomendar cada electrodo para su aplicación específica, particularmente en las soldaduras con múltiples pases donde se requiere una alta resistencia en las juntas y la dilución es limitada.

1.4.3.2 Soldaduras por arco eléctrico con gas de protección

Los aceros de baja aleación tratados térmicamente pueden ser soldados por los procedimientos: soldadura por arco de tungsteno (GTAW), soldadura con gas protector (GMAW) y soldadura con alambre tubular (FCAW). El proceso de soldadura con electrodo de tungsteno es capaz de producir soldaduras con el contenido más bajo de hidrógeno, y es el más adecuado para juntas delgadas y con altos valores de esfuerzos. Se puede usar el mismo metal de aporte para las soldaduras GMAW y GTAW que compartan la composición del metal base. Los contenidos de carbono, fósforo y azufre del material de aporte deben ser bajos para reducir la tendencia al fisuramiento en caliente y mejorar la ductilidad del metal soldado.

Estos procesos proveen un buen control en la composición y limpieza en la soldadura. Los gases argón, helio o la mezcla de ambos puede ser usado para el proceso GTAW. Las mezclas de Ar-O₂ o Ar-CO₂ pueden ser usadas para los procesos de soldadura con gas de protección. A continuación, se muestra en la tabla 1.4 las propiedades de las juntas soldadas en los aceros de baja aleación.

Tabla 1.4 Propiedades de las juntas soldadas por arco eléctrico a la tracción transversal en los aceros de baja aleación después de un temple y revenido.

Designación del acero	Espesor, in.	Proceso de soldadura	Material Base	Temperatura de revenido °F	Junta Soldada			
					Esfuerzo a la tracción, ksi	Esfuerzo a la fluencia, ksi	Elongación en 2 in. %	Esfuerzo a la tracción aproximada del metal base, ksi
4140	0.50	GMAW	4140	900	189	178	8	190
4340	1.0	GMAW	4340	950	189.5	181.5	11	190

(AWS Welding Handbook Vol. 4 Metals and their Weldability, 1983)

Para las soldaduras con alambre tubular FCAW, la selección del electrodo es limitada. Estas soldaduras se comparan a aquellas que son realizadas con electrodos revestidos con bajo contenido de hidrógeno.

1.4.4 Metalurgia en la Soldadura

Los diagramas isotérmicos son una guía para entender y estimar las microestructuras del acero. Estos diagramas sirven como una base para planificar ciertos parámetros de soldadura basados en las características metalúrgicas del acero. Mientras que en la mayoría de procesos de tratamientos térmicos y también en la soldadura se utiliza el diagrama de enfriamiento continuo para complementar la información acerca de la transformación de la austenita durante el proceso de enfriamiento de la soldadura.

Los diagramas de enfriamiento continuo han sido desarrollados para algunos aceros con la finalidad de predecir su microestructura conociendo sus condiciones de enfriamiento tal como se muestra en la figura 1.3.

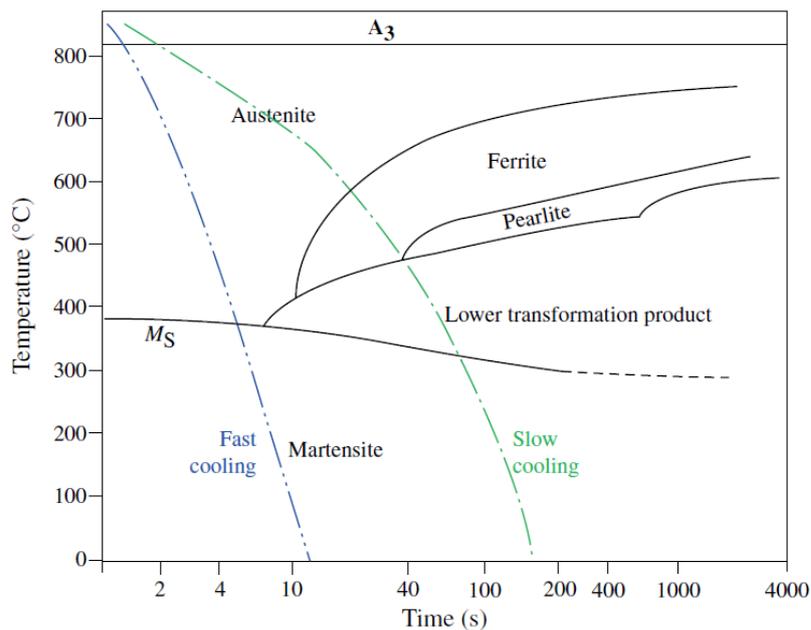


Figura 1.3 Ilustración de un diagrama de enfriamiento continuo para aceros

(Fuente: Welding Metallurgy and Weldability, 2015)

El acero y otras aleaciones de hierro son las más utilizadas en la industria por lo que las propiedades de este material están relacionadas directamente con la cantidad de carbono y las transformaciones de fase durante su fabricación. En el caso de los aceros de baja aleación, los contenidos combinados de carbono y elementos aleantes son suficientes para promover la formación de martensita desde la austenita cuando se enfría rápidamente por debajo de la temperatura de transformación adecuada. En algunos aceros, el ciclo térmico puede resultar en la formación de martensita en el metal soldado y la ZAC, el contenido de martensita formada y la dureza del acero dependerá del contenido de carbono, así como

de la razón de calentamiento y enfriamiento. En la figura 1.4 se muestra una relación entre la dureza y el contenido de carbono para los aceros que tienen 50 o 100% de martensita después de un templado.

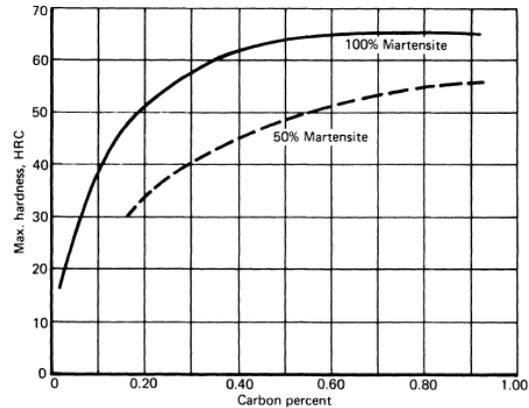


Figura 1.4 Relación entre el contenido de carbono y la dureza máxima en los aceros con microestructuras de 50 y 100% de martensita.

(Fuente: AWS Welding Handbook, 1984)

Durante la soldadura, una parte de la zona afectada por el calor (ZAC) pasará a transformarse a austenita. Si el metal soldado y la zona afectada por el calor austenítica son enfriados demasiado rápido, entonces se transformarán en martensita o una combinación de martensita y bainita como se muestra en la figura 1.5 para el acero AISI 4340.

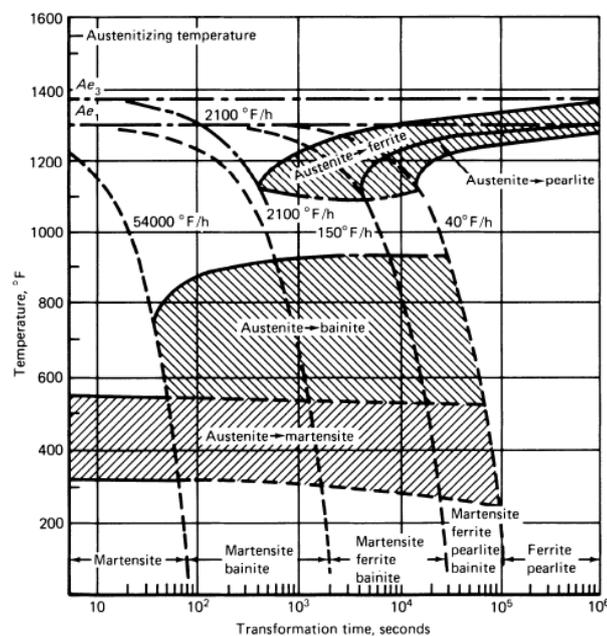


Figura 1.5 Diagrama de transformación por enfriamiento continuo del acero AISI 4340.

(Fuente: AWS Welding Handbook, 1984)

La rapidez de los ciclos térmicos en la soldadura no hace posible el uso de diagramas para predecir la verdadera naturaleza de las diversas fases que se forman cerca de la línea de fusión, sin embargo, para conocer la transformación de la ZAC durante el calentamiento se puede usar como ejemplo a la figura 1.6 que muestra la relación del incremento de la temperatura en la soldadura de un acero estructural con la formación de las diferentes zonas en la ZAC.

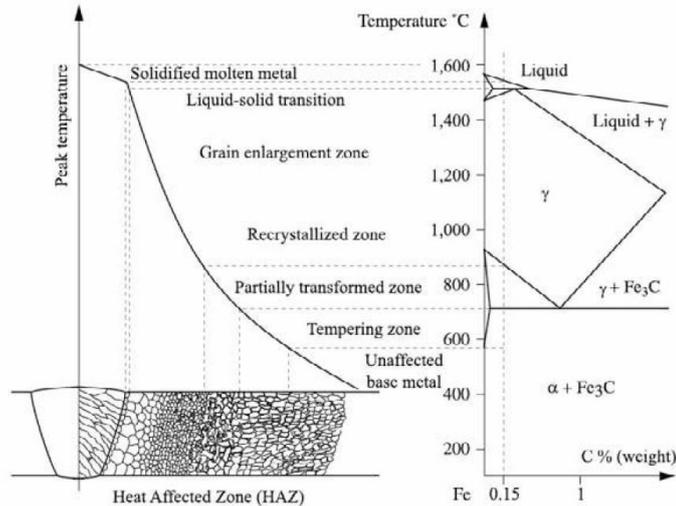


Figura 1.6 Partes constituyentes de una junta soldada para un acero estructural con 0.15% C.

(Fuente: Metallurgy and Mechanics of Welding, 2001)

En este caso el metal base ha sido calentado a una temperatura inferior a A_{c1} (723°C) y no ha sufrido una transformación de fase. Existe una zona de transformación parcial entre A_{c1} y A_{c3} (911°C) donde coexiste ferrita y austenita. Por encima de la temperatura A_{c3} la transformación en austenita es total. Además, en el enfriamiento, las microestructuras que se pueden observar en la ZAC de las juntas soldadas corresponden a los productos transformados de la austenita.

Su estudio es difícil hacerlo desde los diagramas de enfriamiento continuo, así que se presenta un ejemplo en la figura 1.7 de un material dado a ciertas condiciones de austenización (temperatura generalmente mayor a 1200°C para simular la ZAC con granos gruesos) así como la variación de dureza debido al enfriamiento.

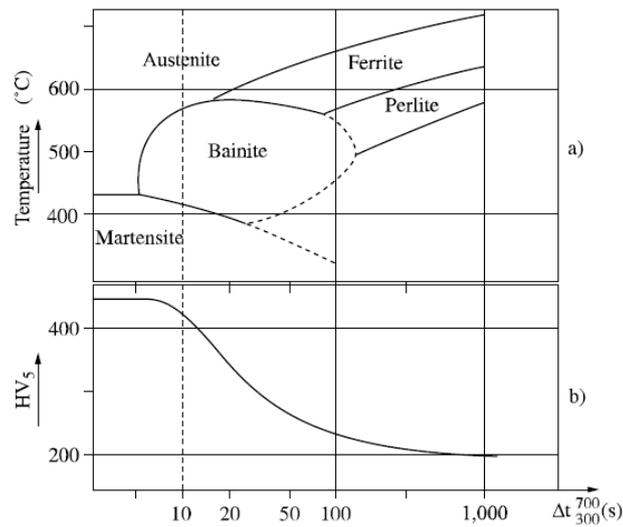


Figura 1.7 (a) Diagrama de enfriamiento continuo en condiciones de soldadura; (b) Gráfico de dureza vs. Tiempo de enfriamiento Δt para un acero con C=0.18%, Mn=1.4%, Si=0.4%.

(Fuente: Metallurgy and Mechanics of Welding, 2001)

Varios tipos de microestructuras pueden formarse dependiendo de la velocidad de enfriamiento. En el acero AISI 4140, la disminución de la velocidad de enfriamiento incrementa la formación de ferrita y perlita, mientras que la bainita y martensita permanecen constantes para luego disminuir, así como se presenta en la figura 1.8.

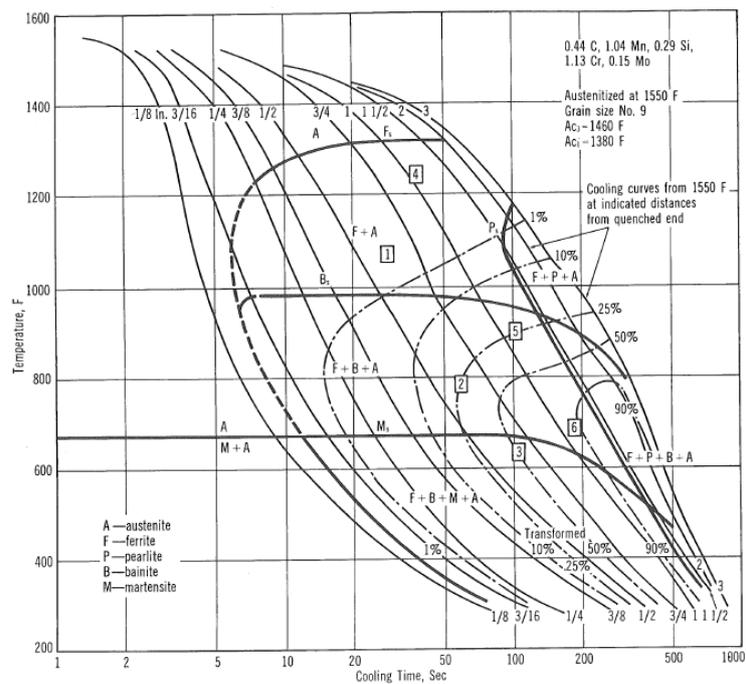


Figura 1.8 Diagrama de transformación por enfriamiento continuo del acero AISI 4140.

(Fuente: American Society for Metals, 1977)

Los aceros en este grupo son muy sensibles al agrietamiento por el hidrógeno inducido. Es por eso, que en los procesos de soldadura se debe minimizar la presencia de hidrógeno durante la soldadura, así como en la formación de martensita.

La mejor práctica para soldar estos aceros es aplicar un precalentamiento en el área de la junta a una temperatura de 315°C o mayor con el propósito de reducir la velocidad de enfriamiento de la soldadura para formar una bainita suave en lugar de una martensita dura. Una estructura bainítica en la soldadura y en la zona afectada por el calor obtendrá suficiente tenacidad para permitir un manejo entre la soldadura y el tratamiento térmico posterior soldadura.

En algunos casos se puede aplicar bajas temperaturas de precalentamiento para completar la transformación a bainita y así la zona afectada por el calor y la zona soldada podrían llegar a contener algo de martensita y austenita retenida. Se debe elegir un proceso adecuado posterior a la soldadura para transformar la austenita a martensita o bainita.

1.4.5 Precalentamiento

El precalentamiento y el control de la temperatura entre pases para un acero dado dependen de:

- 1) El contenido de carbono y su contenido de elementos de aleación.
- 2) Condición de tratamiento térmico.
- 3) Espesor de la sección o cantidad de restricción en la junta.
- 4) Cantidad de hidrógeno durante la soldadura.

Un cambio en el proceso para reducir la cantidad de hidrógeno, disminuir el espesor o restricción en la junta permitirá el uso de una temperatura menor de precalentamiento.

La temperatura ideal de precalentamiento está alrededor de los 10°C por encima de la temperatura de formación de la martensita (M_s) (AWS Welding Handbook., 1972). Manteniendo esta temperatura por un tiempo después de la soldadura se producirá una estructura bainítica en la parte soldada y en las zonas afectadas por el calor. También permitirá disolver el hidrógeno para que escape por las secciones delgadas. La expansión volumétrica que toma lugar durante la transformación no producirá esfuerzos localizados que provoquen el fisuramiento.

Sin embargo, la temperatura M_s de muchos aceros de baja aleación tratados térmicamente son superiores a 260°C. Una temperatura de 288°C o mayor contribuirá a la disconformidad del soldador y provocará la formación de una capa delgada de óxido sobre las caras de la

junta. Esta oxidación podría ser la causa de discontinuidades inaceptables en la soldadura (AWS Welding Handbook, 1984).

Los procedimientos de soldadura deben ser diseñados para minimizar los problemas asociados con las altas temperaturas de precalentamiento. Algunos aceros de baja aleación con alto contenido de carbono requieren una temperatura de precalentamiento alta y control de la temperatura entre pases.

A continuación, se detalla en la tabla 1.5 algunos valores de temperaturas de precalentamiento mínimas y temperaturas entre pases para algunos aceros AISI de baja aleación.

Tabla 1.5 Temperaturas mínimas recomendadas para el precalentamiento y control entre pases de los aceros AISI de baja aleación.

Acero AISI	Rango de espesores (in)	Temperatura mínima de precalentamiento y en entre pases (°C)
4027	Hasta 0.5	10
	0.6-1.0	65
	1.1-2.0	93
4130, 5140	Hasta 0.5	148
	0.6-1.0	204
	1.1-2.0	232
4135, 4140	Hasta 0.5	176
	0.6-1.0	232
	1.1-2.0	260
4340, 8630	Hasta 2.0	287
	Hasta 0.5	93
	0.6-1.0	120
	1.1-2.0	148

(Fuente: AWS Welding Handbook, 1984)

Cuando se aplica una temperatura de precalentamiento menor a la temperatura M_s del acero usado, algo de austenita se transformará inmediatamente en martensita dura. El balance permanecerá sin alteraciones al menos que la temperatura sea incrementada por encima de M_s . La temperatura entre pases no debe caer por debajo de la temperatura de precalentamiento, y para la aplicación de algunos tratamientos posteriores a la soldadura se debe realizar antes de que la soldadura se enfríe a la temperatura ambiente.

Las altas temperaturas de precalentamiento para la soldadura promueven bajas velocidades de enfriamiento y bajos valores de dureza en la ZAC que son necesarias para los aceros de medio carbono (0.3 a 0.4% de carbono), como en los aceros AISI 4140, 4130, 4340. El precalentamiento estimado debe ser ajustado al tamaño de soldadura, la complejidad de la junta como en una junta en V o con una geometría más compleja, en este último caso se puede requerir una temperatura de precalentamiento más elevada (AWS Welding Handbook, 1984).

Otra consideración a tomar en cuenta para las temperaturas de precalentamiento y entre pases es que no deben exceder el límite de transformación de austenita a martensita al 90% (M_{90}) del metal base ya que en las soldaduras grandes se puede promover el fisuramiento en la soldadura o en la ZAC durante el enfriamiento. En la tabla 1.6 se puede estimar la temperatura de precalentamiento para el acero AISI 4140.

Tabla 1.6 Temperaturas de precalentamiento estimadas para el acero AISI 4140.

Grado AISI	Dureza BHN máxima	CE	Equivalente de dureza al final del templado	Temperatura estimada M_{90} 90% (°C)	Temperatura de precalentamiento (°C)
4140	578	0.74	0.77	250	266

(Fuente: Welding Journal, 2008)

Un estimado empírico para determinar la mínima temperatura de precalentamiento para los carbonos equivalentes CE entre 0.47 y 1.0 que poseen una pulgada de espesor para la soldadura es:

$$PH = 450^{\circ}C\sqrt{CE - 0.42}$$

Ecuación 1.2 Fórmula empírica para determinar la mínima temperatura de precalentamiento

(Fuente: Welding Journal, November 2008)

El valor de 1.0 de carbono equivalente es un límite práctico para la soldadura de aceros de baja aleación con menos del 5% acumulados en carbono y elementos de aleación. En el caso de los aceros de baja aleación tratados térmicamente el porcentaje acumulado puede llegar hasta los 4% dependiendo de la cantidad de sus elementos aleantes, mientras que, en los aceros de alta aleación, el elemento aleante puede contener el 11% de su composición total, por ejemplo, el cromo en el acero inoxidable. En este último caso el carbono equivalente no es aplicable y no se recomienda realizar un precalentamiento. Además, la estimación de temperatura de precalentamiento deberá ser ajustada según la

complejidad de la junta y su geometría. Las fórmulas de Seferian también son usadas para determinar el precalentamiento de algunos aceros.

$$T_o = 550\sqrt{CE' - 0.45}$$

Ecuación 1.3 Fórmula de Seferian para aceros aleados

(Fuente: Metalurgia de la Soldadura, Seferian D., 1962)

$$CE' = CE(1 + 0.005e)$$

Ecuación 1.4 Relación del carbono equivalente con el espesor del material

(Fuente: Metalurgia de la Soldadura, Seferian D., 1962)

Donde e es el espesor del material en mm y CE es el carbono equivalente.

1.4.6 Problemas en la soldadura

En general, los aceros al carbono y los aceros aleados con altos niveles de resistencia son más difíciles de soldar debido al riesgo de agrietamiento a causa del hidrógeno. Algunos de los problemas y sus posibles soluciones se encuentran detallados en la tabla 1.7.

Tabla 1.7 Problemas comunes en la soldadura y sus soluciones prácticas.

Problemas comunes	Tipo de aleación	Soluciones
Porosidad	Aceros al carbono y aceros aleados	Agregar elementos desoxidantes (Al, Ti, Mn) en el material de aporte
Fisuramiento a causa del hidrógeno	Aceros con un valor alto de carbono equivalente (CE)	Uso de electrodos con bajo contenido de hidrógeno o electrodos para aceros inoxidables austeníticos. Aplicar un precalentamiento y un tratamiento térmico posterior a la soldadura.
Desgarramiento laminar	Aceros al carbono y aceros aleados	Usar juntas diseñadas para minimizar la restricción transversal.

Fisuramiento por recalentamiento	Aceros resistentes al calor y corrosión	Usar poco calor para evitar el crecimiento de grano. Minimizar las concentraciones de esfuerzos y restricciones.
Fisuramiento por solidificación	Aceros al carbono y aceros aleados	Mantener un contenido apropiado de Mn/S.
Baja tenacidad en la ZAC debido al crecimiento de grano	Aceros al carbono y aceros aleados	Usar formadores de carburos y nitruros para contener el crecimiento de grano.
Baja tenacidad en la zona de fusión debido a los granos gruesos	Aceros al carbono y aceros aleados	Usar una soldadura con múltiples pases para refinar a los granos.

(Fuente: Jhon Wiley & Sons, 2003)

Para enfocar a los defectos más comunes en la soldadura de los aceros de baja aleación tratados térmicamente se definirá a cada uno de ellos:

1.4.6.1 Agrietamiento en frío

El concepto de soldabilidad es a menudo confundido con la sensibilidad del acero al agrietamiento en frío, el cual da una indicación de la importancia de este fenómeno.

Durante la soldadura por arco, el acero fundido tiende a disolver el hidrógeno entregado por la descomposición del agua presente en el ambiente o humedad, o desde la materia hidrogenada (grasas, etc.) y posiblemente desde el gas de soldadura; la cantidad disuelta puede ser alta. Según ciertos estudios, durante la soldadura de acero estructural, la cantidad de hidrógeno difundido presente en 100 gramos de acero fundido puede alcanzar el siguiente promedio: (Granjon, 2001)

- 15 cm³ en soldaduras con electrodo con recubrimiento rutilico.
- 9 cm³ en soldaduras con electrodo tubular con polvo metálico.
- 7 cm³ en soldaduras con electrodos con un recubrimiento básico.
- 4 cm³ en soldaduras MIG.

Durante la solidificación, enfriamiento y cualquier posible transformación alotrópica, la solubilidad del hidrógeno disminuye considerablemente.

Para conocer mejor los riesgos del agrietamiento en frío, es necesario llevar a cabo ensayos de agrietamiento en la soldadura con las variables consideradas. Si no es posible reducir la cantidad de hidrógeno, se recomienda llevar a cabo los procesos de

precalentamiento y tratamiento térmico posterior a la soldadura que consiste en modificar la evolución térmica de una soldadura al calentar las partes que constituyen el ensamble a temperaturas más altas que la temperatura ambiente (esto en el precalentamiento) y si es posible mantener este calor, luego de la soldadura, por un tiempo dado (esto es para el posterior calentamiento).

1.4.6.2 Fisuramiento debido al hidrógeno:

Esto ocurre cuando los siguientes cuatro factores están presentes simultáneamente: hidrógeno en el metal soldado, esfuerzos altos, microestructura susceptible (martensita), y una relativa baja temperatura (entre -100 y 200°C).

Los esfuerzos altos se pueden inducir durante el enfriamiento por la contracción durante la solidificación y la contracción térmica bajo restricción. La martensita, especialmente la dura y frágil con alto contenido de carbono, es susceptible al fisuramiento por el hidrógeno. Siendo la temperatura de transformación de la martensita relativamente baja, el fisuramiento por el hidrógeno tiende a ocurrir a bajas temperaturas. Por esta razón, este tipo de fisuramiento es llamado “fisuramiento en frío”.

La figura 1.9 muestra la difusión del hidrógeno desde el metal soldado hasta la zona afectada por el calor durante la soldadura. Los términos T_F y T_B son las temperaturas de transformación de la austenita (ferrita más perlita) y de la austenita/martensita respectivamente.

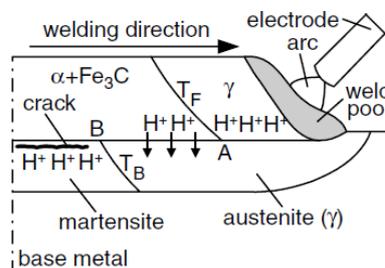


Figura 1.9 Difusión del hidrógeno desde el metal base hacia el HAZ durante la soldadura.

(Fuente: Willey and Sons, 2003)

La susceptibilidad de los aceros al fisuramiento debido al hidrógeno depende mucho de la temperatura. Esta dependencia se muestra en la figura 1.10. A temperaturas sobre los 200°C es menos probable la formación de fisuras a causa del hidrógeno ya que este elemento puede difundirse fácilmente y se incrementa la resistencia inherente a la fractura.

En los aceros, las temperaturas de transición de los estados dúctil a frágil están en el rango de 20 a -100°C (Welding Metallurgy and Weldability, 2008).

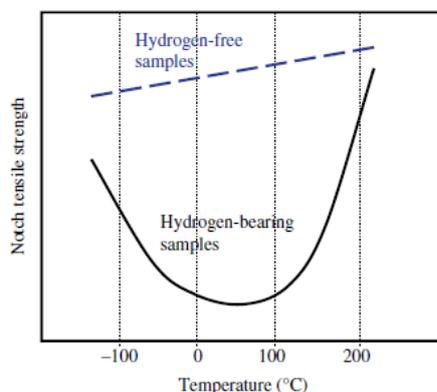


Figura 1.10 Efecto del hidrógeno en la resistencia a la tracción en una muestra.

(Fuente: Welding Metallurgy and Weldability, 2008)

1.4.7 Material de aporte

Algunos de los factores principales en la selección del material de aporte son la composición química y las condiciones de operación de las soldaduras. Los electrodos usados en la soldadura por arco eléctrico para aceros de baja aleación están cubiertos por la norma AWS 5.5 “Especificación para los electrodos de acero de baja aleación con procedimiento SMAW”. Esta especificación abarca a los electrodos aleados desde E70XX hasta E120XX. Los electrodos descritos en las especificaciones están agrupados de acuerdo a sus características operacionales, tipos de recubrimientos y propiedades del metal depositado. Las características operacionales, tipos de recubrimientos y los requerimientos mecánicos y químicos están descritos en detalle en las especificaciones.

El sistema de clasificación usado en las especificaciones comprende un patrón establecido. La letra E designa al electrodo; los primeros dos o tres dígitos, 70, por ejemplo, indica la mínima resistencia a la tracción del metal depositado en 1000 psi. El tercer o cuarto dígito indica la posición en la cual el electrodo es capaz de realizar una buena soldadura. Así, el “1” en el E7010, significa que el electrodo es usado en todas las posiciones (plana, vertical, sobre cabeza y horizontal). El “2” en el electrodo E7020 indica que es adecuado para la soldadura en la posición plana y para realizar soldadura con filete horizontal. El último dígito de la clasificación indica el tipo de recubrimiento y el tipo de corriente adecuada.

Los electrodos de bajo contenido de hidrógeno son los más recomendados para la soldadura de los aceros de baja aleación tratados térmicamente con el fin de minimizar la

formación de fisuras en el metal soldado y en la ZAC. Los fabricantes de electrodos también son una fuente de consulta para conseguir la información de los tipos de aplicaciones de los electrodos usados en los aceros HTLA. En la tabla 1.8 se muestra una clasificación de los electrodos usados en los aceros HTLA en aplicaciones que no requieren una semejanza de propiedades en el metal soldado y el metal base en la condición de tratamiento térmico de templado y revenido.

Tabla 1.8 Clasificación de los electrodos usados en los aceros de baja aleación tratados térmicamente.

Clasificación del electrodo	Tipo de acero
E7018	1330
E7018-A1	4023; 4028; 4118; 4320; 8620
E8016-C1	4620
E11018-M	8630
E12018-M	4140;4150;4340;4640; 8640

(Fuente: ASM Book 6 Welding, Brazing and Soldering, 1993)

Los electrodos revestidos con igual composición química, pero bajo contenido de carbono pueden ser la mejor opción para aplicaciones donde la resistencia en la junta sea menor que la del metal base. La resistencia de la junta dependerá de los siguiente:

- 1) Selección del electrodo
- 2) Espesor del material base
- 3) Diseño de la junta
- 4) Procedimiento de soldadura
- 5) Cantidad y uniformidad de la dilución
- 6) Respuesta del metal soldado al tratamiento térmico posterior a la soldadura

1.4.8 Tratamiento térmico posterior a la soldadura

El tratamiento térmico posterior a la soldadura puede ser requerido para los aceros de medio y alto contenido de carbono o con carbono equivalente sobre los valores de aproximadamente 0.5. Este proceso reduce el contenido de hidrógeno de la soldadura y de la ZAC y en algunos casos mejora la resistencia a los esfuerzos de fatiga en las soldaduras. Como referencia se puede usar el diagrama TTT para los aceros hipoeutectoides que contienen hasta 0.5%C que se muestra en la figura 1.11.

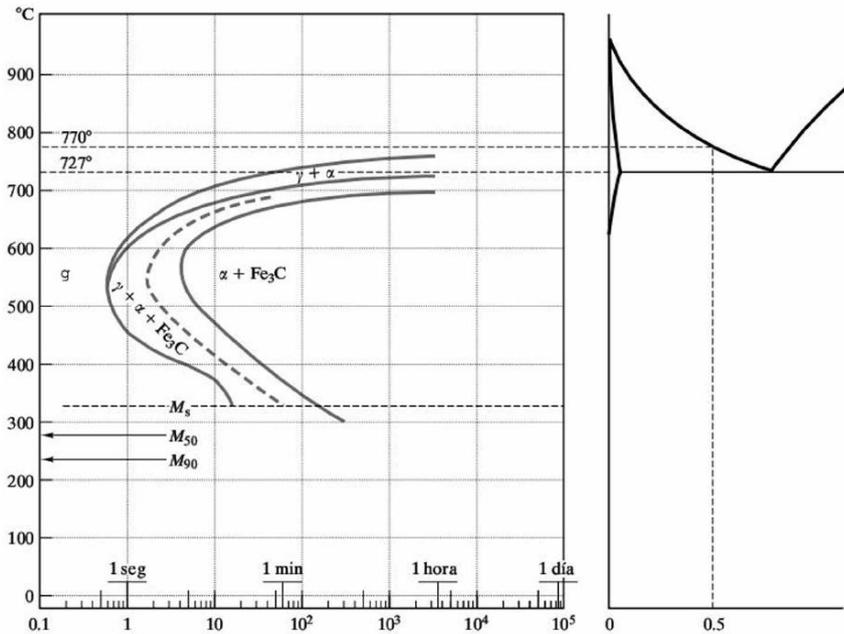


Figura 1.11 Diagrama TTT para una composición hipoeutectoide (0.5 por ciento en peso de C) comparado con el diagrama de fases Fe-Fe₃C.

(Fuente: James F. Shackelfold Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros, 2005)

El tipo de tratamiento térmico requerido después de la soldadura de los aceros de baja aleación tiene una fuerte relación con las características metalúrgicas y los requerimientos en sus propiedades mecánicas. El tratamiento térmico posterior a la soldadura depende del precalentamiento y la temperatura entre pases o cualquier otro proceso que se realizó antes de la solidificación del metal fundido; no es muy práctico empezarlo después de completar la soldadura, sino inmediatamente después de la fusión. Cuando las temperaturas de precalentamiento y entre pases es menor que la temperatura M_s del acero, la soldadura no debe enfriarse hasta la temperatura ambiente antes de haberle dado un tratamiento térmico para evitar el fisuramiento.

Si la soldadura va a ser sometida a un alivio de esfuerzos en los rangos de temperatura de 1100°F (593°C) a 1250°F (676 °C) inmediatamente luego de ser soldada, primero debe ser enfriada desde la temperatura de precalentamiento hasta una temperatura menor en la cual la transformación de austenita a martensita se haya completado, como lo indica el diagrama de transformación isotérmica del acero mostrado en la figura 1.12.

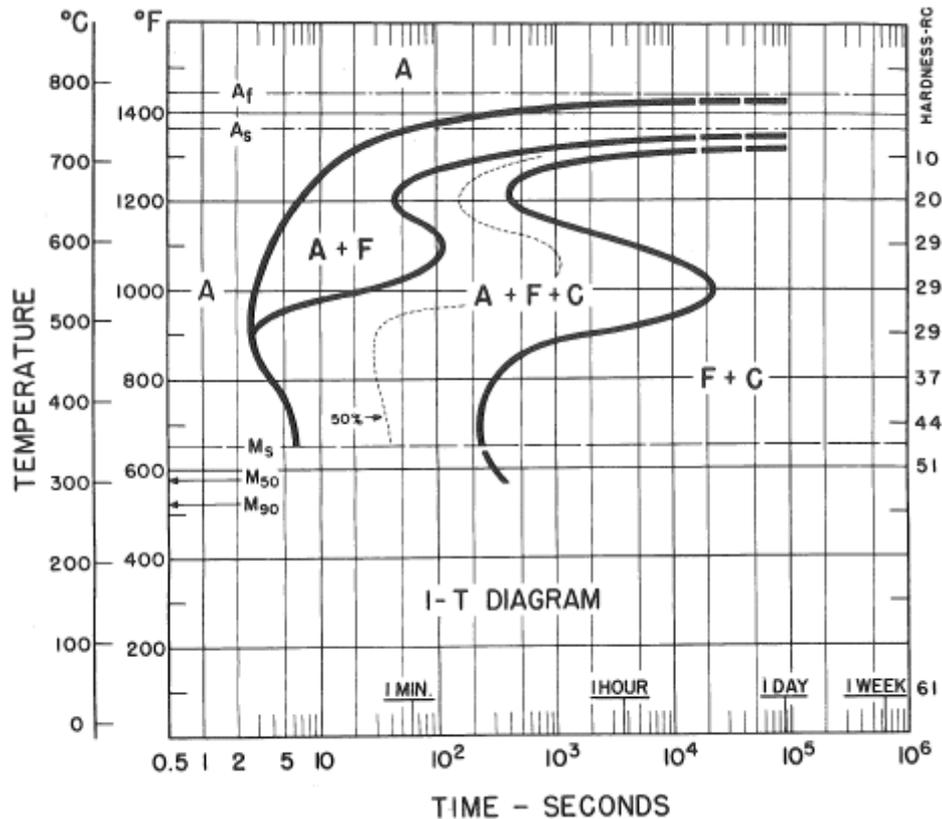


Figura 1.12 Diagrama de transformación isotérmica del acero AISI 4140 (C-0.37, Cr-0.95, Mn-0.77, Mo-0.21 Austenitizado a 843°C, tamaño de grano 7-8).

(Fuente: American Society for Metals, 1977)

Es importante la inspección en la soldadura para encontrar cualquier defecto o discontinuidad antes de aplicar un tratamiento final. Para los procedimientos de reparación de soldadura se debe seguir los mismos parámetros que se usó en la soldadura inicial.

1.5 Selección del procedimiento de soldadura

Cualesquiera de los procesos comunes de arco eléctrico pueden ser usados para la unión de los aceros tratados térmicamente de baja aleación, pero es importante considerar el procedimiento correcto para disminuir los problemas que dificultan la soldadura como son: el riesgo de fisuramiento en frío o debido a las inclusiones de hidrógeno y las fisuras en caliente debido a la formación de microestructuras no deseadas en la transformación del acero como la martensita en la zona afectada por el calor en donde se presenta una estructura dura pero con alta fragilidad.

Debido a su versatilidad, equipos con requerimientos simples y disponibilidad de una amplia gama de electrodos, el proceso de soldadura SMAW es muy usado en la unión y reparación por soldadura de estos aceros.

Al seleccionar el proceso SMAW se deben tener en cuenta algunas consideraciones:

- 1) Optar por ciertos procedimientos antes y después de la soldadura tal como un precalentamiento y un tratamiento térmico posterior a la soldadura respectivamente. En el caso de que no se pueda realizar un tratamiento térmico posterior se recomienda la aplicación de un alivio de esfuerzos que también promueve la recuperación de las propiedades deseadas del material soldado para que se asemejen a la del metal base.
- 2) El control de temperatura entre pases y el enfriamiento de la soldadura debe ser controlado con mantas térmicas, arenas refractarias u otro método de enfriamiento con el propósito de no permitir el desarrollo de ciertas discontinuidades en la soldadura.
- 3) Uso de consumibles de bajo hidrogeno. Los electrodos deben mantenerse bajo contenedores sellados, y si se exponen a la humedad del ambiente deben ser puestos en un horno y secados a las temperaturas que recomiende el fabricante.

Cabe destacar que en otros procedimientos como en la soldadura GTAW o GMAW se disminuye el riesgo del fisuramiento a causa del hidrógeno debido a los gases de protección que usan. El proceso de soldadura y los resultados esperados deben ser evaluados por los ensayos apropiados, incluido su respuesta a los tratamientos térmicos.

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los pasos a seguir para el desarrollo de la soldadura de los aceros de baja aleación tratados térmicamente usando como referencia al código ASME sección IX-Soldadura: Calificación Estándar de Procedimientos y Soldadores. Este código se usará para la elaboración de las probetas, ensayos, criterios de aceptación, procesos posteriores a la soldadura y calificación de los procedimientos.

Para analizar la soldabilidad de un material que no tenga muchos antecedentes de operación se deben conocer los distintos problemas que pueden aparecer antes, durante y después de la soldadura. Dentro de los problemas que se pueden predecir o encontrar en la soldadura de estos aceros está el fisuramiento del metal soldado ya que estos aceros poseen altos valores de esfuerzo de fluencia y resistencia a la tracción, además de poseer una considerable cantidad de carbono y ciertos elementos de aleación que le brindan mejores propiedades mecánicas pero que limitan su soldabilidad por lo que se realiza un proceso adecuado como la aplicación de un precalentamiento y un tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Para conocer la susceptibilidad al fisuramiento de estos aceros se puede calcular el contenido de carbono equivalente para determinar la tendencia al fisuramiento en frío o debido a la cantidad de hidrógeno, además del cálculo del indicador al agrietamiento en caliente para determinar la formación de fisuras mientras se eleva la temperatura del acero a la temperatura de soldadura.

2.1 Determinación de la susceptibilidad al fisuramiento

2.1.1 Susceptibilidad al fisuramiento en caliente

Para definir la susceptibilidad del acero al agrietamiento en caliente se realiza el cálculo del indicador HCS (Hot Cracking Susceptibility).

$$HCS = \frac{10^3 C \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right)}{3Mn + Cr + Mo + V}$$

Ecuación 2.1 Indicador de la susceptibilidad al fisuramiento en caliente

(Fuente: Barragán H., 2016)

Si el $HCS < 4$ no tiene tendencia para aceros con $\sigma < 700$ MPa

Si el $HCS < 2$ no tiene tendencia para aceros con $\sigma > 700$ MPa

Esta ecuación relaciona la composición química del material y el valor de la resistencia a la tracción para determinar el coeficiente HCS.

Para definir la composición química y propiedades mecánicas de los aceros utilizados en el siguiente estudio se tomarán como referencia a los certificados de inspección de cada acero provisto por la empresa SERTECPET S.A. Estos certificados se encuentran en el ANEXO I y están especificados por las normas ASTM A519-06 “Especificación Estándar para Tubería Mecánica de Aceros al Carbono y Aceros Aleados” para el análisis químico y la norma ASTM 370 “Métodos de Ensayos Estándar y Definiciones para Pruebas Mecánicas de Productos de Acero” para determinar las propiedades mecánicas. Además de otros certificados que contienen normas internacionales relacionadas a la fabricación de estos aceros de baja aleación.

A continuación, se detallan en las tablas 2.1 y 2.2 la composición química y propiedades mecánicas respectivamente de los aceros AISI 4140 y 4145.

Tabla 2.1 Composición química de los aceros AISI 4140 y 4145

Número AISI de aleación	Esfuerzo de fluencia	Composición química en peso %									
		ksi	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
4140	89.5	0.41	0.80	0.001	0.012	0.26	0.12	0.99	0.15	0.16	0.005
4140	139.6	0.39	0.91	0.001	0.012	0.26	0.13	1.05	0.20	0.15	0.003
4145	147.5	0.46	1.11	0.006	0.010	0.28	0.12	1.17	0.30	0.20	--

(Fuente: Sertepect S.A.)

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de los aceros AISI 4140 y 4145

Número AISI de aleación	Esfuerzo de fluencia 0.2% offset		Último esfuerzo a la tracción		Elongación en 2 in. (%)	Reducción de área %	Dureza HRC
	ksi	MPa	ksi	MPa			
4140	89.4	616.4	110.7	763.2	25	50	20.6
4140	139.6	962	155.8	1074	18	65	32.5
4145	147.5	1017	163.9	1130	18	47.8	341 (Dureza Brinell)

(Fuente: Sertepect S.A.)

Ahora:

- Para el acero 4140-80 ksi de resistencia a la fluencia

$$HCS = \frac{10^3 * 0.41 \left(0.001 + 0.013 + \frac{0.25}{25} + \frac{0.13}{100} \right)}{3 * 0.84 + 1.02 + 0.16 + 0.004}$$

$$HCS = 2.8$$

- Para el acero 4140-120 ksi de resistencia a la fluencia

$$HCS = \frac{10^3 * 0.39 \left(0.001 + 0.012 + \frac{0.26}{25} + \frac{0.13}{100} \right)}{3 * 0.91 + 1.05 + 0.20 + 0.003}$$

$$HCS = 2.42$$

- Para el acero 4145-120 ksi de resistencia a la fluencia

$$HCS = \frac{10^3 * 0.46 \left(0.006 + 0.010 + \frac{0.28}{25} + \frac{0.12}{100} \right)}{3 * 1.11 + 1.17 + 0.30}$$

$$HCS = 2.72$$

Los aceros AISI 4140 y 4145 tienen un valor último a la tracción mayor a 700 MPa y sobrepasan el valor de 2 en los resultados calculados, por lo tanto, este grupo de aceros es susceptible al fisuramiento en caliente.

2.1.2 Susceptibilidad al fisuramiento en frío (enfriamiento)

Este tipo de fisuramiento ocurre a temperaturas menores a 200°C y después del proceso de soldadura, durante el enfriamiento y en ciertas aleaciones después de haber sido soldadas. Es muy frecuente en las aleaciones con alto contenido de carbono y elementos aleantes. Para determinar la susceptibilidad al agrietamiento en frío se puede calcular el carbono equivalente mediante la ecuación 1.1.

- Para el acero 4140-80 ksi de resistencia a la fluencia

$$CE = 0.41 + \frac{0.84}{6} + \frac{1.02 + 0.16 + 0.004}{5} + \frac{0.13 + 0.16}{15}$$

$$CE = 0.80$$

- Para el acero 4140-110 ksi de resistencia a la fluencia

$$CE = 0.39 + \frac{0.91}{6} + \frac{1.05 + 0.20 + 0.003}{5} + \frac{0.13 + 0.15}{15}$$

$$CE = 0.81$$

- Para el acero 4145-80 ksi de resistencia a la fluencia

$$CE = 0.46 + \frac{1.11}{6} + \frac{1.17 + 0.30}{5} + \frac{0.12 + 0.20}{15}$$

$$CE = 0.96$$

El valor mínimo de CE para evitar el agrietamiento por el hidrógeno es de 0.45, por lo tanto, este grupo de aceros si es susceptible a la aparición de fisuras.

2.2 Procedimiento para la ejecución de la soldadura

En este estudio experimental se realizarán pruebas de soldadura con el acero AISI 4140 con dos diferentes valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo a la tracción, además de una prueba adicional con el acero AISI 4145.

Los procesos de preparación y posteriores a la soldadura están sujetos al código ASME IX, los diagramas TTT del acero hipoeutectoide y los diagramas de transformación por enfriamiento continuo del acero AISI 4140.

Para desarrollar la soldadura en los aceros de baja aleación tratados térmicamente AISI 4140 y 4145 se interpretarán las características y propiedades de los materiales que van a soldarse, los procedimientos que sugieren los manuales de soldadura, además de las condiciones que dictan los fabricantes para la respectiva unión.

Se determinará la soldabilidad de los aceros de baja aleación tratados térmicamente usando la siguiente configuración:

- **Junta 1:** Acero AISI 4140 80 ksi y Acero AISI 4140 80 ksi.
- **Junta 2:** Acero AISI 4140 80 ksi y Acero AISI 4140 80 ksi con la aplicación de un alivio de esfuerzos posterior.
- **Junta 3:** Acero AISI 4140 80 ksi y Acero AISI 4140 110 ksi con la aplicación de un tratamiento térmico posterior a la soldadura.
- **Junta 4:** Acero AISI 4140 80 ksi y Acero AISI 4145 120 ksi.
- **Junta 5:** Acero AISI 4140 110 ksi y Acero AISI 4145 120 ksi con la aplicación de un alivio de esfuerzos posterior.

Este arreglo de aceros con distintos esfuerzos a la fluencia y a la tracción se lo realiza con la finalidad de encontrar el mejor material para la construcción de herramientas de completación de pozos petroleros y que cumpla con los estándares que exige la norma API-19AC.

Como segunda etapa se construirán los cupones de ensayo en base a los parámetros del código ASME IX para la calificación de la soldadura en tubería. Estos cupones estarán diseñados para cumplir con las dimensiones de las probetas que posteriormente se ensayarán. La norma dicta en la tabla QW-451 que se puede usar cupones de soldadura con un espesor sobre 3/8" (10 mm), pero menor a 3/4" (19 mm) con un requerimiento de 2 probetas para el ensayo de tracción y 4 probetas para los ensayos de doblado. Además, para la soldadura de ranura, el valor del diámetro exterior de la tubería es ilimitado como se puede verificar en la tabla QW-452.3.

Para definir la longitud de los cupones se tomó en cuenta la figura QW 462.1 (b) que muestra una longitud total de soldadura en la probeta de 10 in (250 mm) que están basados en una distancia suficiente para que se extiendan las mordazas que realizan el ensayo de tracción. En los cupones se usó una longitud de 6 in cada uno para que la longitud total del espécimen soldado sea de aproximadamente 13 in. Todos estos parámetros se muestran en la figura 2.1

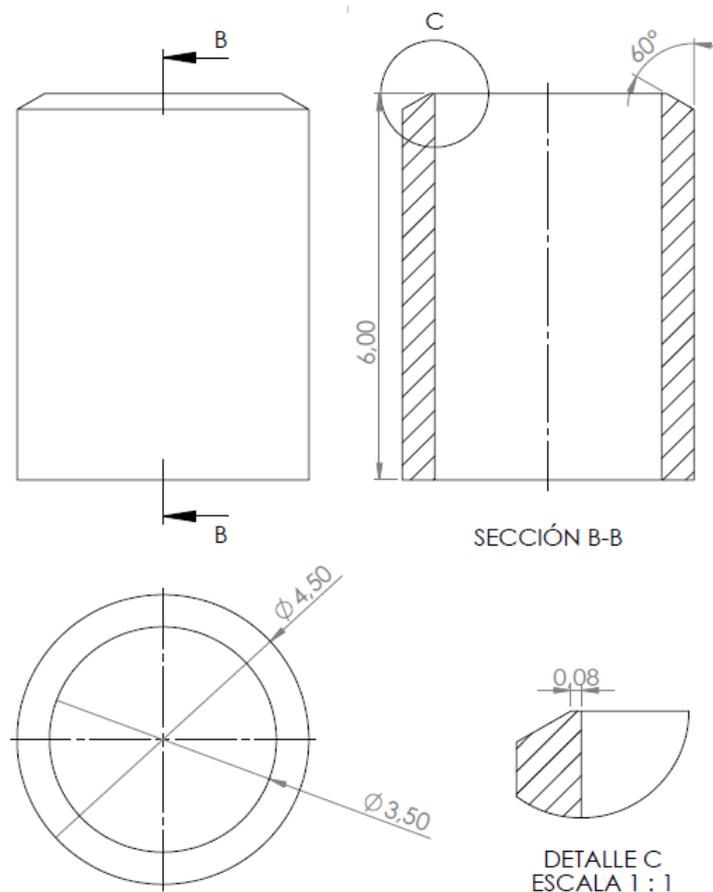


Figura 2.1 Dimensiones de los cupones elaborados para la calificación de soldadura según el código ASME IX (dimensiones en pulgadas).

(Fuente: Propia)

2.3 Especificaciones del proceso de soldadura (WPS)

El control de los parámetros de soldadura es sustancial para los ensayos de soldabilidad de un material y en general para la realización y control de un procedimiento. Por lo tanto, se describirá detalladamente cada parámetro que contiene un WPS y estos se presentarán en el ANEXO II.

2.3.1 Material Base

Dentro del código ASME IX existe la denominación del número P para los materiales base ferrosos con el propósito de reducir el número de calificaciones de procedimientos de soldadura. Algunos materiales como los aceros de baja aleación no se encuentran dentro de la denominación, pero el código establece en el párrafo QW-424 que si se usa un material base que no está enlistado en la tabla QW/QB-422 para la calificación de un procedimiento, el metal debe ser identificado en el WPS y en el PQR con sus respectivas especificaciones, tipo y grado o por su composición química y propiedades mecánicas. El esfuerzo mínimo a la tracción igualmente debe ser definido por la organización que especifica al metal sin asignación.

2.3.2 Material de aporte

Como se mencionó en la parte 1.4.7, el mejor material de aporte para el procedimiento SMAW de los aceros de baja aleación tratados térmicamente es uno que posea un nivel bajo de hidrógeno, por lo tanto, se escoge el electrodo E-11018-M.

El E11018-M es un electrodo de bajo contenido de hidrógeno con hierro en polvo en su revestimiento. Posee una gran velocidad de deposición y permite obtener uniones de alta resistencia mecánica. Los depósitos obtenidos son de excelente calidad radiográfica. (Indura Manual de Soldadura, 2007).

Este electrodo será usado para los pases de relleno en todas las probetas designadas anteriormente. Además del uso del electrodo que se recomienda, se usarán los electrodos E6010 y E7010 para el pase de raíz de algunas juntas que se detallarán a continuación.

La idea del uso de electrodos de baja denominación en cuanto a su esfuerzo de tracción 60 y 70 ksi es para comprobar la compatibilidad química y mecánica del electrodo con el material base ya que el 80% de defectos aparecen en el primer pase.

También se puede pensar en el uso del electrodo ER-80b-2 para el primer pase con el procedimiento GTAW ya que algunos estudios lo recomiendan.

Para la soldadura de la junta 1 y 2 se realizará un pase de raíz con el electrodo E7010. Este electrodo presenta las características mostradas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características químicas y mecánicas del electrodo E-7010

Análisis químico del metal depositado (valores típicos)					
C 0.05%	Mn 0.42%	Si max 0.30%	P max 0.025%	S max 0.025%	Mo 0.45
Propiedades mecánicas del metal depositado					
Resistencia la tracción	79.8 ksi	540 MPa	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]		Min. 80
Límite de fluencia	58 ksi	400 MPa			
Alargamiento en 50 mm	23%				
Parámetros de soldeo recomendados					
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Polaridad	
		Mínimo	máximo		
3.2 (1/8")	350	80	120	C.C (+)	

(Fuente: Oerlikon)

Para la soldadura de la junta 4 se realizará un pase de raíz con el electrodo E6010. Esta junta contiene a los materiales con la mínima y máxima resistencia a la tracción sin ningún tipo de tratamiento térmico y un proceso de enfriamiento común.

El electrodo E6010 presenta las características mostradas en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Características químicas y mecánicas del electrodo E-6010

Composición química (valores típicos)				
C 0.09%	Si 0.18%	Mn 0.44%	S 0.02%	
Propiedades mecánicas (valores típicos)				
Resistencia la tracción	84 ksi	579 MPa	Impacto	70J a -30°C
Límite de fluencia	63 ksi	434 MPa		
Alargamiento en 50 mm	27%			
Procedimientos típicos de operación				
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Polaridad
		Mínimo	máximo	
3.2 (1/8")	350	75	120	C.C (+)

(Fuente: Lincoln Electric)

Para el desarrollo de la junta 5 se utilizará el electrodo E11018-M para el pase raíz y los pases de relleno. Cabe mencionar que el uso del electrodo E11018-M para todos los pases se emplea en la planta ASME de la empresa SERTECPET S.A. Las características se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Características químicas y mecánicas del electrodo E-11018-M

Composición química (típica) del metal depositado							
C 0.04%	Mn 1.54%	Si 0.32%	P 0.013%	S 0.010%	Cr 0.30%	Ni 1.86%	Mo 0.40%
Características típicas del metal depositado							
Tratamiento Térmico	Resultado de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte		Requerimientos	Energía absorbida Ch-v	Requerimientos		
Sin T.T.	Resistencia la tracción	780 MPa	760 MPa	42J a -51°C	27J a -51°C		
	Límite de fluencia	717 MPa	680-760 MPa				
	Alargamiento en 50 mm	23%	20%				
Amperajes recomendados							
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.			
		Mínimo	Máximo				
3.2 (1/8")	350	120	160	32			

(Fuente: Indura)

2.3.3 Diseño de la Junta

El tipo más común de junta empleada en la fabricación de tuberías soldadas es la junta en V a tope. Esta junta es la mejor desde el punto de vista de la distribución de esfuerzos. Su campo general de aplicación es la soldadura tubería con tubería y tubería con accesorios. En cuanto al diseño de la junta se tomará como referencia la figura QW-469.1 del código ASME IX para determinar el ángulo, el talón y la separación de la junta. El ángulo será de 30°, el talón es de 2 mm y la separación de la junta de 1/12 in (2 mm) máximo. Así como se muestra en la figura 2.2.

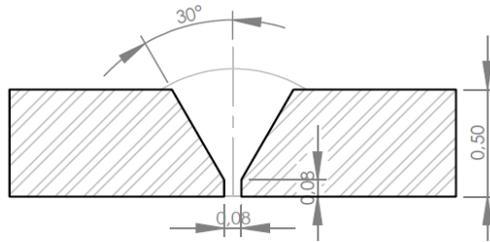


Figura 2.2 Diseño de la junta a tope (dimensiones en pulgadas).

(Fuente: Propia)

2.3.4 Posición de soldadura

Para la calificación de la soldadura de ranura en tubería se pueden usar las posiciones 1G, 2G, 5G y 6G como se muestra en la figura 2.3. El código menciona que en la soldadura de tuberías con un $OD \leq 24$ in (610 mm) se procederá a calificar la posición 6G para todas las posiciones.

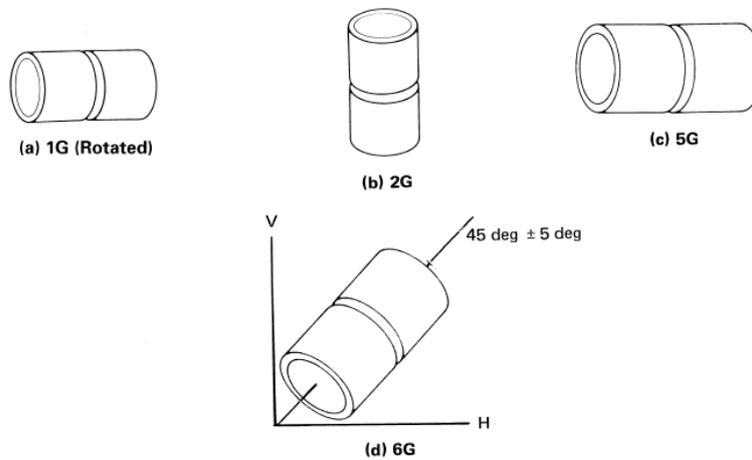


Figura 2.3 Posiciones de soldadura para tubería.

(Fuente: ASME IX, 2019)

En la soldadura de los cupones de los aceros AISI 4140 80 ksi, AISI 4140 110 ksi y AISI 4145 se aplicará la posición 6G para calificar todas las posiciones.

2.3.5 Pre calentamiento

En este estudio se va a determinar la temperatura de pre calentamiento bajo ciertos criterios:

- 1) La microestructura ideal para soldar los aceros HTLA es una estructura bainítica en lugar de la martensítica.

- 2) Para lograr una estructura bainítica se debe sobrepasar la temperatura de transformación de la martensita (M_s), pero en los aceros HTLA esta temperatura es superior a los 260°C y una temperatura mayor a los 288°C provocará la formación de una capa de óxido.
- 3) En el acero AISI 4140 la temperatura M_s es de aproximadamente 340°C por lo que se debe evitar alcanzar esta temperatura en el precalentamiento debido a lo expuesto en el punto 2.
- 4) Según el método de Seferian, las temperaturas de precalentamiento para los aceros AISI 4140 (80ksi), 4140 (110ksi) y 4145 (120ksi) son 348°C, 352°C y 415°C respectivamente por lo que este método queda descartado en base al punto 2 y 3.
- 5) En la tabla 1.5 y en la ecuación 1.2 se puede determinar una temperatura que no supera los 300°C que son de 176°C y 277°C respectivamente. Se realizó un promedio entre estas dos temperaturas y se obtuvo una temperatura de 220°C para el precalentamiento de las juntas 1,2 y 3. Para la junta 4 y 5 con el acero AISI 4145 no se tratará de exceder la temperatura M_{90} (240°C) de un acero hipoeutectoide como se muestra en la figura 1.10.

La temperatura entre pases no debe caer por debajo de la temperatura de precalentamiento, por lo que se debe medir y controlar rigurosamente esta temperatura.

2.3.6 Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura

Para determinar el tratamiento térmico posterior a la soldadura se toma como referencia la tabla 1.3 que muestra las temperaturas y tiempos a las que estuvieron sometidos los aceros en su proceso de fabricación. El objetivo de este proceso adicional es reducir el contenido de hidrógeno en la soldadura, además de mejorar o igualar ciertas propiedades mecánicas que se vieron afectadas debido al incremento de temperatura.

Este proceso se lo realiza antes de que la soldadura se enfríe hasta la temperatura ambiente si se usó una temperatura de precalentamiento menor a la temperatura M_s .

La temperatura M_s de muchos aceros ha sido determinada experimentalmente y existen fórmulas empíricas que muestran una aproximación de su valor.

$$M_s (\text{°C}) = 539 - 432x\%C - 30.4x\%Mn - 17.7x\%Ni - 12.1x\%Cr - 7.5x\%Mo$$

Ecuación 2.2 Fórmula empírica para determinar la temperatura de transformación de la martensita en los aceros.

(Fuente: Colás & Totten., 2016)

Conociendo la composición química del acero AISI 4140 (80ksi) se puede determinar que la temperatura M_s es de 322.3°C, para el acero AISI 4140 (110ksi) es de 326°C y para el acero AISI 4145 (120ksi) es de 288°C.

Según el código ASME IX, párrafo QW-407, se requiere una calificación del procedimiento para la aplicación de un tratamiento térmico posterior a la soldadura si este proceso se lleva a cabo a una temperatura inferior a A_{c1} , superior a A_{c3} , una combinación de las dos como en el templado y revenido o un tratamiento entre ambas A_{c1} y A_{c3} . El valor de las temperaturas crítica superior A_{c3} y crítica inferior A_{c1} para el acero AISI 4140 se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Temperaturas críticas aproximadas y puntos M_s/M_f para los aceros al carbono y aleados

SAE no.	Calentamiento (°C)		Enfriamiento (°C)		Temperatura del temple (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)
	A_{c1}	A_{c3}	A_{r1}	A_{r3}			
4140	748	793	743	693	815	337	-
4150	754	787	698	673	-	-	-

(Fuente: Handbook of metallurgical process and design, 2004)

Como los aceros AISI 4140 y 4145 no constan dentro de la denominación de número P de ASME IX, no se puede determinar con claridad el tipo de tratamiento térmico que se les debe dar las juntas soldadas. En esta situación se usarán los diagramas de enfriamiento continuo y tratamiento térmico para elegir el proceso adecuado a los requerimientos.

Para los cupones de la junta 1 y 2 que son del mismo material se comparará la influencia del tratamiento térmico en una de las juntas soldadas (específicamente en la junta 2), en la junta 1 se dejará enfriar lentamente en arenas refractarias mientras que para la junta 2 se realizará un recocido (alivio de esfuerzos) a una temperatura de 440°C que se mantendrá por 20 minutos y se dejará enfriar lentamente en el horno.

Para los cupones de la junta 3 se realizará un tratamiento térmico de revenido inmediatamente posterior a la soldadura a una temperatura de 580°C dentro de un horno con una razón de calentamiento de 20°C/min, se mantendrá por 30 minutos ya que normalmente es de 1 hora por cada pulgada de la junta, y luego se enfriará rápidamente en aire.

La junta 4 se dejará enfriar lentamente en arenas refractarias. Y para la junta 5 se realizará un alivio de esfuerzos cuando la soldadura se haya enfriado y no se observen discontinuidades por inspección visual ya que el hecho de que se pueda observar alguna fisura significa que se formó demasiada martensita durante la soldadura y tratar de hacer

un proceso posterior provocará mayores disconformidades. La temperatura de alivio de esfuerzos será de 440°C por 20 minutos con enfriamiento lento controlado en el horno.

2.3.7 Variables Eléctricas

Los valores de voltaje, amperaje y tipo de corriente están relacionados con ciertas características del electrodo que el fabricante establece, el espesor del material y la posición de soldadura.

Durante la soldadura de la probeta de prueba se establecerán las características eléctricas para todos los procedimientos y se calibrarán los equipos.

El aporte térmico está relacionado con las variables eléctricas dentro de la soldadura, por lo que cabe mencionar su fórmula.

$$Q = \frac{\text{Voltaje} * \text{Amperaje} * 60}{v[\text{in}/\text{min} (\text{mm}/\text{min})]}$$

Ecuación 2.3 Fórmula para el cálculo del aporte térmico

(Fuente: ASME IX, 2019)

2.3.8 Técnica

Se realizará una limpieza mecánica a cada cupón para que queden libres de impurezas sobre las juntas y la superficie.

Los electrodos permanecerán en el horno secándose a una temperatura menor a 60°C por cuatro horas antes de la soldadura.

La limpieza entre pases se realizará con una grata y un cepillo metálico para todas las juntas.

La velocidad de avance será controlada en los primeros pases revisando la penetración del primer pase de soldadura y el pase en caliente. La técnica de soldadura para todas las juntas será oscilada.

2.4 Procedimiento Experimental

Para realizar la soldadura de las probetas se seguirá todo lo descrito en el WPS de cada procedimiento y así se obtiene:

- I. Pre calentamiento



Figura 2.4 Pre calentamiento con llama
(Fuente: Propia)

II. Soldadura



Figura 2.5 Soldadura de la tubería.
(Fuente: Propia)



Figura 2.6 Medición de la temperatura entre pases.
(Fuente: Propia)



Figura 2.7 Limpieza entre pases con grata.

(Fuente: Propia)



Figura 2.8 Cordón de soldadura acero AISI 4140

(Fuente: Propia)

III. Tratamiento térmico posterior a la soldadura



Figura 2.9 Programación de la temperatura del horno

(Fuente: Propia)

2.4.1 Datos recopilados de la soldadura

Los datos obtenidos de la soldadura se presentan en las tablas 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11.

Tabla 2.7 Junta 1 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4140 80 ksi

Número de pase	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Número de electrodos consumidos	Temperatura entre pases (°C)	Aporte térmico (kJ/mm)
1	85 DC ⁻	29	780	4	220	147.55
2	85 DC ⁺	28.3	240	3	210	45.46
3	110 DC ⁺	22.4	1200	4	206	232.82
4	110 DC ⁺	22.4	840	3	193	162.97
5	110 DC ⁺	22.7	420	3	190	82.57

(Fuente: Propia)

Tabla 2.8 Junta 2 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4140 80 ksi

Número de pase	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Número de electrodos consumidos	Temperatura entre pases (°C)	Aporte térmico (kJ/mm)
1	85 DC ⁻	29	1500	5	240	291.14
2	85 DC ⁺	28.8	360	3	180	69.39
3	112 DC ⁺	23.4	420	4	220	86.67
4	112 DC ⁺	23	840	3	210	173.34
5	115 DC ⁺	23	240	3	207	50.85

(Fuente: Propia)

Tabla 2.9 Junta 3 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4140 110 ksi

Número de pase	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Número de electrodos consumidos	Temperatura entre pases (°C)	Aporte térmico (kJ/mm)
1	85 DC ⁻	29	300	4	230	46.58
2	100 DC ⁺	27.8	300	3	210	52.53
3	110 DC ⁺	22.4	360	4	206	58.20
4	114 DC ⁺	22.3	240	3	204	48.04
5	107 DC ⁺	22.8	540	3	214	103.73

(Fuente: Propia)

Tabla 2.10 Junta 4 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4145 120 ksi

Número de pase	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Número de electrodos consumidos	Temperatura entre pases (°C)	Aporte térmico (kJ/mm)
1	70 DC ⁻	26.7	1020	4	220	150.10
2	95 DC ⁺	25.4	480	3	195	91.20
3	110 DC ⁺	22.3	480	4	198	92.71
4	110 DC ⁺	22.4	780	3	200	151.33
5	105 DC ⁺	22.4	360	3	205	66.67

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11 Junta 5 aceros AISI 4140 80 ksi – AISI 4145 120 ksi

Número de pase	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Número de electrodos consumidos	Temperatura entre pases (°C)	Aporte térmico (kJ/mm)
1	107 DC ⁺	22.7	1260	5	220	240.97
2	110 DC ⁻	22.8	780	4	190	154.03
3	106 DC ⁻	21.7	780	3	181	141.27
4	102 DC ⁻	21.4	600	3	210	103.12
5	102 DC ⁻	21.4	240	3	210	41.24

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12 Resumen de los parámetros de soldadura

Número junta	Promedio Voltaje (V)	Total Tiempo (min)	Total consumibles (u)	Promedio temperatura entre pases (°C)
1	24.96	58	17	203.8
2	25.44	56	18	211.4
3	24.86	29	17	212.8
4	23.84	52	17	203.6
5	22	61	18	202.2

(Fuente: Propia)

2.4.2 Equipos y materiales

Equipos:

Tabla 2.13 Características de la soldadora

Soldadora	
	<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marca: Lincoln Electric • Modelo: Inverter V350 Pro • Voltaje R-91: 58-60 [V] • Voltaje B-83: 18-21 [V] • Amperaje R-91: 98-100 [A] • Amperaje B-83: 128-131 [A] • Frecuencia: 60 [Hz] • Fase: 1 [Ph]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.14 Características del horno

Horno	
	<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marca: Nabertherm • Modelo: N300/H • No.: 154748 • Año: 199 • Máx. Temperatura: 1340 [°C] • Voltaje: 220 [V] • Frecuencia: 60 [Hz] • Amperaje: 70.9 [A] • Potencia: 27.0 [kW]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.15 Características del pirómetro

Pirómetro	
	<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marca: Fluke • Modelo: 68 HI Thermometer • Rango de temperatura: -32 a 760°C • Relación de distancia al punto: 50:1 • Alarma Hi-Lo: Si

(Fuente: Propia)

Materiales:

- Tuberías de acero AISI 4140 y AISI 4145
- Electrodo E6010-E7010-E11018M (1/8")
- Amoladora
- Gratas
- Cepillo metálico
- Tanque de GLP
- Arena refractaria
- Pie de rey

2.5 Calificación de los procesos de soldadura de acuerdo con ASME BPVC Sección IX

Parte del estudio de soldabilidad es la calificación del proceso usado y especificado en el WPS. El código ASME IX especifica los ensayos mecánicos que deben ser realizados en las juntas soldadas y sus parámetros de aceptación.

2.5.1 Ensayo radiográfico

Dentro de los ensayos no destructivos se cuenta con el ensayo de radiografía que inspecciona la densidad del material e identifica las indicaciones presentes en el mismo.

Este ensayo puede detectar discontinuidades presentes en la soldadura. Dentro del código ASME IX se dictan los parámetros de aceptación para las indicaciones lineales y redondas.

1. Indicaciones lineales

- (a) Cualquier tipo de fisura o zona de fusión y penetración incompleta.
- (b) Cualquier inclusión de escoria alargada que tenga una longitud mayor a:
 - i. 1/8 in. (3 mm) para t hasta e incluido 3/8 in. (10 mm)
 - ii. 1/3t para t superiores a 3/8 in. (10mm) hasta e incluido 2 ¼ in. (57mm)
 - iii. ¾ in. (19 mm) para t superiores a 2 ¼ in. (57mm)
- (c) Cualquier grupo de inclusiones en línea que tengan una longitud agregada mayor a t en una longitud de 12t, excepto cuando la distancia entre las imperfecciones sucesivas excede 6L donde L es la longitud de la imperfección más larga en el grupo.

2. Indicaciones redondas

- (a) La máxima dimensión permisible para las indicaciones redondas puede ser del 20% del t o 1/8 in. (3mm), cualquiera que sea la menor.
- (b) Para soldaduras en materiales que tengan menos de 1/8 in. (3mm) de espesor, el número máximo de indicaciones redondas aceptables no puede exceder 12 in. en una longitud de soldadura de 6 in. (150mm). Un número proporcionalmente menor de indicaciones redondeadas se permitirá en soldaduras de longitud menores a 6 in. (150mm).
- (c) Para soldaduras en materiales que tengan más de 1/8 in. (3mm) de espesor, los gráficos de la figura QW-191.1.2.2(b)(4) representan los tipos de indicaciones redondas aceptables.

Para determinar los parámetros del equipo radiográfico se tendrá en cuenta lo siguiente: el espesor del material, la sobremona del cordón de soldadura, el perímetro de la zona que será expuesta a los rayos X, la capacidad del equipo y la distancia entre la fuente radioactiva y la probeta.

Conociendo los debidos parámetros se procedió a realizar el montaje y exposición radiográfica de las juntas soldadas tal como se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10 Montaje de la tubería soldada.

(Fuente: Propia)

2.5.2 Elaboración de las probetas para ensayos de doblado y tracción

El tipo y número de probetas que serán ensayadas para calificar el procedimiento de soldadura en ranura se encuentran en la tabla 2.15 de acuerdo al código ASME IX.

Tabla 2.16 Límites de espesores para la calificación del procedimiento y sus ensayos en las probetas

Espesor T del cupón para la prueba de soldadura in. (mm)	Rango de espesor T del material base in. (mm)		Espesor máximo t del metal soldado depositado, in. (mm)	Tipo y número de ensayos requeridos (Ensayos de tracción y de doblado)			
	Mínimo	Máximo		Tracción	Doblado	Doblado de cara	Doblado de raíz
Sobre 3/8 (10), pero menor 3/4 (19)	3/16(5)	2T	2t	2	Nota 5	2	2

(Fuente: ASME IX, 2019)

Nota 5: 4 ensayos de doblado lateral pueden ser sustituidos por los requeridos de cara y raíz, cuando el espesor T es 3/8 in. (10mm) o superior.

En el caso de este estudio, todas las juntas tienen un espesor de $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm).

Para la sustracción de las probetas en soldadura de tuberías se toma la referencia de la figura 2.11.

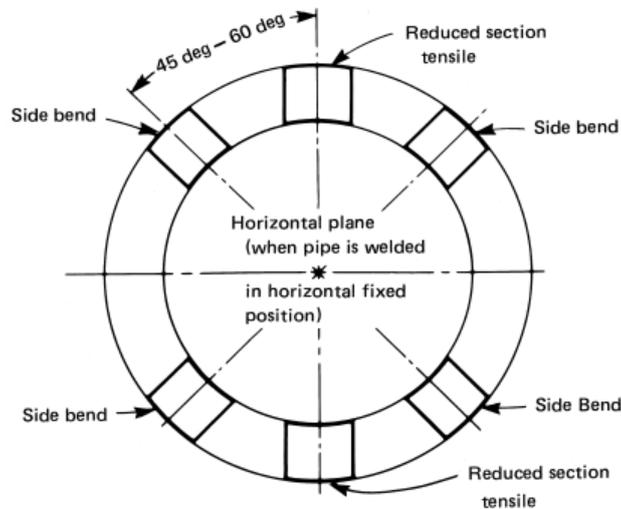


Figura 2.11 Localización de las probetas en tubería para su sustracción.

(Fuente: ASME IX, 2019)

Los cortes de las probetas se deben realizar con métodos que no modifiquen la estructura del material, por lo que, la sierra de vaivén con refrigeración se utilizará para extraer las partes que posteriormente serán maquinadas.

2.5.3 Ensayo de Tracción

Los ensayos de tracción son realizados para evaluar la resistencia y ductilidad del material base, el material de aporte, y la soldadura. Estos ensayos proporcionan datos cuantitativos para verificar que el esfuerzo a la tracción de una soldadura cumpla con los valores mínimos especificados.

En el ensayo se aplica una carga de tracción a las probetas hasta que la falla ocurra. Este ensayo entrega información de los valores de esfuerzo de fluencia y el último esfuerzo a la tracción junto con las medidas de ductilidad, elongación y la reducción de área.

Para el ensayo de tracción se necesitan 2 probetas por cada tubería que deberán tener las siguientes dimensiones tal como se muestra en la figura 2.12.

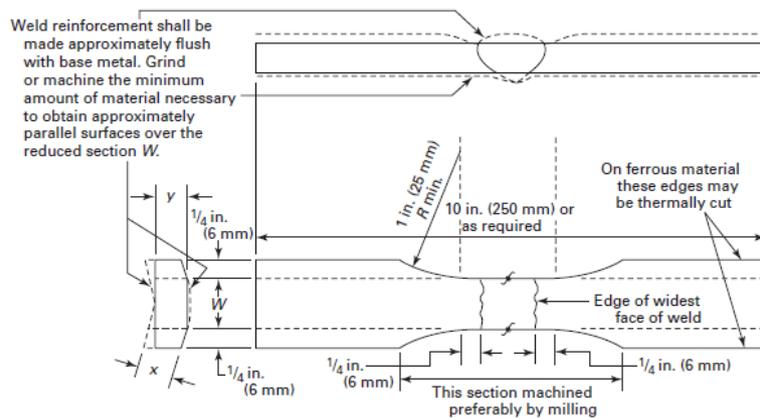


Figura 2.12 Dimensiones de probetas para tracción.

(Fuente: ASME IX, 2019)

El maquinado de las probetas al igual que el corte se deben realizar sin alterar demasiado la estructura del material, de preferencia usando el método de desbaste de viruta con fresadora tal como se muestra en la figura 2.13 con el fin de obtener las dimensiones que dicta el código ASME IX.



Figura 2.13 Maquinado de probetas para ensayos mecánicos.

(Fuente: Propia)

Las probetas maquinadas previas al ensayo de tracción se muestran en la figura 2.14.



Figura 2.14 Probetas de tracción.

(Fuente: Propia)

Los ensayos de tracción se realizaron en la máquina universal de ensayos del LAEV de la Escuela Politécnica Nacional, tal como se muestra en la figura 2.15.



Figura 2.15 Ensayo de tracción.

(Fuente: Propia)

Cada probeta debe ser sometida a una carga de tracción. El esfuerzo a la tracción debe ser calculado al dividir la última carga total para el área menor transversal de la probeta. Para que la probeta pase el ensayo, su valor al esfuerzo a la tracción no debe ser menor a:

- (a) El valor mínimo del esfuerzo a la tracción del material base, o
- (b) El valor mínimo entre dos materiales base de diferentes valores de esfuerzo a la tracción.
- (c) Si la probeta se rompe en el metal base afuera de la soldadura o de la línea de fusión (interfaz de la soldadura), el ensayo puede ser aceptado si la resistencia no esté más del 5% por debajo del mínimo esfuerzo a la tracción del material base.

2.5.4 Ensayo de Doblado

El ensayo de doblado tiene por objetivo la evaluación de la ductilidad y solidez de las juntas soldadas. Este ensayo es realizado mediante el doblado de una tira de material soldado a

un radio específico. La superficie de la probeta doblada es sometida a un gran esfuerzo plástico, el cual puede causar fractura o fisuras en el material menos dúctil o a su vez abrir un defecto de soldadura existente como un poro o falta de fusión. Cuando se detectan defectos en la soldadura las probetas del ensayo de doblado fallan.

Para el ensayo de doblado se necesitan 4 probetas por cada tubería que deberán tener las siguientes dimensiones que se especifica en QW-462.2 del código ASME IX, tal como se muestra en la figura 2.16.

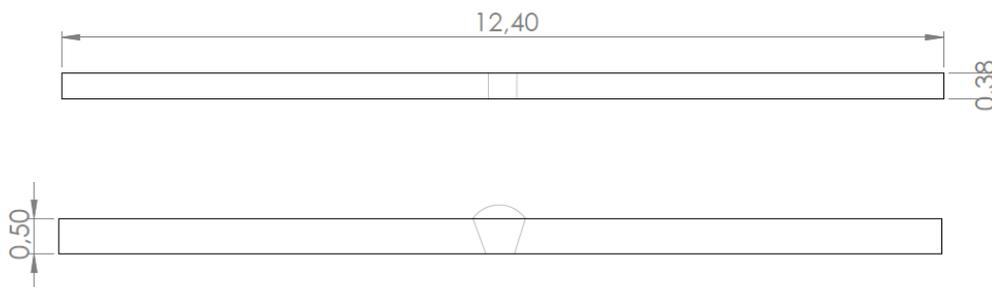


Figura 2.16 Dimensiones de probetas para doblado (dimensiones en pulgadas).

(Fuente: Propia)

En este ensayo se utilizó la dobladora hidráulica del Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional que se muestra en la figura 2.17. Cada probeta debe ser preparada con la adecuada limpieza, preferiblemente con el uso de un disco abrasivo para refinar la superficie en donde se va a aplicar una carga vertical constante con el respectivo Jig.



Figura 2.17 Dobladora Hidráulica.

(Fuente: Propia)

Los criterios de aceptación del ensayo de doblado dicen que las probetas dobladas no deben tener discontinuidades abiertas en la soldadura o en la zona afectada por el calor mayores a 1/8 in. (3 mm), medidas en cualquier dirección sobre la superficie convexa de la probeta luego de ser doblada. Las discontinuidades abiertas que aparecen en las esquinas de la probeta durante el ensayo no deben ser consideradas al menos que haya una evidencia clara de que se trate de una falta de fusión, inclusión de escoria u otras discontinuidades internas.

2.5.5 Metalografías

Un ensayo metalográfico implica la examinación visual de una superficie preparada, ya sea a simple vista o con el uso de herramientas que amplifiquen la visión. La superficie preparada por lo general debe estar pulida y totalmente limpia, esto ayuda al paso siguiente que es el ataque químico con el uso de un compuesto que posibilita la visión de la microestructura del material. El ataque sobre la superficie revela los tipos de fases, constituyentes, cambios en el tamaño de grano, configuración de la soldadura, además de ciertas indicaciones como poros, fisuras e inclusiones.

Para el ensayo metalográfico se elaboraron 5 probetas, una por cada junta y una adicional del material base. Las probetas fueron preparadas de acuerdo a la norma ASTM E3 “Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas”.

Para el ataque químico se tomó como referencia la norma ASTM E407-07 “Práctica Estándar para el Microataque de Metales y Aleaciones”. La norma indica la composición química del componente que deberá usarse, además de la microestructura que revela debido a su aplicación sobre la muestra. El reactivo vilella será usado para los propósitos de la investigación.

Dentro del ensayo metalográfico se realizará una examinación macroscópica, la cual normalmente se realiza con un aumento de 100X o menos para revelar la heterogeneidad del metal aleado. Dentro del macroataque se estudiará la estructura de la soldadura, la medida de penetración de la junta, la dilución del material de aporte con el material base y la identificación de la presencia de escoria, fundente, porosidad, fisuras en la soldadura y las zonas afectadas por el calor.

2.5.6 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza determina la resistencia de un material a ser indentado o rayado, también es usado como un método para determinar el último esfuerzo a la tracción en el área ensayada. Las medidas de dureza pueden proveer información acerca de los cambios

metalúrgicos causados por la soldadura. En aceros aleados, una alta dureza puede ser el indicador de la presencia de martensita en la zona afectada por el calor de la soldadura, mientras que una baja dureza puede indicar una condición de sobre templado. La soldadura puede causar bajas durezas en la ZAC debido a la recuperación y recristalización del grano.

Los ensayos de dureza son ejecutados con el uso de un indentador al cual se le aplica una carga en contra de la superficie de la probeta para dejar una marca o indentación. El tipo de material, geometría y tamaño del indentador depende del método de ensayo y el rango de dureza. La escala a utilizar será Rockwell C con indentador cónico de diamante ya que es el más apropiado para medir a los aceros que posean un alto valor de dureza tal como lo dicta la norma ASTM E18-15.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados obtenidos

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación, los mismos que serán evaluados bajo los criterios de aceptación del código ASME IX con el cual se empezó a realizar el procedimiento de soldadura.

3.1.1 Ensayo radiográfico

El reporte radiográfico presentado por el laboratorio de E.N.D. se encuentra en el ANEXO III.

A continuación, se muestran las indicaciones evidenciadas en las películas radiográficas para posteriormente ser analizadas con los criterios de aceptación del código ASME IX. Cabe destacar que cada película fue examinada en el negatoscopio para distinguir las indicaciones presentes en los tramos de la tubería soldada.

Las indicaciones lineales como dicta la terminología de ASME IX son: fisuras, fusión incompleta, penetración inadecuada y escoria.

En la figura 3.1 se evidencia falta de fusión en la zona central de la película y una concavidad interna debido a la penetración inadecuada en la parte derecha de 13 mm de longitud.

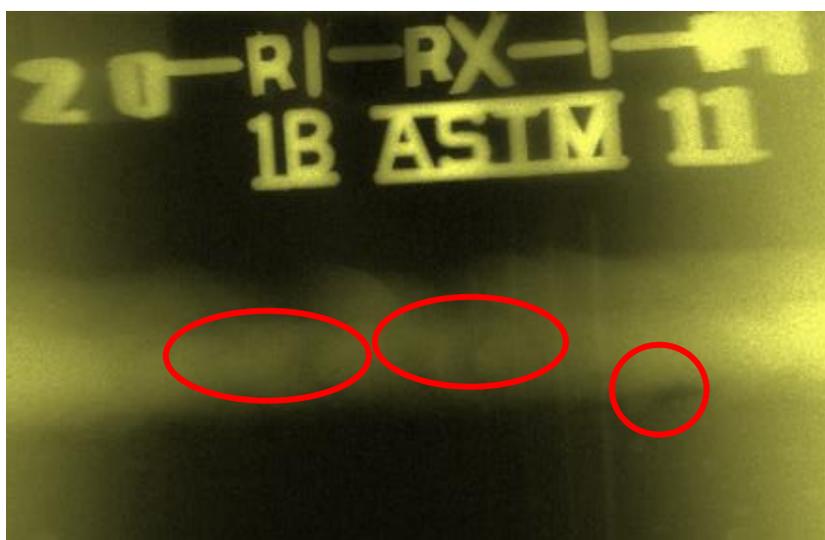


Figura 3.1 Inclusiones lineales.

(Fuente: Propia)

Las indicaciones redondas como dicta la terminología de ASME IX son: porosidades e inclusiones de escoria. En la figura 3.2 se muestra una porosidad (izquierda) de 1 mm y una inclusión de escoria (derecha) de 3 mm de longitud.

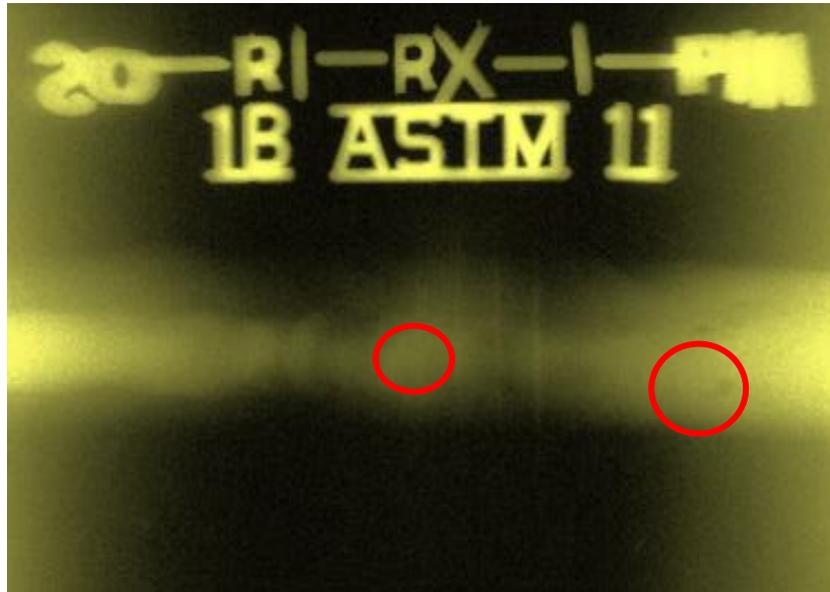


Figura 3.2 Inclusiones redondas

(Fuente: Propia)

3.1.2 Ensayo de doblado lateral

Parte de la calificación del procedimiento de soldadura está en la aprobación o rechazo de los ensayos mecánicos, los resultados del ensayo de doblado lateral se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resultados del ensayo de doblado lateral

Junta	Identificación de la probeta	Observación	Calificación parcial	Calificación total
1	1.1	Indicación de 2.1 mm	A	A
	1.2	Ausencia de indicaciones	A	
	1.3	Indicación de 0.52 mm	A	
	1.4	Ausencia de indicaciones	A	
2	2.1	Indicación de 11.1 mm	R	R
	2.2	Indicación de 4.5 mm	R	
	2.3	Indicación de 7.4 mm	R	
	2.4	Indicación de 6.7 mm	R	

3	3.1	Indicación de 0.86 mm	A	A
	3.2	Ausencia de indicaciones	A	
	3.3	Ausencia de indicaciones	A	
	3.4	Ausencia de indicaciones	A	
4	4.1	Indicación de 6.0 mm	R	R
	4.2	Indicación de 11.1 mm	R	
	4.3	Indicación de 9.48 mm	R	
	4.4	Indicación de 8.44 mm	R	
5	5.1	Indicación de 1.58 mm	A	A
	5.2	Ausencia de indicaciones	A	
	5.3	Indicación de 1.78 mm	A	
	5.4	Ausencia de indicaciones	A	

(Fuente: Propia)

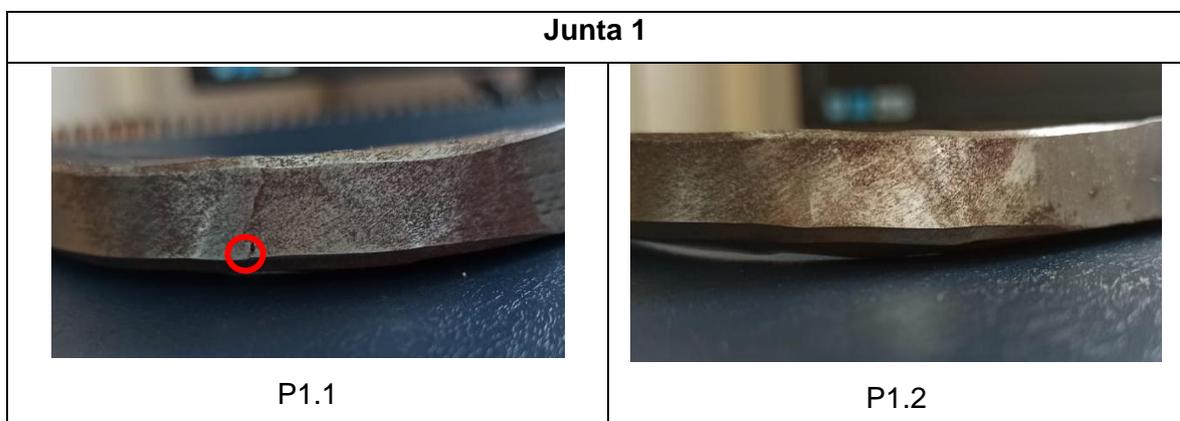
A: aprobado

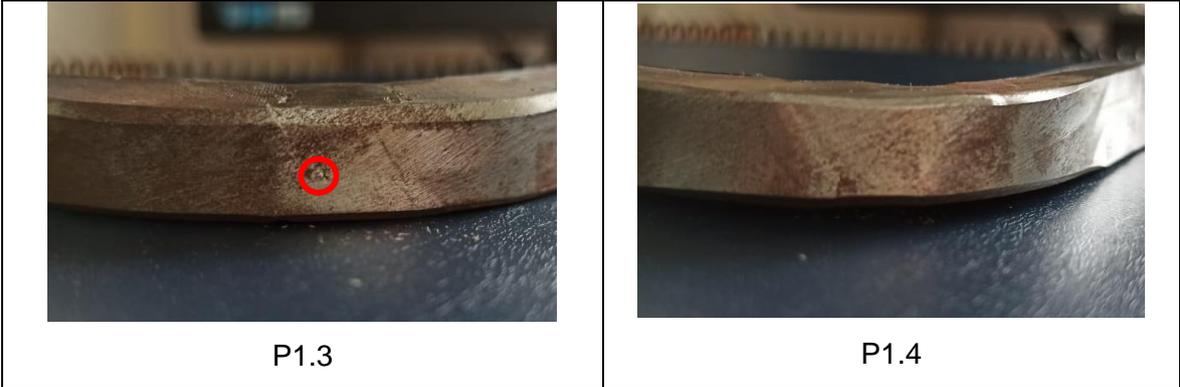
R: rechazado

El grupo de probetas es aceptado o rechazado de acuerdo a los criterios de aceptación que se establecieron anteriormente, en el caso de que alguna de las probetas del grupo fallare, todo el grupo será rechazado.

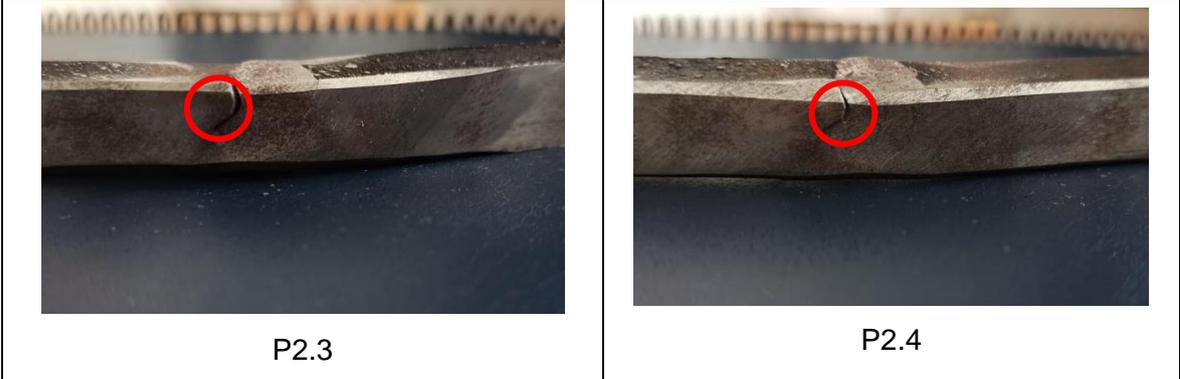
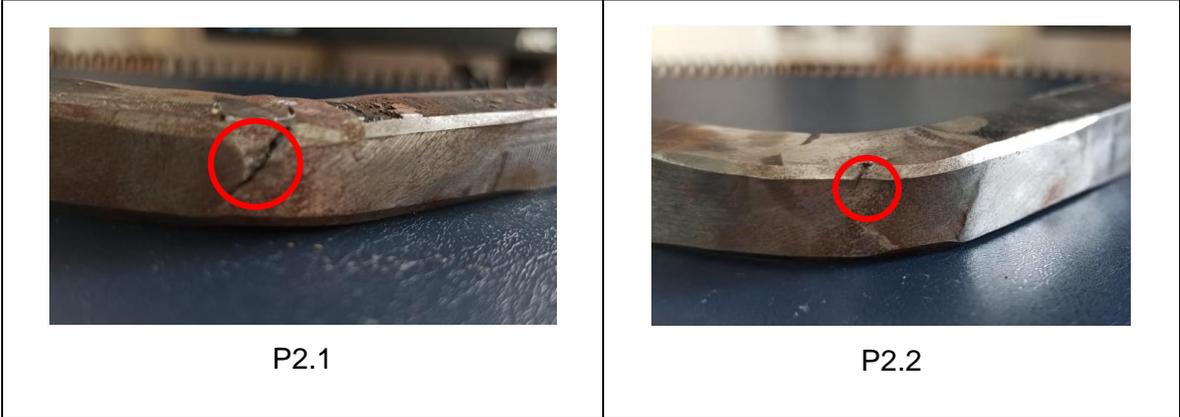
La evidencia fotográfica de las probetas de cada junta soldada se presenta en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Registro fotográfico de las probetas de doblado

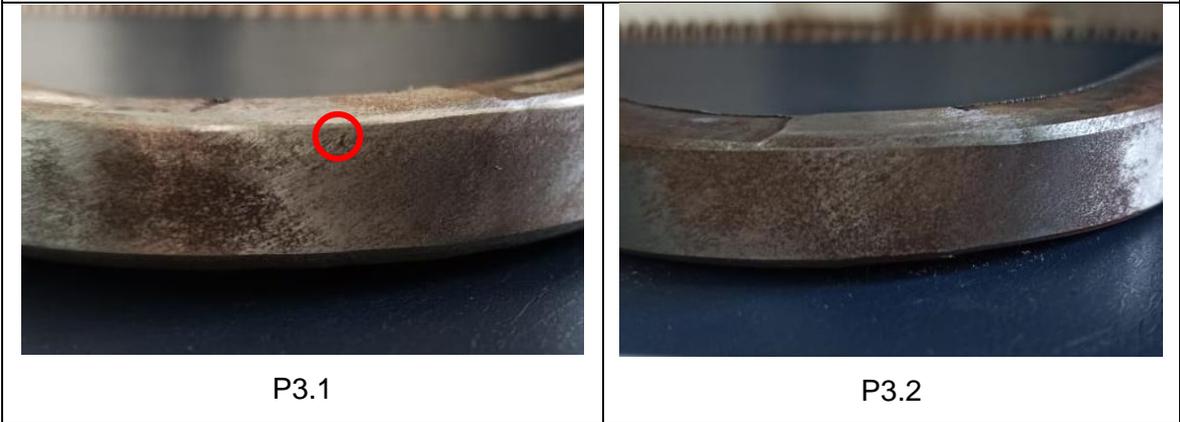




Junta 2

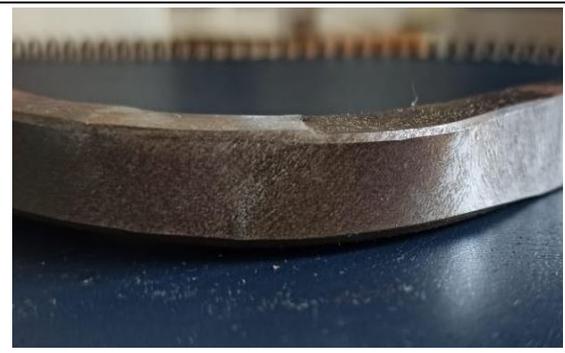


Junta 3





P3.3



P3.4

Junta 4



P4.1



P4.2



P4.3

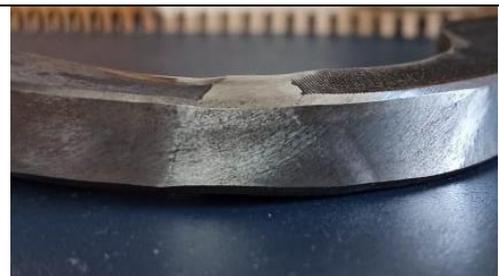


P4.4

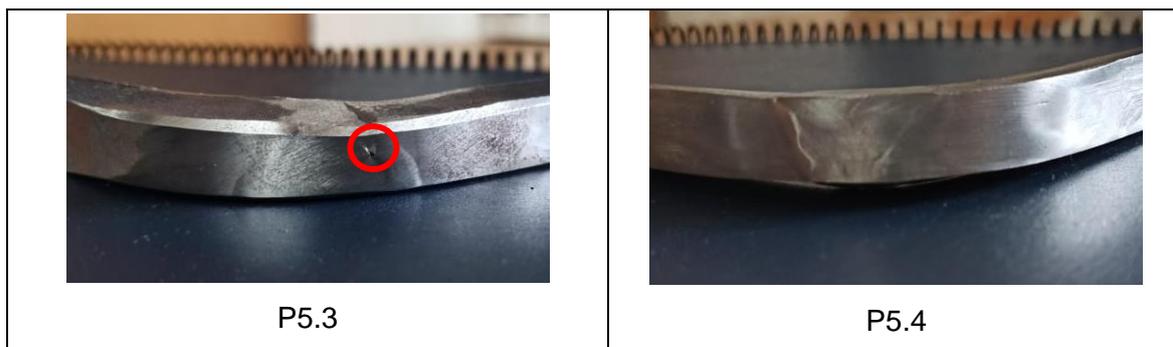
Junta 5



P5.1



P5.2



(Fuente: Propia)

3.1.3 Ensayo de tracción

Los resultados del ensayo de tracción realizado por el LAEV se encuentran en el ANEXO IV, y se evidencian en la tabla 3.3. Cabe destacar que para que las probetas sean aprobadas, deben cumplir con los criterios de aceptación descritos en el punto 2.5.3.

Tabla 3.3 Resultados del ensayo de tracción

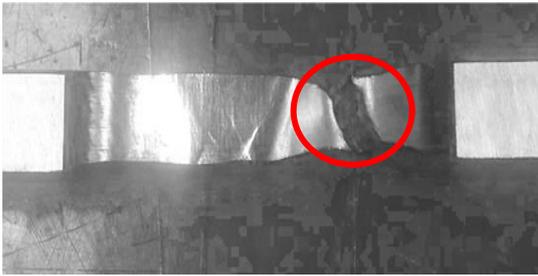
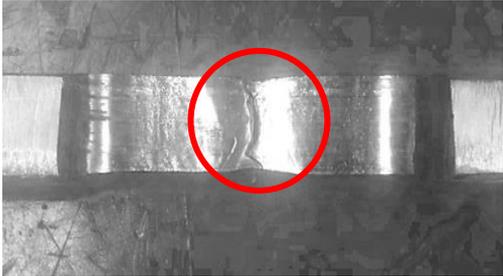
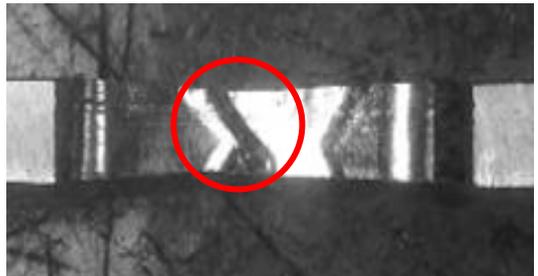
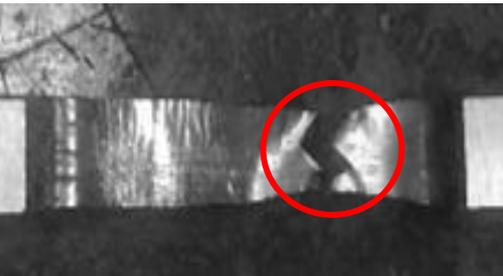
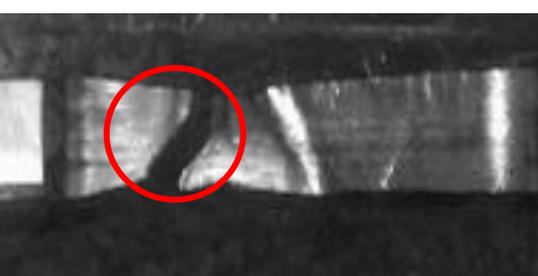
Junta	Identificación de la probeta	Resistencia a la tracción		Observación	Calificación
		ksi	MPa		
1	1.1	113.7	783.8	FMB	A
	1.2	103.9	716.4	FJS	R
2	2.1	116.1	800.6	FMB	A
	2.2	116.9	806.1	FMB	A
3	3.1	108.0	744.7	FJS	A
	3.2	111.3	767.6	FMB	A
4	4.1	118.3	815.4	FMB	A
	4.2	118.7	818.4	FJS	A
5	5.1	116.4	802.4	FMB	R
	5.2	113.2	780.2	FMB	R

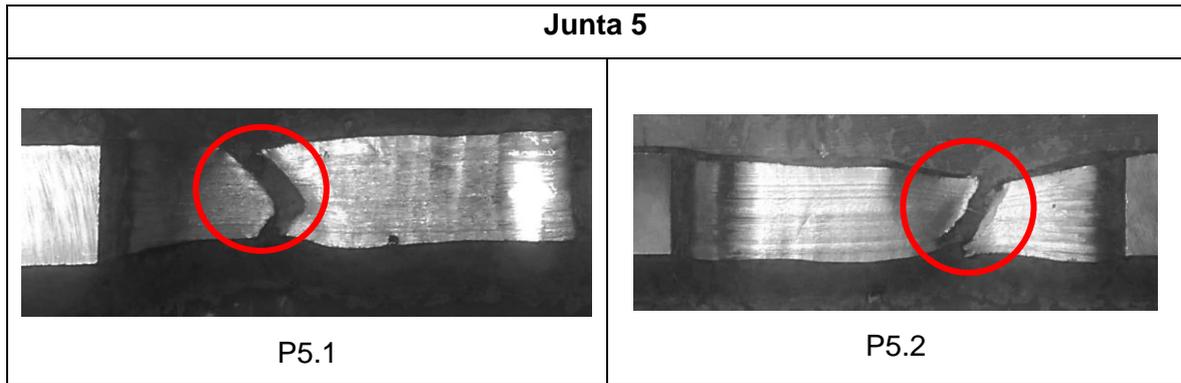
(Fuente: Propia)

FMB: falla en el material base

FJS: falla en la junta soldada

Tabla 3.4 Registro fotográfico de las probetas de tracción

Junta 1	
 <p>P1.1</p>	 <p>P1.2</p>
Junta 2	
 <p>P2.1</p>	 <p>P2.2</p>
Junta 3	
 <p>P3.1</p>	 <p>P3.2</p>
Junta 4	
 <p>P4.1</p>	 <p>P4.2</p>

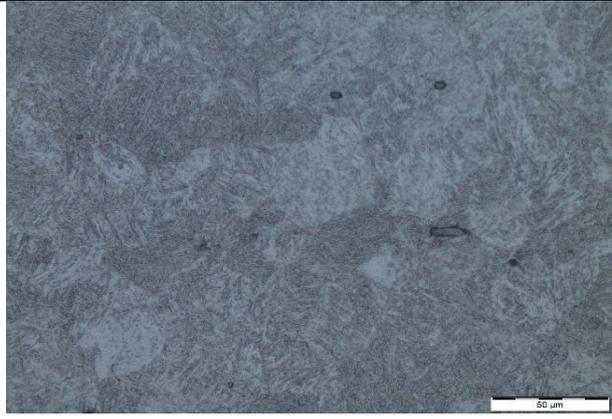
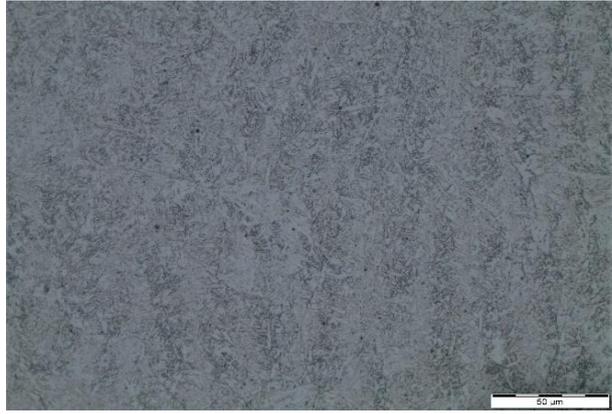


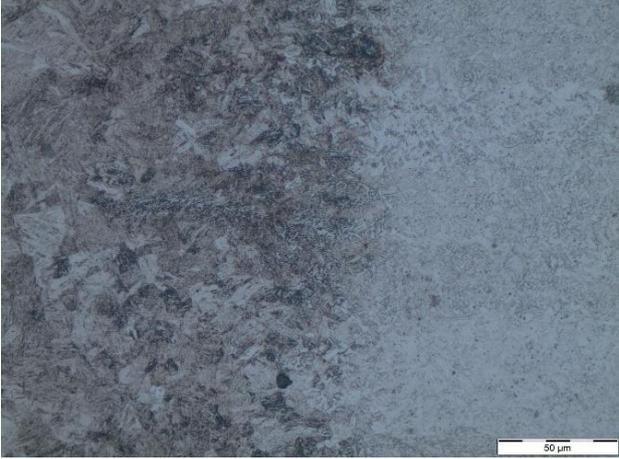
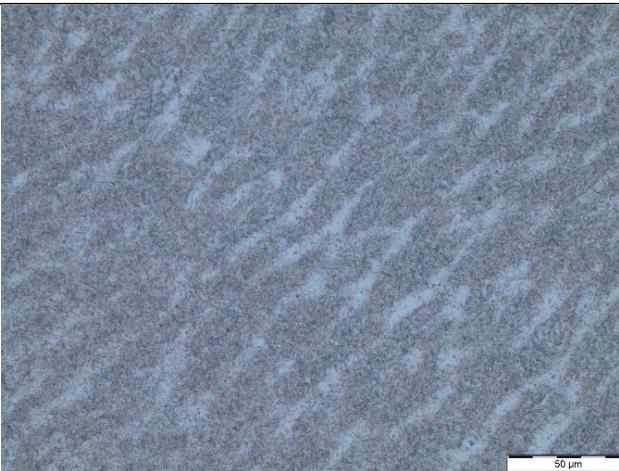
(Fuente: Propia)

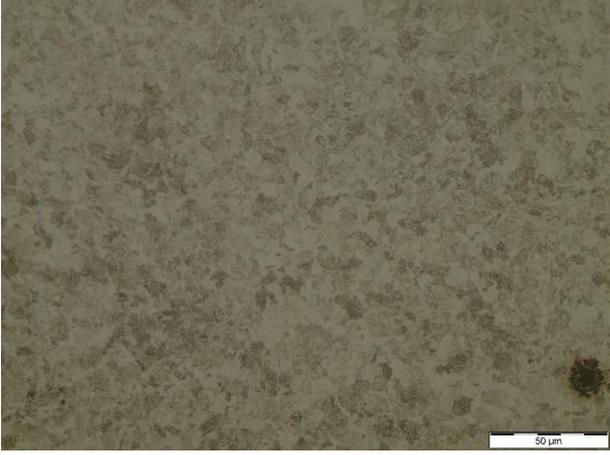
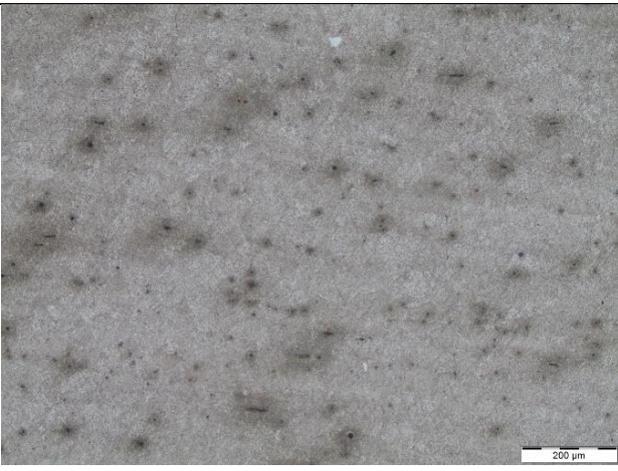
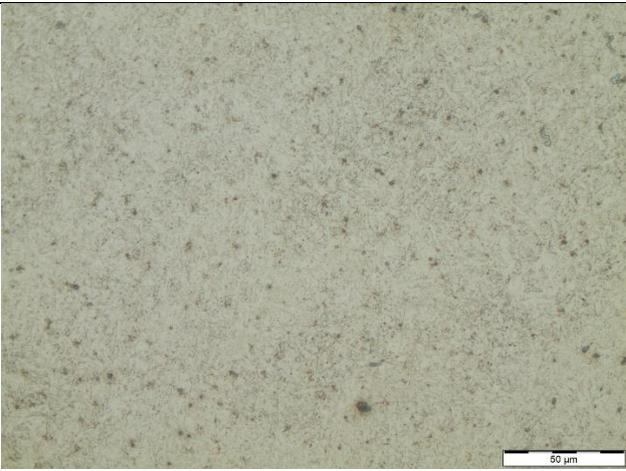
3.1.4 Ensayo metalográfico

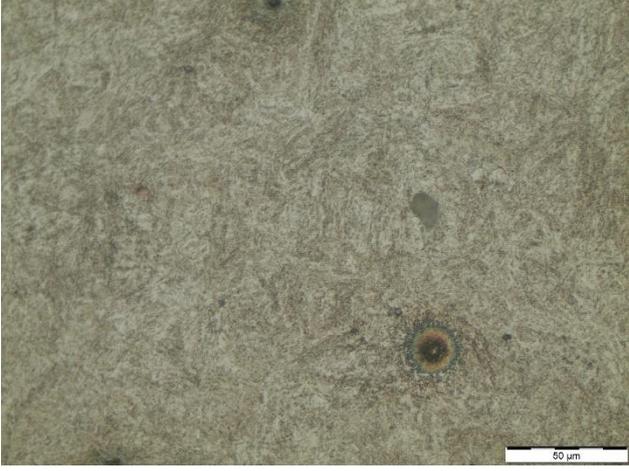
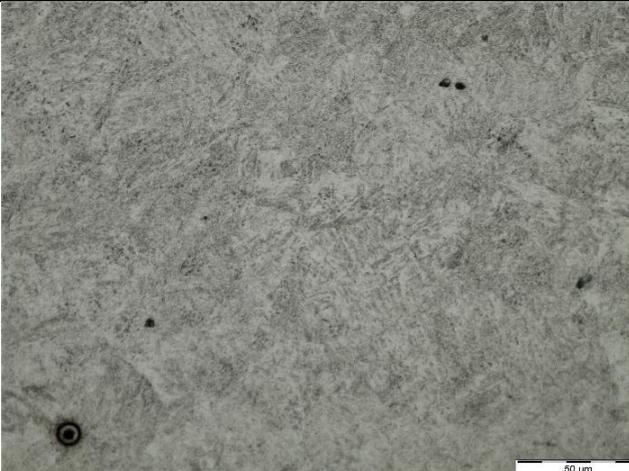
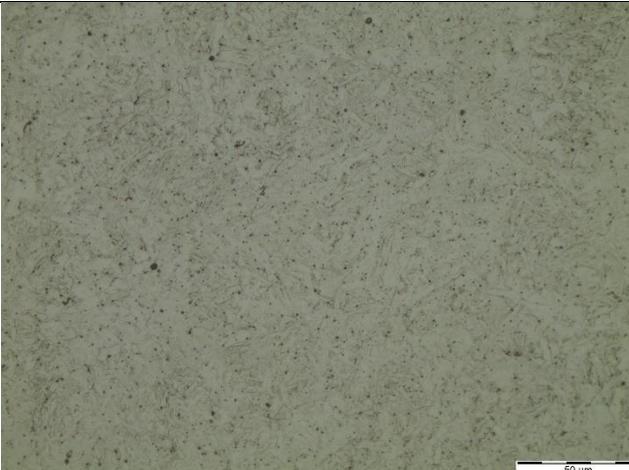
Los resultados observados en el microscopio durante el ensayo metalográfico se han dividido en dos partes: análisis de la micrografía de las probetas que se muestra en la tabla 3.5 y la macrografía de la soldadura que se muestra en la tabla 3.6.

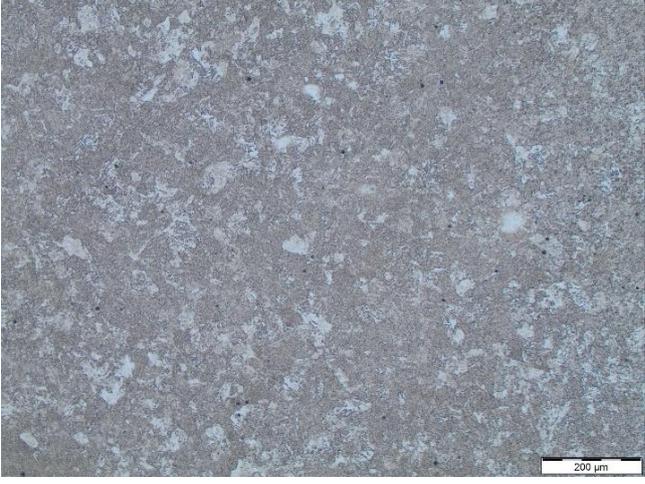
Tabla 3.5 Análisis metalográfico (micrografía)

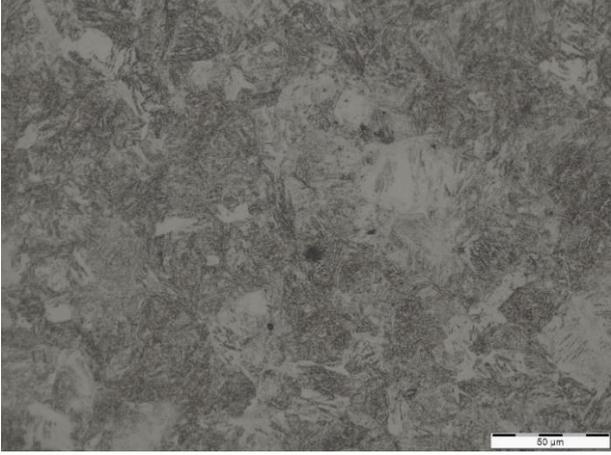
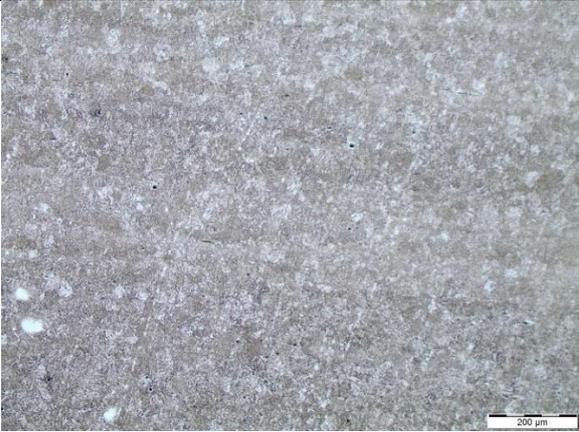
Identificación: P1-m1		
Zona de barrido	Imagen detectada	Observaciones
Material base (500x)		En la micrografía del metal base se observa martensita formado por la disolución del carbono en la ferrita. Además, hay pocas inclusiones de carbono.
Material de aporte (500x)		En el material base se puede observar una estructura bainítica (bainita granular) en conjunto con límites de grano de ferrita.

<p>Zona afectada por el calor (500x)</p>		<p>En esta imagen se observa el contraste entre la ZAC (izquierda) y el material de aporte (derecha). Las zonas más oscuras de la ZAC muestran colonias de perlita mientras que las más claras son martensita.</p>
<p>Identificación: P2-m2</p>		
<p>Zona de barrido</p>	<p>Imagen detectada</p>	<p>Observaciones</p>
<p>Material base (500x)</p>		<p>En la micrografía está presente bainita inferior debido al alivio de esfuerzos y transformación desde la austenita.</p>
<p>Material de aporte (500x)</p>		<p>En la micrografía se puede apreciar ferrita proeutectoide. Las formas que presenta se debe al número de pases en el cordón de soldadura.</p>

<p>Zona afectada por el calor (500x)</p>		<p>En la micrografía se puede apreciar ferrita poligonal, las zonas más oscuras muestran colonias de perlita.</p>
<p>Identificación: P3-m3</p>		
<p>Zona de barrido</p>	<p>Imagen detectada</p>	<p>Observaciones</p>
<p>Material base (100x)</p>		<p>En la micrografía se observa martensita y carburos precipitados (puntos redondos) debido al tratamiento térmico de revenido.</p>
<p>Material de aporte (500x)</p>		<p>En la micrografía se puede observar perlita granular, algunas islas de martensita (partes oscuras alargadas) y precipitados de carbono debido al tratamiento térmico.</p>

<p>Zona afectada por el calor (500x)</p>		<p>La micrografía presenta precipitados de carbono y en general un constituyente de bainita superior.</p>
<p>Identificación: P4-m4</p>		
<p>Zona de barrido</p>	<p>Imagen detectada</p>	<p>Observaciones</p>
<p>Material base (500x)</p>		<p>En la micrografía está presente bainita inferior debido al alivio de esfuerzos. Además presenta inclusiones agrupadas.</p>
<p>Material de aporte (500x)</p>		<p>La micrografía muestra una microestructura casi completa de bainita granular. Además de agregados o inclusiones muy diminutas de carbono.</p>

<p>Zona afectada por el calor (500x)</p>		<p>La micrografía muestra constituyentes de bainita y martensita (zonas más claras). Existen además algunas inclusiones agrupadas de carbono.</p>
<p>Identificación: P5-m5</p>		
<p>Zona de barrido</p>	<p>Imagen detectada</p>	<p>Observaciones</p>
<p>Material base (100x)</p>		<p>La micrografía del material base es ferrita proeutectoide (zonas más claras). Hay pocas formaciones de bainita e inclusiones de carbono distribuidos en toda la muestra.</p>
<p>Material de aporte (100x)</p>		<p>La micrografía muestra una mezcla de bainita y martensita. Existe un sustancial crecimiento de grano.</p>

Zona afectada por el calor (500x)		La ZAC en este caso se oscurece demasiado debido al ataque químico, pero se puede apreciar una mezcla de bainita y martensita (gris más claro).
Identificación: MB		
Zona de barrido	Imagen detectada	Observaciones
Material Base (100x)		La micrografía del material base sin ataque químico muestra ferrita proeutectoide (zonas más claras), el resto es martensita y algunas inclusiones de Cr y Mo.

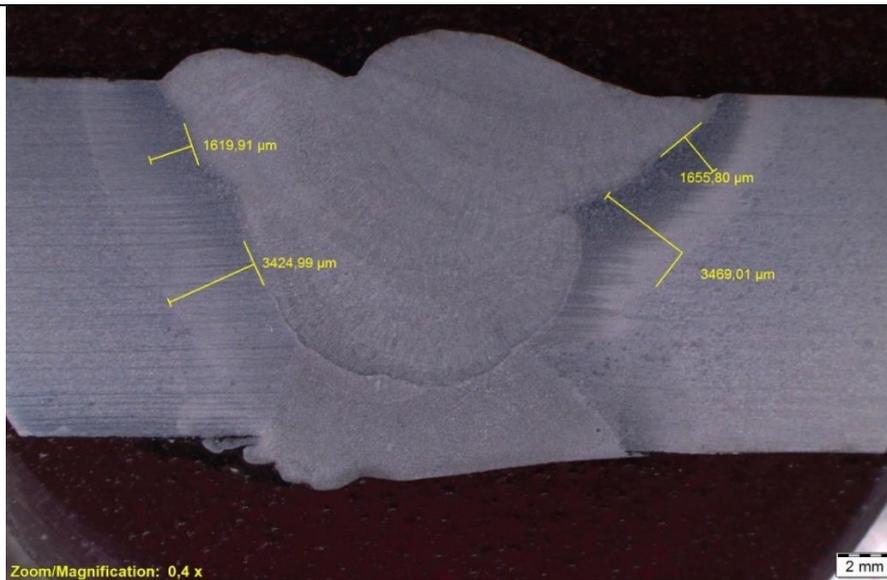
(Fuente: LDMF, 2020)

Para reforzar el estudio de fallas que se detectaron en los ensayos mecánicos se pueden realizar macrográficas de las probetas con el microscopio metalográfico. En los registros de macrografía de la soldadura se muestran 3 zonas importantes de estudio que son: el material base, el material de aporte y la zona afectada por el calor.

Debido al ataque químico que se realiza sobre la superficie de la probeta se evidencia el número de pases de soldadura, la sobremonta y la penetración, además de ciertas indicaciones que pueden ser medidas con un software de edición de imágenes y puestas a consideración en el estudio. A continuación, se muestra en la tabla 3.6 los resultados.

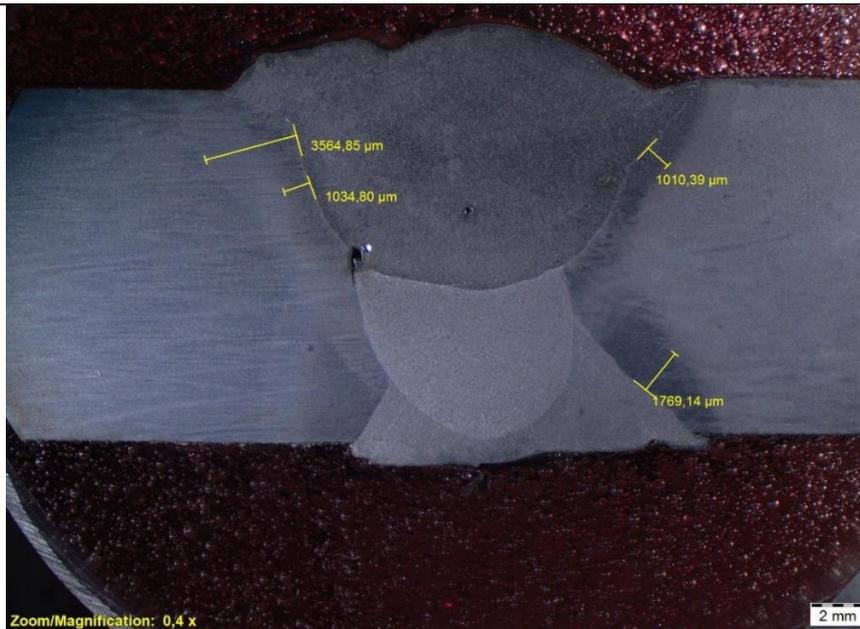
Tabla 3.6 Macrografía de la soldadura

Identificación: P1-4X



Como se puede observar en la macrografía de la probeta 1, no existen discontinuidades presentes en la zona de fusión y hay buena penetración en la junta. La ZAC tiene una medida aproximada de 3,4 mm con granos finos, mientras que el metal soldado tiene granos columnares gruesos.

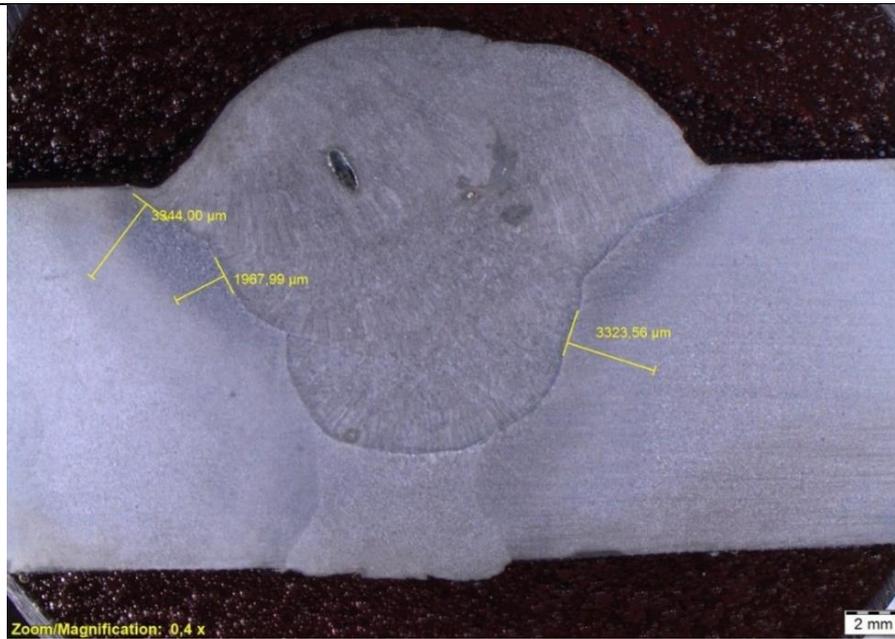
Identificación: P2-4X



En la macrografía se puede observar una inclusión de escoria en la parte izquierda, estas inclusiones aparecen en los filos del cordón del soldadura o en su interfaz. La ZAC tiene una medida aproximada de 3,5 mm en el lado izquierdo, y una zona de fusión cerca del primer

pase con una medida de 1,7 mm en el lado derecho. Presenta grano fino en la ZAC y grano grueso columnar en el metal soldado.

Identificación: P3-4X



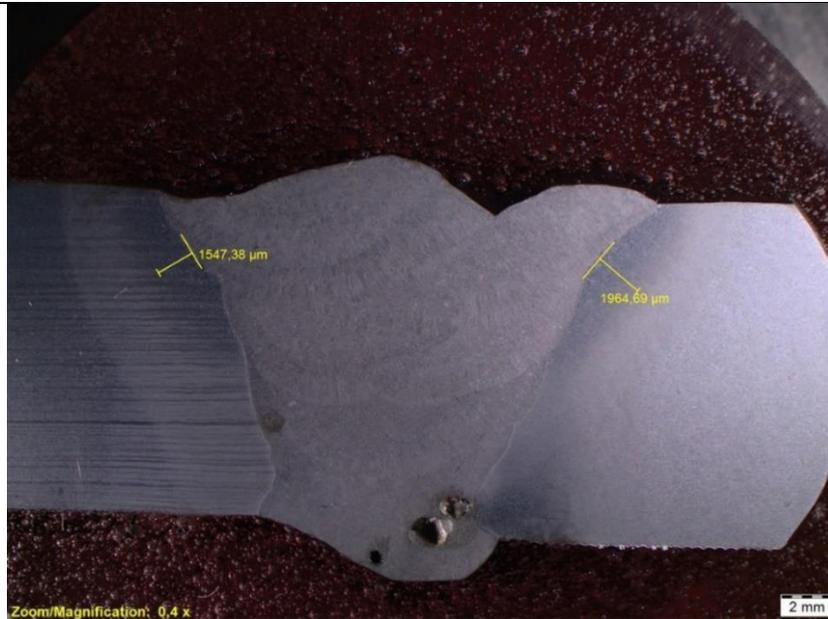
En esta macrografía se observa que existe porosidad en los últimos pases, la penetración inferior pudo haber sido pulida al momento de extraer la probeta. La ZAC tiene una medida aproximada de 3,3 mm con un tipo de grano intercrítico y en el metal soldado existe un tipo de grano fino recristalizado.

Identificación: P4-4X



En esta macrografía se observa la falta de fusión entre el material base y el cordón del primer pase, además de la incompatibilidad del primer pase y los pases de relleno. Existe una gran formación de dendritas en los últimos pases. La ZAC tiene grano fino y el grano fino recristalizado en el metal soldado.

Identificación: P5-4X



En la macrografía se puede observar una indicación considerable en el primer pase. Se puede considerar como porosidad por ser un vacío oscuro que posee un diámetro de 1,2 mm. La ZAC es de aproximadamente 2,0 mm y contiene grano fino en los últimos pases. El metal soldado tiene grano fino recristalizado.

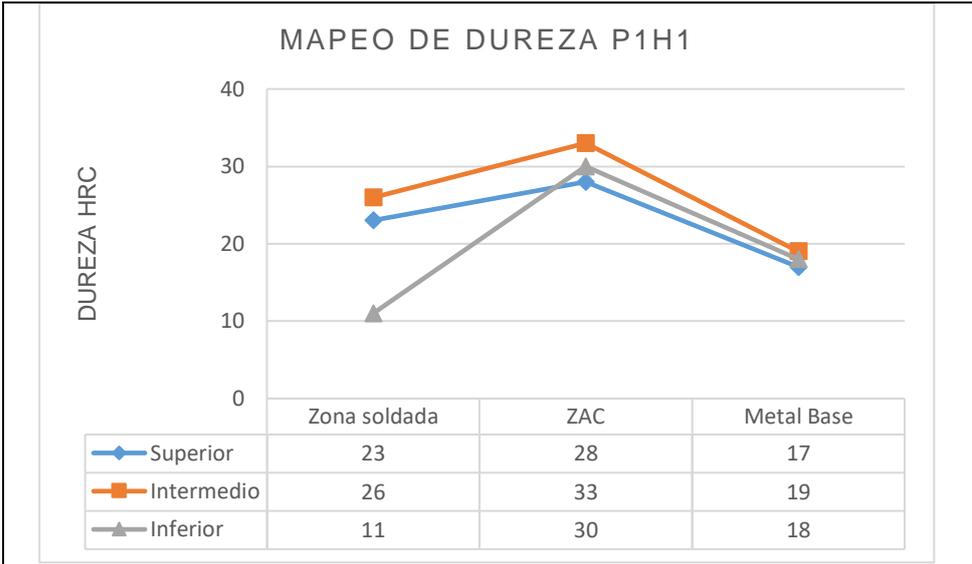
(Fuente: LDMF, 2020)

3.1.5 Ensayo de dureza

Las mediciones de dureza se toman sobre la superficie limpia y totalmente plana. En cada probeta se registran 3 medidas a lo largo de una línea horizontal superior, media e inferior dentro de las tres zonas de la soldadura que son: el material base, el material de aporte y la zona afectada por el calor. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.7.

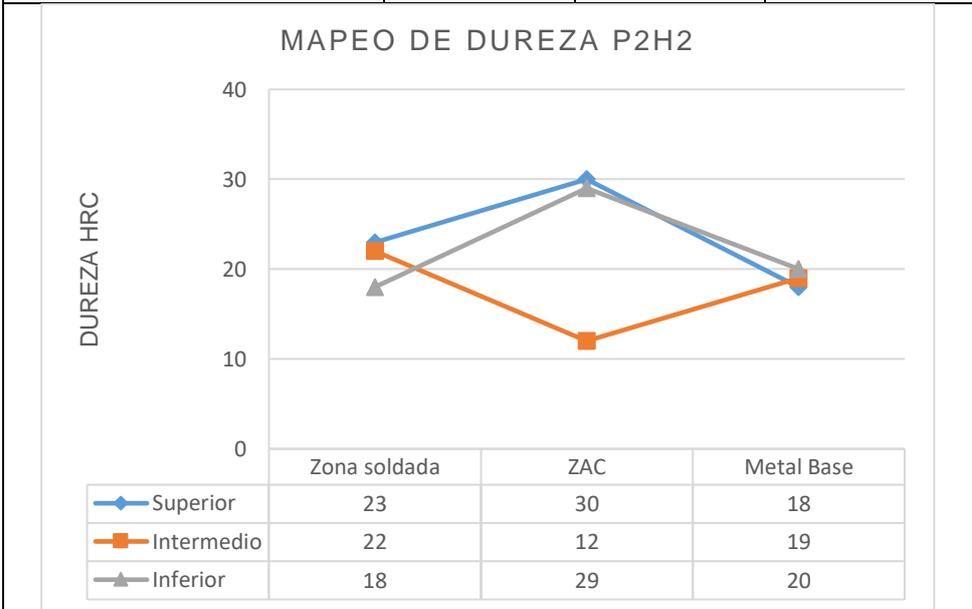
Tabla 3.7 Valores de dureza de las probetas

Identificación: J1H1	Escala de dureza: Rockwell C		
Zona	Barrido superior	Barrido intermedio	Barrido inferior
Material base	17	19	18
Material de aporte	23	26	11
Zona afectada por el calor	28	33	30



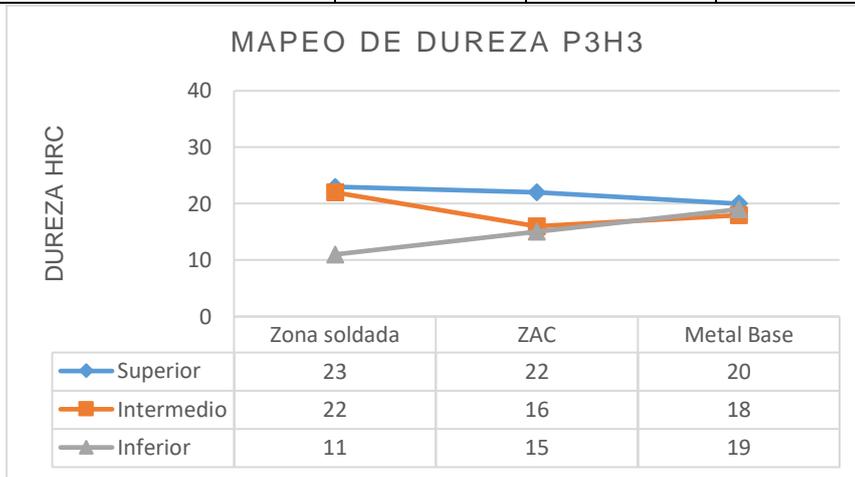
El barrido de dureza en la parte inferior muestra un valor bajo en la zona del metal soldado mientras que en la ZAC aumenta.

Identificación: J2H2	Escala de dureza: Rockwell C		
Zona	Barrido superior	Barrido intermedio	Barrido inferior
Material base	18	19	20
Material de aporte	23	22	18
Zona afectada por el calor	30	12	29



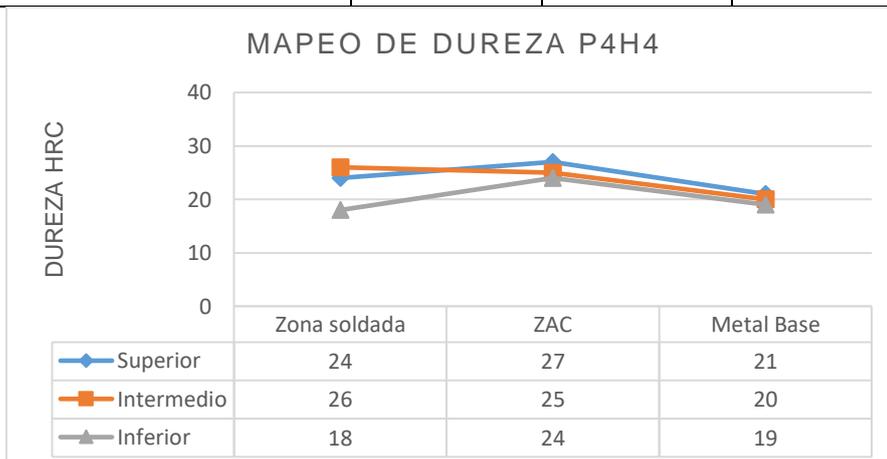
El barrido de dureza en la parte inferior y superior muestra un alto valor de dureza en la ZAC, la parte intermedia tiene valores bajos. En la zona soldada el valor de dureza se mantiene en un rango estable.

Identificación: J3H3	Escala de dureza: Rockwell C		
Zona	Barrido superior	Barrido intermedio	Barrido inferior
Material base	20	18	19
Material de aporte	23	22	11
Zona afectada por el calor	22	16	15



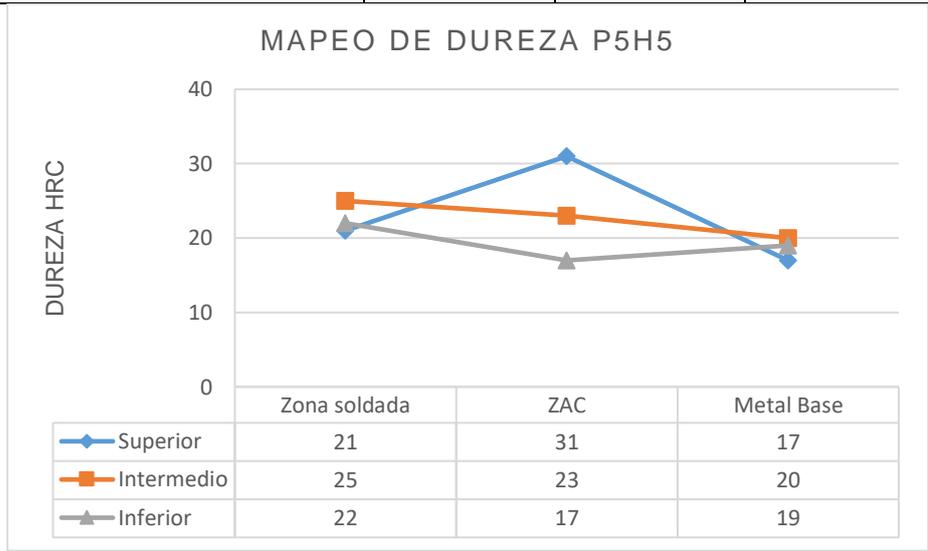
En el barrido de durezas a través de todas las zonas del cordón de soldadura presenta valores lineales dentro de un rango corto de la dureza original del material, excepto por el valor de 11 HRC que demuestra la descarburización que tuvo luego del tratamiento térmico.

Identificación: J4H4	Escala de dureza: Rockwell C		
Zona	Barrido superior	Barrido intermedio	Barrido inferior
Material base	21	20	19
Material de aporte	24	26	18
Zona afectada por el calor	27	25	24



En el barrido de durezas de la junta 4 a diferencia del resto de probetas es que los valores aumentan en todas las zonas. En el primer pase se conserva el valor nominal del material, excepto en la ZAC.

Identificación: J5H5	Escala de dureza: Rockwell C		
Zona	Barrido superior	Barrido intermedio	Barrido inferior
Material base	17	20	19
Material de aporte	21	25	22
Zona afectada por el calor	31	23	17



El barrido de dureza en la probeta 5 muestra que hubo un aumento de la misma en la ZAC, mientras que en las demás zonas se mantiene entre el rango del valor nominal.

(Fuente: Propia)

Adicional se realiza la medición de dureza del material base en su estado previo a la soldadura. Se toman 3 valores y se realiza un promedio tal como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Dureza del metal base

Identificación: MB	Medidas			Escala de dureza: Rockwell C
AISI 4140	1	2	3	Promedio
	19	19	19	19

(Fuente: Propia)

3.2 Discusión de resultados

Para discutir los resultados también se tomará en cuenta la especificación API-19AC aparte del código ASME IX. En API-19AC se muestra que existen dos tipos de soldadura a calificarse:

1. Soldadura de tipo 1: las soldaduras y soldadores deben satisfacer los requerimientos de ASME BPVC sección IX o una norma internacional equivalente. Siendo Q1, Q2 y Q3 los grados de calidad en la soldadura.
 - a. Q1 y Q2 serán inspeccionados visualmente por los requerimientos de una norma estándar tal como es ASME BPVC. Q1 será inspeccionada volumétricamente ya sea por radiografía o ultrasonido.
 - b. Q3 será únicamente puesta a inspección visual.
2. Soldadura de tipo 2: las soldaduras y soldadores deben satisfacer los requerimientos de ASME BPVC sección IX o una norma internacional equivalente. Contiene 3 grados de calidad.
 - a. Q1, Q2 y Q3 serán inspeccionadas visualmente de acuerdo a las especificaciones documentadas.

3.2.1 Ensayos para calificación de procedimiento

Los ensayos de doblado y tracción al estar estandarizados para la evaluación mecánica de una junta soldada forman parte del estudio de soldabilidad de un material y a su vez de la calificación del procedimiento de soldadura.

En el presente estudio se preparó un WPS para cada junta, en cada caso se hizo la variación del tipo de material base, tipo de material de aporte, método de enfriamiento y tratamiento térmico. Por lo tanto, la discusión de los resultados se realizará en torno a los parámetros establecidos y las propiedades mecánicas resultantes.

Los resultados se presentarán en los PQR que se encuentran en el ANEXO V y al final se evaluará la mejor respuesta del material a los parámetros establecidos para cumplir con el objetivo del estudio y la calificación del procedimiento bajo el código ASME IX.

El esfuerzo de fluencia representa el límite superior de esfuerzos en un material, en el cual la deformación plástica ocurre. Cuando el material es sometido a una carga superior del que puede soportar se produce un estado de fatiga en donde se inicia una fisura, luego la fisura se propaga sobre la superficie y finalmente ocurre la fractura.

En la soldadura se produce un fenómeno térmico en donde una porción del material se calienta a una alta temperatura para consecuentemente, después del enfriamiento a la temperatura ambiente provoque la aparición de esfuerzos residuales en el metal soldado y el metal base adyacente.

Las juntas 2 y 4 no aprobaron el ensayo de doblado debido a que superaron el límite de aceptabilidad que dicta la norma y claramente se verifica la aparición de fisuras cuando la carga sobre la probeta empieza a aumentar tal como se muestra en la figura 3.3.

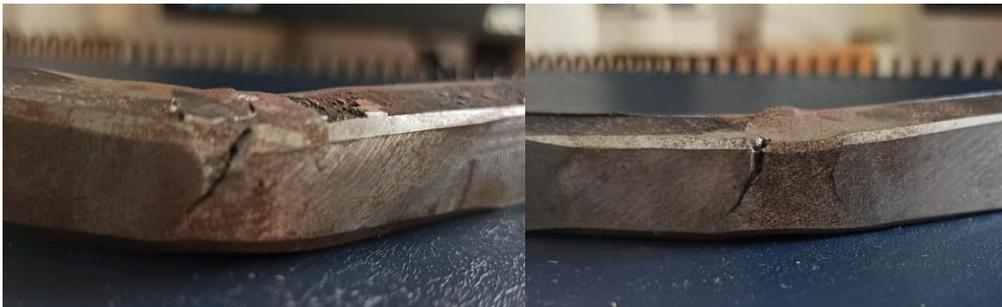


Figura 3.3 Falla por fatiga en la junta 2 (izquierda) y junta 4 (derecha).

(Fuente: Propia)

La falla en la junta 2 a pesar de que se realizó un alivio de esfuerzos presenta fisuras debido a la concentración de esfuerzos residuales, pero cabe mencionar que hubo un arreglo de perforación en el primer pase tal como se muestra en la figura 3.4, además de la aparición de un quemón en el cuarto pase. La relación de lo sucedido con el registro radiográfico indica que la probeta no iba a cumplir con los requerimientos mecánicos.

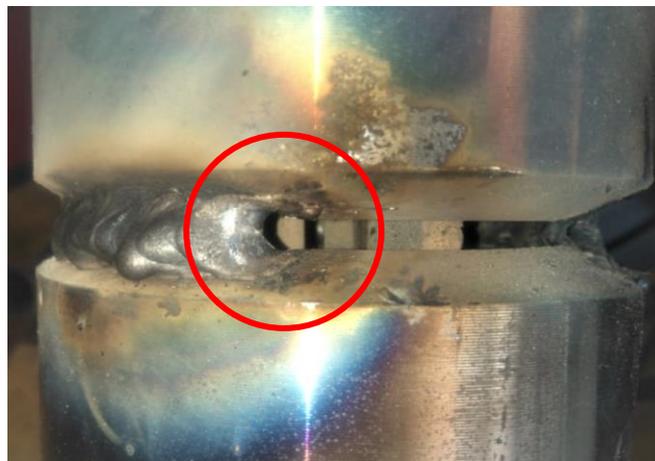


Figura 3.4 Perforación en el metal base en la junta 4.

(Fuente: Propia)

La falla en la junta 4 se debe al uso del material de aporte E6010 en el primer pase ya que la cantidad de carbono es alta y esto disminuye la ductilidad en el material. Otra evidencia de que no se debe usar este material de aporte en aceros de baja aleación tratados

térmicamente es que promueve la aparición de fallas de penetración tal como indica el registro radiográfico y también defectos como se puede observar en la figura 3.5.



Figura 3.5 Fisura en el primer pase de la junta 4.

(Fuente: Propia)

La cantidad del carbono en el material de aporte usado en el primer pase de cada junta también influye en la resistencia a la tracción del material. El uso de un material de aporte con una gran cantidad de carbono produce una resistencia a la tracción alta tal como se muestra en la figura 3.6.

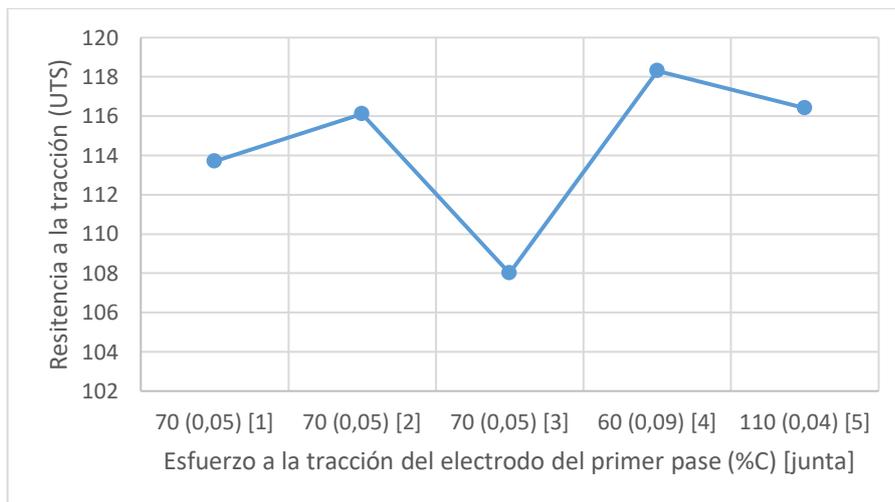


Figura 3.6 Influencia del carbono en la resistencia a la tracción de las juntas soldadas.

(Fuente: Propia)

En esta misma figura se puede apreciar que la influencia de un tratamiento térmico posterior a la soldadura disminuye la resistencia a la tracción de una junta soldada (junta 3) pero, cumple con los parámetros de aceptación del ensayo de tracción.

La mayoría de probetas de tracción cumple con los requerimientos del código ASME IX tal como se indica en la tabla 3.3 y en la figura 3.7, excepto por la junta 5.



Figura 3.7 Resistencia a la tracción de las juntas soldadas.

(Fuente: Propia)

En el caso de la junta 5 se utilizó un electrodo de baja resistencia a la tracción (113.13 ksi) en relación a la resistencia de sus dos materiales base (155.8 ksi y 169.9 ksi). Las probetas aprobaron en el ensayo de doblado, pero fueron rechazadas en el ensayo de tracción por no cumplir con los requerimientos del código ASME IX.

De acuerdo a los ensayos de doblado y tracción se establece una aprobación y rechazo general de las juntas soldadas. Para que el procedimiento de soldadura se acepte la probeta que fue sujeta a los parámetros establecidos debe aprobar ambos ensayos mecánicos, sino el procedimiento es rechazado. Los resultados se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Respuesta mecánica de las juntas soldadas

Identificación de la junta	Ensayo de doblado	Ensayo de tracción	Resultado
1	Aprobado	Rechazado	Rechazado
2	Rechazado	Aprobado	Rechazado
3	Aprobado	Aprobado	Aprobado
4	Rechazado	Aprobado	Rechazado
5	Aprobado	Rechazado	Rechazado

(Fuente: Propia)

Con los datos analizados se puede destacar que los mejores resultados se obtuvieron en la junta 3 que fue tratada térmicamente y la junta 5 en la que se utilizó el material de aporte E11018-M en todos sus pases y se enfrió lentamente en arena refractaria. Por lo tanto, todos los materiales usados en este estudio presentan buena soldabilidad si se usa el procedimiento adecuado tomando en cuenta el material de aporte, la temperatura de precalentamiento, un tratamiento térmico posterior a la soldadura si fuera posible y un adecuado método de enfriamiento.

3.2.2 Ensayos complementarios

De acuerdo a lo anterior se analizarán los resultados de los ensayos de inspección volumétrica con la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Calificación del ensayo radiográfico

ID. 2020-R01-RX-01-P-1				
Tramo AB	Tramo BC	Tramo CD	Tramo DE	Tramo EA
A	A	A	N/A	A
Observaciones: en el tramo AB existe una inclusión de escoria que está dentro del rango de aceptación y en el tramo EA aparecen unos poros, pero se aceptan según la figura QW-191.1.2.2(b)(4).				
ID. 2020-R01-RX-01-P-2				
Tramo AB	Tramo BC	Tramo CD	Tramo DE	Tramo EA
A	R	R	A	R
Observaciones: en el tramo BC existe un nido no pueden ser aceptados. Y el tramo CD presenta una falta de penetración mayor al límite permitido.				
ID. 2020-R01-RX-01-P-3				
Tramo AB	Tramo BC	Tramo CD	Tramo DE	Tramo EA
A	A	A	A	A
Observaciones: en el tramo CD existe escoria, pero con un valor que no supera el límite de aceptación. Se revisa la figura QW-191.1.2.2(b)(4).				
ID. 2020-R01-RX-01-P-4				
Tramo AB	Tramo BC	Tramo CD	Tramo DE	Tramo EA
A	R	A	A	R
Observaciones: en la mayoría de tramos existe el defecto de falta de penetración y escoria pero que si se encuentra dentro del rango de aceptación.				
ID. 2020-R01-RX-01-P-5				
Tramo AB	Tramo BC	Tramo CD	Tramo DE	Tramo EA
A	A	A	A	A
Observaciones: entre los defectos más notables en esta junta están los poros y escoria, pero dentro del límite de aceptación.				

(Fuente: Propia)

A: aprobado

R: rechazado

N/A: no aplica

Según el informe entregado por el Laboratorio de E.N.D. los cordones de soldadura de todas las tuberías presentan indicaciones que se convierten en defectos ya que tales indicaciones sobrepasan los límites de admisibilidad que dicta el código ASME IX.

La junta 1 presenta la menor cantidad de indicaciones internas rechazadas y ciertas inclusiones de escoria. Cabe destacar que las mordeduras también fueron comprobadas por inspección visual. Las juntas 2 y 4 son las que presentan el porcentaje de rechazo más alto. En la junta 4 debido al uso de un electrodo de bajo valor de límite de fluencia a la tracción y una cantidad alta de carbono se produce la falta de fusión. En la probeta 3 en la cual se realizó un precalentamiento y un tratamiento posterior a la soldadura, presenta escoria alargada debido a la falta de limpieza entre pases. Pero no se encuentran indicaciones como fisuras o fusión incompleta debido a la junta fría.

La junta 5 presenta indicaciones que son debidas a los parámetros eléctricos a pesar de que se usó las recomendaciones del fabricante del electrodo y se realizó una soldadura de prueba para definir previamente todos los parámetros.

En cuanto a los ensayos metalográficos se presenta en la tabla 3.11 los tipos de microestructuras observados en el microscopio.

Tabla 3.11 Microestructuras observadas en el microscopio metalográfico

ID	Microestructura de la soldadura		
	Material Base	Material Aporte	Zona afectada por el calor
P1-m1	Martensita	Bainita	Perlita + martensita
P2-m2	Bainita	Ferrita proeutectoide	Ferrita + perlita
P3-m3	Martensita	Martensita	Bainita
P4-m4	Bainita	Bainita	Bainita + martensita
P5-m5	Ferrita proeutectoide	Bainita + martensita	Bainita + martensita

(Fuente: Propia)

El análisis de los ensayos metalográficos al estar relacionados con los diagramas de enfriamiento continuo e isotérmicos nos dan una idea de los resultados que se obtendrán en el microscopio.

El primer caso de estudio fue entre la junta 1 y 2 que son del mismo material, pero con la diferencia en que la junta 2 tiene un tratamiento térmico de alivio de esfuerzos.

La metalografía del metal base en la junta 1 muestra martensita, mientras que en la junta 2 existen constituyentes de bainita. Lo que comprueba que la temperatura de transformación de la martensita M_s en los aceros AISI 4140 es de aproximadamente 340°C ya que la formación de bainita empieza por debajo de la temperatura A_{c1} (723°C) pero superior a la M_s . En el metal soldado de la junta 2 se tiene una microestructura ferrítica proeutectoide ya que la transformación isotérmica está por debajo de A_{c1} y la ferrita se precipitó antes de la formación de perlita mientras que en la junta 1 se formó un constituyente de bainita.

Tanto en la microestructura de la ZAC de la junta 1 y 2 se observa perlita, además de residuos de ferrita en la última.

Existe una relación entre las microestructuras y las propiedades mecánicas del material. Lo deseado para una estructura soldada es que posea la menor cantidad de martensita y en el caso de los aceros de bajo contenido de carbono tratados térmicamente se prefiere un constituyente de bainita. En la junta 1, al tener una cantidad considerada de martensita indica que el método usado para soldar el acero AISI 4140 80 ksi es adecuado, pero no el más óptimo porque la estructura deseada en el proceso de soldadura es la bainita, esta cantidad de martensita en la junta 1 se refleja en el rendimiento de las probetas de tracción que no pasaron el ensayo y muestran un incremento en la resistencia a la tracción. Otro indicador es que la dureza en la ZAC de la junta 1 es muy alto en comparación con el material base.

En cuanto a la junta 2, el alivio de esfuerzos terminó cambiando la microestructura a ferrita en el metal soldado y la ZAC lo que provocó la falla de las probetas en el ensayo de doblado. En general la fase ferrítica tiende a repeler a los átomos de carbono lo que genera austenita en alto carbono que puede transformarse en martensita y bainita resultando una ZAC frágil.

La junta 3 presenta las dos microestructuras ideales en la soldadura de los aceros AISI 4140. Las probetas de la junta 3 aprobaron todos los ensayos mecánicos por lo que el tratamiento térmico posterior a la soldadura realizado en esta junta es recomendable.

En la junta 4 se encuentra un exceso de bainita lo que provoca valores altos de resistencia y dureza en el acero a cambio de una baja ductilidad. Como se vio anteriormente el electrodo usado en la soldadura de esta probeta contiene demasiado carbono y esto se observa en las micrografías de todas las zonas del cordón de soldadura las cuales presentan varios precipitados del mismo elemento.

La junta 5 también comparte las microestructuras deseadas en la soldadura de este acero, la formación de martensita y bainita en este caso no necesitó un tratamiento posterior a la soldadura sin embargo los aceros usados para la unión de esta junta tienen altos valores de resistencia a la tracción, además de que el acero AISI 4145 contiene más carbono.

En cuanto a los ensayos de dureza se comprueba que existe una relación entre el valor de la misma en la zona afectada por el calor de la soldadura y el contenido de carbono del metal base. Con el incremento del contenido de carbono disminuye la tenacidad en la ZAC mientras que la dureza y la susceptibilidad al agrietamiento aumenta, tal como los resultados de las probetas 2 y 4 que fallaron en el ensayo de doblado lateral.

4 CONCLUSIONES

- En conclusión, al realizar el procedimiento de soldadura con los parámetros adecuados y especiales como el posterior tratamiento térmico de la junta, se puede obtener una unión de los aceros del grupo AISI 4140 que cumpla con los criterios de aceptación del código ASME IX.
- Debido al contenido de carbono, elementos aleantes y tratamiento térmico del acero durante su proceso de fabricación es recomendable realizar un precalentamiento del mismo a una temperatura donde empiece la formación de martensita, porque luego del enfriamiento de la soldadura se desea una transformación de la martensita a una estructura bainítica en la zona soldada y afectada por el calor. Esta temperatura (M_S) es muy alta en este grupo de aceros así que se puede aplicar un precalentamiento a una temperatura que no exceda la M_{90} (temperatura de transformación de la austenita a martensita al 90% de un acero hipoeutectoide).
- La aplicación del precalentamiento evitó la formación de fisuras en las juntas soldadas 1,3 y 5 pero no en las juntas 2 y 4. Las razones por las que la junta 2 presentó fisuras fueron las complicaciones que se presentaron al soldar la misma. Las probetas de la junta 2 fallaron en el ensayo de doblado, pero aprobaron en el ensayo de tracción, otra posible causa pudo haber sido la temperatura del alivio de tensiones o el maquinado que usó para extraer los especímenes de ensayos. En el caso de la junta 4 se utilizó un material de aporte incompatible con el material base.
- El material de aporte recomendado para el procedimiento que se realizó en este proyecto es el electrodo E11018-M en conjunto del electrodo E7010 cuando sea necesario un pase raíz, pero si se pudiera realizar el primer pase con el procedimiento GTAW se recomienda utilizar el electrodo ER80S-B2. Y aparte de los mencionados también se podría usar electrodos para aceros inoxidable austeníticos en un futuro estudio.
- La aplicación de un tratamiento térmico o un alivio de esfuerzos es un factor importante a considerar en la unión de estos aceros. Esto se evidencia con el mejor resultado obtenido que fue la junta 3, la misma que tuvo un tratamiento térmico posterior y cumple con todos los parámetros que el código dicta.
- En cuanto a la soldabilidad del grupo de los aceros AISI 4140 y 4145, la mejor compatibilidad fue la de los aceros AISI 4140 (80 ksi) con AISI 4140 (110 ksi) con un tratamiento térmico posterior a la soldadura obteniendo los mejores resultados, además de tener en cuenta el caso de la junta 5 en donde se podría lograr la

aprobación del ensayo de tracción con el uso de un electrodo de mayor resistencia a la misma.

- Los resultados metalográficos de la junta 2 indican que la excesiva formación de ferrita ocurrió a razón de la disminución de la velocidad de enfriamiento ya que en el acero AISI 4140 esta disminución promueve la formación de ferrita y perlita lo que no es recomendable para la soldadura.
- El análisis de fallas de la soldadura con los ensayos propuestos en esta investigación es una parte fundamental para comprender la soldabilidad de un material, desde la interpretación de la naturaleza de la indicación hasta la aprobación o rechazo de la misma; se logra mejorar la habilidad para seleccionar las variables que se adapten a los diferentes materiales y diseños con el fin de asegurar la integridad de la herramienta o estructura.

Referencias Bibliográficas

- [1] ASME American Society of Mechanical Engineers. (2019). *ASME BPVC Section IX-Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*. Estados Unidos

- [2] API American Petroleum Institute (2013). *API SPEC 19AC Specification for Completion Accessories*. Estados Unidos

- [3] ASME American Society of Mechanical Engineers. (2010). *ASME BPVC Section II-Part A Ferrous Material Specifications*. Estados Unidos

- [4] ASTM INTERNATIONAL. (2006). *ASTM A519-06 Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing*. Estados Unidos

- [5] ASTM INTERNATIONAL. (2019). *ASTM A370-19 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Estados Unidos

- [6] Shackelford, J. (2007). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Universidad Politécnica de Madrid. España: Pearson Prentice Hall

- [7] Lancaster, J. F. (1980). *Metallurgy of Welding*. (3ª ed.) Londres: Alden Press Ltd.

- [8] "Tratamientos térmicos", notas de clase para la materia de Tratamientos Térmicos, Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, 2018

- [9] Laboratorio de Ensayos no Destructivos (2018). *Guía de Prácticas*. Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional

- [10] Sánchez, M., & Campos I. (2010). *Tecnología de Materiales*. Mexico D.F.: Editorial Trillas

- [11] Welding Handbook AWS American Welding Society. (2001). *Welding Science and Technology*. Estados Unidos

- [12] Lippold, J. (2015). *Welding metallurgy and weldability*. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons, Inc.

- [13] ASM American Society for Metals. (1977). *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*. Ohio, Estados Unidos
- [14] Welding Handbook AWS American Welding Society. (1984). *Metals and their Weldability*. Londres: Palgrave Macmillan
- [15] Acuña, M. & Lozada, M. (2013). *Estudio de la soldabilidad del acero inoxidable martensítico AISI 420* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito
- [16] Blondeau, R. (2008). *Metallurgy and Mechanics of Welding*. Gran Bretaña: ISTE Ltd. Y Jhon Wiley & Sons, Inc.
- [17] Handbook ASM American Society for Metals. (1993). *Welding, Brazing and Soldering*. Estados Unidos
- [18] Hinton, R.W. & Wiswesser, R.K. (2008). Estimating Welding Preheat Requeriments for Unknown Grades of Carbon and Low-Alloy Steel. *The AWS Welding Journal*, 273-278
- [19] The Lincoln Electric Company. (2019). *Llincoln 6010*. Recuperado de <http://www.lincolnelectric.com>
- [20] INDURA GrupoAIR Products. (2018). *Electrodo 11018M AWS E11018M*. Recuperado de <http://www.indura.com.ec>
- [21] OERLIKON GROUP. (2016). *Metco 7010 Oerlikon*. Recuperado de <http://www.oerlikon.com.ec>
- [22] Colas R & Totten G (2016). *Encyclopedia of Iron, Steel and their Alloys*. Estados Unidos: CRC Press
- [23] Totten G., Funatani K., Xie L. (2005). *Handbook of Metallurgical Process Design*. New York, Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc.
- [24] Tempil (2010). *Basic Guide to Ferrous Metallurgy*. Recuperado de <http://www.tempil.com>
- [25] Hernandez, M. (2008). *Simulación del Proceso de Soldadura SMAW en Piezas de Acero al Carbono Media Aleación (AISI 4140)* (Tesis de post-grado). Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. Mexico

- [26] ASTM INTERNATIONAL. (2001). *ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Estados Unidos
- [27] ASTM INTERNATIONAL. (2015). *ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. Estados Unidos
- [28] ASTM INTERNATIONAL. (2015). *ASTM E18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. Estados Unidos
- [29] Callister W. (2010). *Materials Science and Engineering an Introduction*. Utah, Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons, Inc.

Anexos

ANEXO I.

CERTIFICADO DEL MATERIAL ACERO AISI 4140 80 ksi

OSS APPROVED:



INSPECTION CERTIFICATE CERTIFICATO DI COLLAUDO (UNI EN 10204 3.1 / ISO 10474 3.1.B)

Dainine S.p.A. - Arcore plant
Via Achille Grandi, 100
20062 Arcore (MI) - Italy
+39 039 60 50 1 tel
+39 039 60 19 539 fax

Number / Numero:
03-18-09523

Date / Data: **November 22, 2018**

Page / Pagina:
1 / 9

Customer / Cliente: OILFIELD STEEL SUPPLY	Customer's Order Item / Rif. Ordine Cliente: 52265	Manufacturer's Works Order N° / Conferma-Posizione: 3233766/001
Surface / Superficie: BARE INSIDE, EXTERNALLY PROTECTED BY VARNISH GREZZI INTERNAMENTE, OLEATI ESTERNAMENTE	Product Type / Tipo di prodotto: QUENCHED & TEMPERED BONIFICATI	Ends / Estremità: PLAIN END (SQUARE CUT) LISCI ALLE ESTREMITA'
Standard or Specification / Norme o specifica: ACCORDING TO THE PSP OILFIELD 28238 REV.3 + OSS-MS-035 SECONDO PSP OILFIELD 28238 REV.3 + OSS-MS-035	Quantity / Quantità: 23P cs/PS	Nominal Weight / Peso nominale: 43.64 lb/ft 64.95 Kg/m
Dimensions / Dimensioni: Ø 120.65mm O.D. x 28.58mm W.	Length / Lunghezza: 20,000 ft + 37.999 ft 6096 mm + 11582 mm	

DELIVERY NOTES / AVVISI DI SPEDIZIONE

Job Number: 0031217575 / 000040	Delivery Notes / Avvisi di spedizione
Shipping note: 0100530178 - 21/11/2018	Address: 39839 SPUR 149
Address: 39839 SPUR 149	Town: 77354 MAGNOLIA
	Country: USA

TENSILE TEST / PROVA DI TRAZIONE

Heat N° Colata N°	Sample N° Prova N°	Lot N° Lotto N°	Specimen condition Condizioni della provetta	Specimen dimensions Dimensioni della provetta	Test temp Temp. di prova	Y.S.		U.T.S.		Elongation / Allungamento		Reduction of area Strizione
						Offset 0.2% Min: 80 Max: 95	EUL 0.5% Min: 80 Max: 95	Req. Min: 100 Max: -	Min: 110.7 Max: 111.0	Lo	Min. % Max. %	
983968	A6783/C	6	B QT Cs L	12.38 120.40	+20	89.4	89.4	110.7	50.8	2"	20.0%	45.0%
983968	A6784	6	B QT Cs L	12.90 122.70	+20	89.0	89.1	111.0	50.8	2"	20.0%	50.0%

B: Body / Corpo
 Cs: Cylindrical specimen / Cilindrica
 L: Longitudinal / Longitudinale
 Lo: Initial length / Lunghezza iniziale
 Ls: Location of sample / Ubicazione provetta
 Max: Maximum / Massimo
 Min: Minimum / Minimo
 Obt: Obtained / Ottenuto
 Ori: Orientation / Orientamento
 QT: Quenched and tempered / Bonificato
 Req: Required / Richiesto
 Sc: Specimen condition / Condizioni Provetta
 U.T.S: Ultimate Tensile Strength / Rottura
 Y.S: Yield Strength / Sneramento



Laitime S.p.A. - Arcore plant
 Via Achille Grandi, 100
 20892 Arcore (MB) - Italy
 +39 030 86 50 1 tel.
 +39 030 80 13 530 fax

INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICATO DI COLLAUDO
 (UNI EN 10204 3.1 / ISO 10474 3.1.B)

Number / Numero: **03-18-09523**
 Page / Pagina: **2 / 9**

Date / Data: **November 22, 2018**

Customer / Cliente: OILFIELD STEEL SUPPLY	Customer's Order Item / Rif. Ordine Cliente: 52265	Customer's Reference / Posizione Cliente: 3233786/001	Manufacturer's Works Order N° / Conferma-Posizione:
Manufacture Process / Processo di fabbricazione: QUENCHED & TEMPERED BONIFICATI	Product Type / Tipo di prodotto: See note nr.1 Vedi nota nr.1	Surface / Superficie: BARE INSIDE, EXTERNALLY PROTECTED BY VARNISH GREZZI INTERNAMENTE, OLEATI ESTERNAMENTE	
Standard or Specification / Norme o specifica: ACCORDING TO THE PSP OILFIELD 28238 REV.3 + OSS-MS-035	Steel Grade / Grado dell'Acciaio: STEEL GR. 4140 80 KPSI ACCIAIO GR.4140 80 KPSI	Ends / Estremità: PLAIN END (SQUARE CUT) LISCIALLE ESTREMITA'	
Dimensions / Dimensioni: Ø 4.750" O.D. x 1.125" W.T.	Length / Lunghezza: 20.000 ft ÷ 37.999 ft	Nominal Weight / Peso nominale: 43.64 lb/ft	
Schedule / Scheda: Ø 120.65mm O.D. x 28.58mm W.T.	Quantity / Quantità: 23Pcs/Pz		
			22831 lb
			10356 kg

CHEMICAL COMPOSITION / COMPOSIZIONE CHIMICA

Heat N° Colata N°	Sample N° Prova N°	Lot N° Lotto N°	Composition % / Composizione %															
			x 100							x 1000							x 100000	
H	Max	Min	DI	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S	Sn	Al	Ti	Nb	V	H
983988	4.74	4.1	4.73	41	79	25	12	98	16	16	12	1	11	25	2	1	2	16
983988	4.67	4.1	4.67	41	78	25	12	98	16	16	12	1	11	25	2	1	2	16
983988	4.73	4.1	4.73	41	79	25	12	98	16	16	13	1	13	26	2	1	4	11
983988	4.74	4.1	4.74	41	80	26	12	99	15	16	12	1	13	27	2	2	5	18
983988	4.73	4.1	4.73	41	79	25	12	98	16	16	13	1	13	26	2	1	4	11
983988	4.67	4.1	4.67	41	78	25	12	98	16	16	12	1	11	25	2	1	2	16

DI: DI (inch) **Max: Maximum / Massimo**
 H: Heat / Colata **Min: Minimum / Minimo**

THROUGH WALL HARDNESS / DUREZZA ATTRAVERSO LO SPESSORE

Heat N° Colata N°	Sample N° Prova N°	Lot N° Lotto N°	Individuals / Individuali			Average / Media			Hardness type / Tipo de durezza: rockwell			
			Min: 16.0	Max: 22.0	Var: --	Min: --	Max: --	Var: --	Minimum martensite / martensite minima: (%)	Scale	Formula applied / Formula Applicata	
			Specimen condition			Quad.			OD			
			LS	B	B	Sc	QT	QT	1	2	3	Avg.
983988	A6783/C	6	B	B	B	Sc	QT	QT	1	20.2	20.9	20.6
983988	A6784	6	B	B	B	Sc	QT	QT	1	20.9	20.6	20.5
Avg: Average / Media			diametro esterno									20.7

Min: Minimum / Minimo **Max: Maximum / Massimo**
 Quad: Quadrant / Quadrante

CERTIFICATO DEL MATERIALE ACERO AISI 4140 110 ksi

Tenaris
 S.p.A. - Arcore plant
 Via Achille Grandi, 101
 20862 Arcore (MB) - Italy
 +39 039 6050198
 +39 039 6051198 fax

INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICATO DI COLLAUDO
 (UNI EN 10204 3.1 / ISO 10474 3.1.B)

Number / Numero: **03/18/00715**
 Page / Pagina: **1 / 9**
 Date / Data: **January 26, 2018**

Customer / Cliente: OILFIELD STEEL SUPPLY	Customer's Order Item / Rif. Ordine Cliente - Item: 51604	Manufacturer's Works Order N° / Conferma-Posizione: 3283167/006
Manufacture Process / Processo di fabbricazione: QUENCHED & TEMPERED BONIFICATI	Product Type / Tipo di prodotto: See note nr.1 Vedi nota nr.1	Surface / Superficie: BARE INSIDE, EXTERNALLY PROTECTED BY VARNISH GREZZI INTERNAMENTE, OLEATI ESTERNAMENTE
Standard or Specification / Nome o specifica: ACCORDING TO THE PSP OILFIELD 28238 REV.1 & OSS-MS-037 REV. 1.3 SECONDO PSP OILFIELD 28238 REV.1 & OSS-MS-037 REV. 1.3	Steel Grade / Grado dell'Acciaio: STEEL GR. 4140 125 KPSI ACCIAIO GR.4140 125 KPSI	Ends / Estremità: PLAIN END (SQUARE CUT) LISCI ALLE ESTREMITA'
Dimensions / Dimensioni: ø 6.000" O.D. x 1.500" W.T. ø 152.40mm O.D. x 38.10mm W.T.	Length / Lunghezza: 20.000 ft = 37.599 ft 6096 mm = 11582 mm	Nominal Weight / Peso nominale: 72.23 lb/ft 107.49 Kg/m
	Quantity / Quantità: 30PCS/PZ	

DELIVERY NOTES / AWISI DI SPEDIZIONE

Delivery Notes / Awisi di spedizione	Delivery Notes / Awisi di spedizione
Job Number: 0031182468 / 000070	Town: 7/354 MAGGIOLIA
Shipping code: 99510516 - 244010018	Country: USA
Address: 38039 SPUR 149	

TENSILE TEST / PROVA DI TRAZIONE

Heat N° Cottura N°	Sample N° Prova N°	Specimen condition Condizioni della provetta	Specimen dimensions Dimensioni della provetta	Test Temp. Temp. di prova	Y.S. EUL 0.2%	Elongation / Allungamento		Reduction of area Strizione		
						Lo	Min.	Max.	Min.	Max.
978182	C7482	B Q1 Ca L	Sub Area mm ²	mm ²	ksi	cal.	mm	mm	%	%
978182	C7483C	B Q1 Ca L	12.52	123.10	+20	137.8	2"	50.8	15.0%	15.9%
			12.52	123.10	+20	136.1	2"	50.8	15.0%	17.0%

B: Body / Corpo	Lo: Initial length / Lunghezza iniziale	Min: Minimum / Minimo
Ca: Cylindrical specimen / Cilindrica	La: Location of sample / Ubicazione provetta	Obt: Obtained / Ottenuto
L: Longitudinal / Longitudinale	Max: Maximum / Massimo	Ori: Orientation / Orientamento
		Q1: Quenched and tempered / Bonificato
		Sc: Specimen condition / Condizioni Provetta
		Y.S: Yield Strength / Svernamento

Datielive S.p.A. - Arcore plant
Via Achille Gatti, 100
20820 Arcore (MI) - Italy
+39 039 86 50 130
+39 039 86 13 534 fax

Tenaris
Customer / Cliente: OILFIELD STEEL SUPPLY
\$1604

INSPECTION CERTIFICATE
CERTIFICATO DI COLLAUDO
(UNI EN 10204 3.1 / ISO 10474 3.1.B)

Number / Numero: **03/18/00715**
Date / Data: January 26, 2018

Page / Pagina: **2 / 9**

Manufacturer's Works Order N° / Contorno-Pesobone: 3283187/808	Product Type / Tipo di prodotto: See note nr.1 Vedi nota nr.1
Source / Sorgente: BARE INSIDE, EXTERNALLY PROTECTED BY VARNISH GREZZI INTERNAMENTE, OLEATI ESTERNAMENTE	Steel Grade / Grado dell'Acciaio: STEEL GR. 4140 125 KPSI ACCIAIO GR.4140 125 KPSI
Ends / Estremità: PLAIN END (SQUARE CUT) LUSCI ALLE ESTREMITA'	Quantity / Quantità: 30Pcs/1Pz
Normal Weight / Peso nominale: 72.23 lb/ft 107.49 Kg/m	Length / Lunghezza: 20.000 ft + 37.999 ft 6096 mm + 11582 mm
Manufacturer's Works Order N° / Contorno-Pesobone: 3283187/808	Customer's Order Item / Rif. Ordine Cliente - Item/Cliente's Reference / Posizione Cliente: \$1604
Source / Sorgente: BARE INSIDE, EXTERNALLY PROTECTED BY VARNISH GREZZI INTERNAMENTE, OLEATI ESTERNAMENTE	Product Type / Tipo di prodotto: See note nr.1 Vedi nota nr.1
Ends / Estremità: PLAIN END (SQUARE CUT) LUSCI ALLE ESTREMITA'	Steel Grade / Grado dell'Acciaio: STEEL GR. 4140 125 KPSI ACCIAIO GR.4140 125 KPSI
Normal Weight / Peso nominale: 72.23 lb/ft 107.49 Kg/m	Quantity / Quantità: 30Pcs/1Pz
Manufacturer's Works Order N° / Contorno-Pesobone: 3283187/808	Customer's Order Item / Rif. Ordine Cliente - Item/Cliente's Reference / Posizione Cliente: \$1604

TENSILE TEST / PROVA DI TRAZIONE

Heat N° Colata N°	Sample N° Prova N°	Specimen condition Condizioni della provetta	Specimen dimensions Dimensioni della provetta	Test Temp. di prova	Y.S.		Y.S.		U.T.S.		Reduction of area Stitzione	
					Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
975182	C7482	B	12.52	+20	139.6	138.7	155.8	153.5	50.8	50.8	15.0%	17.0%
975182	C7483C	B	12.52	+20	139.6	138.7	155.8	153.5	50.8	50.8	15.0%	17.0%

B: Body / Corpo
C: Cylindrical specimen / Cilindrica
L: Longitudinal / Longitudinale
L0: Initial length / Lunghezza iniziale

L: Location of sample / Ubicazione provetta
Max: Maximum / Massimo
Min: Minimum / Minimo
Obt: Obtained / Ottenuto

Qt: Orientation / Orientamento
QT: Quenched and tempered / Bonificato
Req: Required / Richiesto
Sc: Specimen condition / Condizioni Provetta

U.T.S.: Ultimate Tensile Strength / Rottura
Y.S: Yield Strength / Snervamento

CHEMICAL COMPOSITION / COMPOSIZIONE CHIMICA

Heat N° Colata N°	Sample N° Prova N°	Composition % / Composizione %															
		C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S	Sn	Al	Ti	Nb	V	H	
975182	C7482	0.02	0.40	0.02	0.26	1.3	10.3	0.21	1.5	1.2	1.1	1.0	0.29	3	2	6	16
975182	C7483C	0.02	0.40	0.02	0.26	1.3	10.3	0.21	1.5	1.2	1.1	1.0	0.29	3	2	6	16

This certificate is issued by a computerized system and it is valid with electronic signature. On the original certificate the trademark green colored "Tenaris" is stamped. In case the owner of the original certificate would release a copy of it, he must attest its conformity to the original one taking upon himself the responsibility for any falsity or not allowed use. Any alteration or error introduced on this certificate will be subjected to the law.

Questo certificato è emesso da un sistema computerizzato ed è valido con firma elettronica. Il marchio a verde colorato "Tenaris" è stampato sulla versione originale. In caso l'utente rilasciasse una copia di esso, deve attestare la conformità con l'originale assumendosi la responsabilità per qualsiasi falsità o uso non permesso. Qualunque alterazione o errore introdotto su questo certificato sarà sottoposto a norma di legge.

CERTIFICADO DEL MATERIAL ACERO AISI 4145

Steel Certificate of Test
 1835 Duesber Ave, S.W.
 Canton, Ohio 44706
ID #0484616-2

TIMKEN STEEL

Page 1 of 3 7/16/2019

S Tube Supply
 O T 4669 Brittmore Rd 77041
 L O Houston, TX 77041 USA
 D

S TUBE SUPPLY
 H T 4669 BRITTMORE RD
 I O HOUSTON, TX 77041 USA
 P

Customer Order: M01001216 Customer Part Number: 58825
 Mill Order: 21310-A (2151722) Heat Number(s): J6970

Description of Material
 DIAMETER: 5.250 in (133.350 mm)
 Shape: RD
 Prod Type: BAR
 Sales Type: 4145M
 Int Quality: ELECTRIC FURNACE-VACUUM DEGAS-ULTRASONIC
 Condition: HOT ROLL - NORMALIZE - QUENCH - TEMPER - STRESS FREE

Specification

- TUBE SUPPLY TS-B-4145-120 Rev. 0 11/17/2017 SUPPLEMENT 86: EXCEPT AS NOTED
- AMS 2750 Rev. E 07/01/2012 EXCEPT AS NOTED
- AMS H-6975 Rev. B 11/01/2010 EXCEPT AS NOTED
- ASTM A 29 / A 29M Rev. 15 02/02/2017 EXCEPT AS NOTED
- ASTM A 322 Rev. 13 EXCEPT AS NOTED
- ASTM A 370 Rev. 17a 11/15/2017
- ASTM A 388 / A 388M Rev. 16a 09/01/2016 EXCEPT AS NOTED
- ASTM A 751 Rev. 14a 10/01/2014
- ASTM E 10 Rev. 17 04/01/2017
- ASTM E 18 Rev. 17
- ASTM E 23 Rev. 16b
- ASTM E 45 Rev. 18 03/01/2018 METHOD A
- ASTM E 112 Rev. 13 10/01/2013

Chemistry Information

	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Al
SPEC Ladle Min:	.42	.80		.15	.75		.25			
SPEC Ladle Max:	.49	1.20	.025	.025	.35	1.30	.25	.35	.35	
J6970 Ladle:	.46	1.11	.010	.006	.28	1.17	.12	.30	.20	.030
J6970 1:	.46	1.10	.010	.006	.28	1.18	.12	.31	.20	.029
J6970 2:	.46	1.10	.009	.006	.28	1.17	.12	.30	.20	.030

Testing of elements performed at TimkenSteel Chemistry Labs except where noted.

Metallurgy Information

SPEC: Hardness UOM BRINELL HARDNESS 285 Min 341 Max LOCATION SURFACE

Heat	Piece#	1	UOM
J6970	A	HARDNESS 341	BRINELL
	A	LOCATION SURFACE	BRINELL
	B	HARDNESS 341	BRINELL
	B	LOCATION SURFACE	BRINELL

SPEC: Impacts DIRECTION LONGITUDINAL ENERGY AVERAGE 35 Min ENERGY INDIVIDUAL 30 Min ENERGY UOM FT-LBS EXPANSION UOM IN LOCATION MID TEMPERATURE +32 TEMPERATURE SCALE F TYPE CHARPY SPECIMEN SIZE FULL

Heat	Piece#	Temp	FT-LBS				Shear %			Lateral Expansion IN			Direction	Location	Type	Specimen Size
			1	2	3	Avg.	1	2	3	1	2	3				
J6970	3132761	+32 F	38	35	35	36	95	95	95	.021	.016	.017	LONG.	MID	CHARPY	FULL
	3132823	+32 F	43	42	44	43	95	95	95	.023	.025	.026	LONG.	MID	CHARPY	FULL

3MM RADIUS STRIKER USED FOR IMPACT TESTING

SPEC: NonMet JK A THIN 2.5 Max A HEAVY 2.5 Max B THIN 2.5 Max B HEAVY 2.5 Max C THIN 2.5 Max C HEAVY 2.5 Max D THIN 2.5 Max D HEAVY 2.5 Max

Heat	Loc	Thin		Heavy		Thin		Heavy		Dox	Dox
		A	B	A	B	A	B	C	C		
J6970	AAVERAGE	0.9	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	
	B11	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	
	B31	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	
	B41	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	
	T11	1.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	
	T31	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	
	T41	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	

SPEC: Tensile TENSILE 140,000 Min STRENGTH UOM PSI YIELD .2 120,000 Min MIN ELONGATION 13.0 Min GAUGE LENGTH 2 IN MIN REDUCTION IN AREA 40.0 Min SHAPE ROUND DIRECTION LONGITUDINAL TEMPERATURE ROOM LOCATION MID

Heat	Piece#	Tensile		.2% Yld		Gauge		Specimen	Direction	Temp	Location	
		Strength	UOM	Strength	Elong%	Length	%Red					
J6970	3132761	168,019	PSI	152,429	17.2	2 IN	48.8	.505"	RD	LONG.	RT	MID
	3132823	163,938	PSI	147,534	18.0	2 IN	47.8	.505"	RD	LONG.	RT	MID

SPEC: Ultrasonic Inspection CLASS B
 MATERIAL UT INSPECTED TO A 3.2MM FBH IN ACCORDANCE WITH ASTM A388 - RESULTS SATISFACTORY

All Hardness and Tensile testing performed at TimkenSteel Metallurgical Lab except where noted.

Heat Treatment

QUEN Min: 1550.0 DEG FAR
 TEMP Min: 1050.0 DEG FAR

Heat: J6970 Lot: 2151722
 NORMALIZED - 1675 F - 3.34 hour(s)
 AUSTENITIZED - 1550 F - 0.57 hour(s) - WATER quenched
 TEMPERED - 1110 F - 1.43 hour(s)

ANEXO II. WPS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA

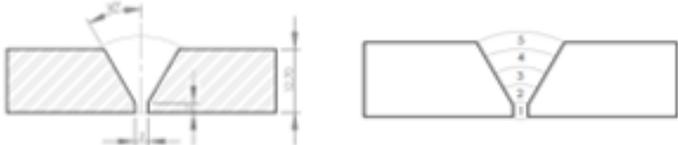
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (01)

Nombre Compañía: EPN PQR No.: Según norma: ASME IX – 2019			No. Identificación: EPN.001-DV Fecha: 03/12/2019 Realizado por: David Vaca T. Organización: Escuela Politécnica Nacional					
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de junta: Junta de ranura en Vee Abertura raíz: 2.0 mm (+ 0.4, - 0.0 mm) Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Angulo de ranura 60° (+ 10°, - 10°) Placa de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Método: Amolado o con biseladora			Artículo V. Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente/Descendente Técnica: Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>					
Artículo III. Metal Base Especificación: AISI 4140 Mínimo esfuerzo a la tracción: 110 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 80 ksi Espesor: 13 mm (1/2 in.) Diámetro: 114 mm (4 1/2 in.) aprox.			Artículo VI. Pre calentamiento Temperatura de pre calentamiento mínima: 190°C Temperatura entre pases máxima: 240°C Mantenimiento del pre calentamiento: medición con pirómetro					
Artículo IV. Metal de Aporte Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E7010 Casa comercial: Oerlikon Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E11018-M Casa comercial: INDURA			Artículo VII. Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura N/A					
Artículo II. Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Pase raíz: Grata Pases siguientes: Grata/Cepillo metálico			Artículo VIII. Notas <ul style="list-style-type: none"> Asegurar limpieza del metal base Controlar la temperatura entre pases Enfriar lentamente en arenas refractarias 					
Detalle de la Junta								
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E7010	3.2	DC ⁺	85	29	27.7	X	
2	E7010	3.2	DC ⁺	85	29	27.7	X	
3-n	E11018-M	3.2	DC ⁺	110	22	27.7	X	

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (02)

Nombre Compañía: EPN PQR No.: Según norma: ASME IX – 2019		No. Identificación: EPN.002-DV Fecha: 03/12/2019 Realizado por: David Vaca T. Organización: Escuela Politécnica Nacional						
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de junta: Junta de ranura en Vee Abertura raíz: 2.0 mm (+ 0.4, - 0.0 mm) Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Angulo de ranura 60° (+ 10°, - 10°) Placa de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Método: Amolado o con biseladora		Artículo V. Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente/Descendente Técnica: Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>						
Artículo III. Metal Base Especificación: AISI 4140 Mínimo esfuerzo a la tracción: 110 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 80 ksi Espesor: 13 mm (1/2 in.) Diámetro: 114 mm (4 1/2 in.) aprox.		Artículo VI. Pre calentamiento Temperatura de pre calentamiento mínima: 190°C Temperatura entre pases máxima: 240°C Mantenimiento del pre calentamiento: medición con pirómetro						
Artículo IV. Metal de Aporte Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E7010 Casa comercial: Oerlikon Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E11018-M Casa comercial: INDURA		Artículo VII. Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura Tratamiento Térmico: Alivio de esfuerzos Método: Horno Temperatura de TT: 440°C Velocidad de calentamiento: 20°C/min Tiempo: 20 min Método de enfriamiento: enfriamiento lento dentro del horno						
Artículo II. Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Pase raíz: Grata Pases siguientes: Grata/Cepillo metálico		Artículo VIII. Notas <ul style="list-style-type: none"> Asegurar limpieza del metal base Controlar la temperatura entre pases Enfriar lentamente en arenas refractarias 						
Detalle de la Junta								
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	Recto
1	E7010	3.2	DC ⁻	85	29	27.7	X	
2	E7010	3.2	DC ⁺	85	29	27.7	X	
3-n	E11018-M	3.2	DC ⁺	110	22	27.7	X	

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (03)

Nombre Compañía: EPN PQR No.: Según norma: ASME IX – 2019			No. Identificación: EPN.003-DV Fecha: 03/12/2019 Realizado por: David Vaca T. Organización: Escuela Politécnica Nacional					
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de junta: Junta de ranura en Vee Abertura raíz: 2.0 mm (+ 0.4, - 0.0 mm) Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Angulo de ranura 60° (+ 10°, - 10°) Placa de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Método: amolado o con biseladora			Artículo V. Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente/Descendente Técnica: Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>					
Artículo III. Metal Base Especificación: AISI 4140 (1) Mínimo esfuerzo a la tracción: 110 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 80 ksi Especificación: AISI 4140 (2) Mínimo esfuerzo a la tracción: 120 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 110 ks Espesor: 13 mm (1/2 in.) Diámetro: 114 mm aprox.			Artículo VI. Pre calentamiento Temperatura de pre calentamiento mínima: 190°C Temperatura entre pases máxima: 240°C Mantenimiento del pre calentamiento: medición con pirómetro					
Artículo IV. Metal de Aporte Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E7010 Casa comercial: Oerlikon Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E11018-M Casa comercial: INDURA			Artículo VII. Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura Tratamiento Térmico: Revenido Método: Horno Temperatura de TT: 580°C Velocidad de calentamiento: 20°C/min Tiempo: 30 min Método de enfriamiento: enfriamiento rápido en aire					
Artículo II. Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Pase raíz: Amoladora Pases siguientes: Grata/Cepillo metálico			Artículo VIII. Notas <ul style="list-style-type: none"> • Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza del metal base • Controlar la temperatura entre pases 					
Detalle de la Junta 								
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E7010	3.2	DC-	85	29	27.7	X	
2	E7010	3.2	DC+	85	29	27.7	X	
3-n	E11018-M	3.2	DC+	110	22	27.7	X	

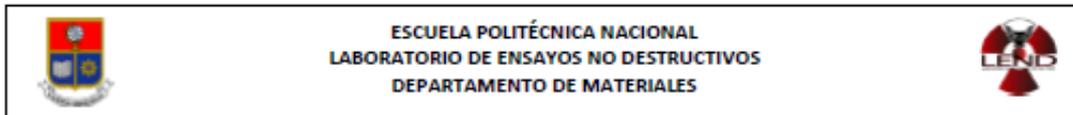
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (04)

Nombre Compañía: EPN PQR No.: Según norma: ASME IX – 2019		No. Identificación: EPN.004-DV Fecha: 03/12/2019 Realizado por: David Vaca T. Organización: Escuela Politécnica Nacional						
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de junta: Junta de ranura en Vee Abertura raíz: 2.0 mm (+ 0.4, - 0.0 mm) Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Angulo de ranura 60° (+ 10°, - 10°) Placa de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Método: amolado o con biseladora		Artículo V. Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente/Descendente Técnica: Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>						
Artículo III. Metal Base Especificación: AISI 4140 (1) Mínimo esfuerzo a la tracción: 110 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 80 ksi Especificación: AISI 4145 (2) Mínimo esfuerzo a la tracción: 150 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 120 ksi Espesor: 13 mm (1/2 in.) Diámetro: 114 mm aprox.		Artículo VI. Pre calentamiento Temperatura de pre calentamiento mínima: 190°C Temperatura entre pases máxima: 240°C Mantenimiento del pre calentamiento: medición con pirómetro						
Artículo IV. Metal de Aporte Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E6010 Casa comercial: Lincoln Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E11018-M Casa comercial: INDURA		Artículo VII. Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura N/A						
Artículo II. Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Pase raíz: Amoladora Pases siguientes: Grata/Cepillo metálico		Artículo VIII. Notas <ul style="list-style-type: none"> Verificar alineación de la junta Asegurar limpieza del metal base Enfriar lentamente en arenas refractarias 						
Detalle de la Junta								
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E6010	3.2	DC ⁻	70	26	27.7	X	
2	E6010	3.2	DC ⁺	95	26	27.7	X	
3-n	E11018-M	3.2	DC ⁺	110	22	27.7	X	

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (05)

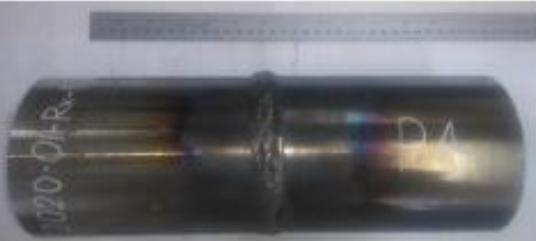
Nombre Compañía: EPN PQR No.: Según norma: ASME IX – 2019			No. Identificación: EPN.005-DV Fecha: 03/12/2019 Realizado por: David Vaca T. Organización: Escuela Politécnica Nacional					
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de junta: Junta de ranura en Vee Abertura raíz: 2.0 mm (+ 0.4, - 0.0 mm) Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Angulo de ranura 60° (+ 10°, - 10°) Placa de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Método: amolado o con biseladora			Artículo V. Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente/Descendente Técnica: Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/>					
Artículo II. Metal Base Especificación: AISI 4140 (1) Mínimo esfuerzo a la tracción: 130 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 110 ksi Especificación: AISI 4145 (2) Mínimo esfuerzo a la tracción: 150 ksi Mínimo esfuerzo a la fluencia: 120 ksi Espesor: 13 mm (1/2 in.) Diámetro: 114 mm aprox.			Artículo VI. Pre calentamiento Temperatura de pre calentamiento mínima: 190°C Temperatura entre pases máxima: 240°C Mantenimiento del pre calentamiento: medición con pirómetro					
Artículo III. Metal de Aporte Diámetro: 3.2 mm Denominación AWS: E11018-M Casa comercial: INDURA			Artículo VII. Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura Tratamiento Térmico: Alivio de esfuerzos Método: Horno Temperatura de TT: 440°C Velocidad de calentamiento: 20°C/min Tiempo: 20 min Método de enfriamiento: enfriamiento lento dentro del horno					
Artículo IV. Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Pase raíz: Amoladora Pases siguientes: Grata/Cepillo metálico			Artículo IX. Notas <ul style="list-style-type: none"> Verificar alineación de la junta Asegurar limpieza del metal base Enfriar lentamente en arena refractaria 					
Detalle de la Junta								
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			Oscilado	recto
1	E11018-M	3.2	DC ⁺	110	22	27.7	X	
2	E11018-M	3.2	DC ⁻	110	22	27.7	X	
3-n	E11018-M	3.2	DC ⁻	110	22	27.7	X	

ANEXO III. INFORME DEL ENSAYO DE RADIOGRAFÍA

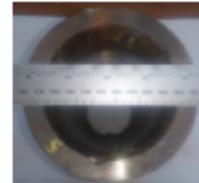


REPORTE DE INSPECCIÓN DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

DATOS GENERALES	
Clientes: David Vaca, Estudiantes titulación.	Reporte N°: LEND-EPN-2020-R01-RX-01
Fecha de inspección: 8 de enero del 2020.	Lugar: Ecuador-Quito-EPN
Orden de trabajo: LEND-EPN-001	Quipux/Documento de referencia:
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
<p>Descripción: Tuberías soldadas Posición 6G</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Material: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4140 80 ksi. Dimensiones: L: 150 mm y Dext: 160 mm Numero de pases: 5 Pase de raíz y pase caliente: Electrodo E7010. Pases de relleno: 3, con Electrodo E11018-M 1/8". 2. Material: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4140 80 ksi con alivio de esfuerzos. Dimensiones: L: 150 mm y Dext: 160 mm Numero de pases: 5 Pase de raíz y pase caliente: Electrodo E7010. Pases de relleno: 3, con Electrodo E11018-M 1/8". 3. Material: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4140 110 ksi. Dimensiones L: 150 mm y Dext: 160 mm Numero de pases: 5 Pase de raíz y pase caliente: Electrodo E7010. Pases de relleno: 3, con Electrodo E11018-M 1/8". 4. Material: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4145 120 ksi. Dimensiones L: 150 mm y Dext: 160 mm Numero de pases: 5 Pase de raíz y pase caliente: Electrodo E6010. Pases de relleno: 3, con Electrodo E11018-M 1/8". 5. Material: Acero AISI 4140 110 ksi con Acero AISI 4145 120 ksi. Dimensiones L: 150 mm y Dext: 160 mm Numero de pases: 5 Pase de raíz y pase caliente: Electrodo E11018-M. Pases de relleno: 3, con Electrodo E11018-M 1/8". 	<p>Identificación:</p> <p>2020-R01-RX-01-P-1: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4140 80 ksi</p> <p>2020-R01-RX-01-P-2: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4140 80 ksi con alivio de esfuerzos.</p> <p>2020-R01-RX-01-P-3: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4140 110 ksi.</p> <p>2020-R01-RX-01-P-4: Acero AISI 4140 80 ksi con Acero AISI 4145 120 ksi.</p> <p>2020-R01-RX-01-P-5 Acero AISI 110 ksi con Acero AISI 4145 120 ksi.</p>
Material: Acero AISI 1040, AISI 4140 y AISI 4145.	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material.

ESQUEMA DE LA PIEZA	
2020-R01-RX-01-P-1	
	
2020-R01-RX-01-P-2	
	
2020-R01-RX-01-P-3	
	
2020-R01-RX-01-P-4	
	

2020-R01-RX-01-P-5



EQUIPOS Y MATERIALES

Equipos

Baltographe	Marca	BF 200/10
	Modelo	500196 – 30B
	Rango	(0 a 200) kV y (0 a 10) A
	Resolución	10 kV y 1 A
	Certificado de mantenimiento N°	RX-2019-0037
Geiger - Müller	Marca	NDS Products
	Modelo	ND-2000
	Rango	(0 a 100) μ Sv/hr y (0 a 10) mR/hr
	Resolución	2 μ Sv/hr y 0.2 mR/hr
	Certificado de calibración N°	CAL 1781-2019
Negatoscopio	Marca	View Lite
	Modelo	0414G
	Rango	No Aplica
	Resolución	No Aplica
	Certificado de calibración N°	No Aplica
Calibrador con Vernier – Digital	Marca	Insize
	Modelo	N/D
	Rango	(0 a 200) mm
	Resolución	0.01 mm
	Certificado de calibración N°	LL-2020-0014
Galga de soldadura	Marca	Bridge Cam
	Modelo	CAM TYPE GAUGE
	Rango	(0 a 25.4) mm y (0 a 1) pulg.
	Resolución	1 mm
	Certificado de calibración N°	Por Calibrar
Regla Metálica	Marca	Mitutoyo
	Rango	(0 a 600) mm

	Resolución	0,01 mm	
	Código	180-603U	
	Certificado de calibración N°	Por calibrar	
Materiales e Insumos			
Película	Marca	Structurix	
	Tipo	II – D7	
Letras y Número de Plomo	Marca	No aplica	
	Tipo	No aplica	
(IQIs) Penetrantes	Tipo	Set B para Acero	
CONDICIONES DE TRABAJO			
Procedimiento		Basado en ASTM E94	
Identificación: 2020-R01-RX-01-P-1			
Tomas: 1	Kv: 160 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 2 min 4 s	Distancia a la Fuente: 51 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones:			
Identificación: 2020-R01-RX-01-P-2			
Tomas: 1	Kv: 160 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 2 min 4 s	Distancia a la Fuente: 51 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones:			
Identificación: 2020-R01-RX-01-P-3			
Tomas: 1	Kv: 160 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 2 min 4 s	Distancia a la Fuente: 51 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones:			
Identificación: 2020-R01-RX-01-P-4			
Tomas: 1	Kv: 160 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 2 min 4 s	Distancia a la Fuente: 51 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones:			
Identificación: 2020-R01-RX-01-P-5			
Tomas: 1	Kv: 160 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 2 min 4 s	Distancia a la Fuente: 51 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones:			
PROCEDIMIENTO DE PELÍCULAS			
Temp. Ambiente:	T. Revelado:	T. Parada:	T. Fijado:
20°C	5 min	2 min	10 min
Baño de Parada	T. Lavado Final	T. Lavado Deshumectante	Tiempo de Secado
10 min	NA	NA	15 min

Observaciones:						
Identificación: 2020-R01-RX-01-P5-AB						
						
Imagen 20. P5-AB						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	--	--	4	36	--	--
Observaciones:						
Identificación: 2020-R01-RX-01-P5-BC						
						
Imagen 21. P5-BC						
Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	--	--	5	12	--	--
			18	6		
			26	7		
Escoria Alargada	26	14	--	--	20	4
Observaciones:						
Identificación: 2020-R01-RX-01-P5-CD						



Imagen 22. P5-CD

Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	--	--	4	35	--	--
Mordeduras	2	29	--	--	4	38
Observaciones:						
Identificación: 2020-R01-RX-01-P5-DE						



Imagen 23. P5-DE

Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	--	--	2	35	0	6
Porosidad	--	--	--	--	15	3
Escoria Alargada	--	--	--	--	10	6
Observaciones:						
Identificación: 2020-R01-RX-01-P5-EA						



Imagen 24. P5-EA

Discontinuidades	Sección A-B		Sección B-C		Sección C-D	
	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)	X(mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	--	--	14	4	--	--
Porosidad	26	2	--	--	--	--
Escoria Alargada	--	--	--	--	15 19	5 3
Observaciones:						
Nota:						
1. Este informe tiene validez únicamente en su forma íntegra y original, no se permite la reproducción parcial o total de este documento, sin la autorización por escrita de LEND-EPN						
OPERADOR: Ing. Santiago Camacho						
Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END Fecha: 20/03/2020 Firma: Ing. Santiago Camacho ASISTENTE DE ENSAYOS LEND ASNT Nivel II en Radiografía Industrial Limitada a interpretación Firma: Ing. Verónica Sotomayor JEFE LEND ASNT Nivel II en Radiografía Industrial Limitada a interpretación				Cliente Fecha: 20/03/2020 Nombre: David Vaca Contacto: 0990519785 Correo: david.vaca01@epn.edu.ec		

----- FIN DE INFORME -----
 ----- END OF REPORT -----

ANEXO IV.

INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN MECÁNICO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.038

Quito, 04 de marzo de 2020

Solicitado por: M.Sc. Galo Homero Barragán
Persona de contacto: David Vaca
Teléfono: 0990519785
Correo: david.vaca01@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 03/03/2020
Fecha de ejecución: 03/03/2020

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0014-2020

1. **MUESTRAS:** Diez (10) juntas soldadas para ensayo de tracción.
2. **GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO DE SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE HERRAMIENTAS DE COMPLETACIÓN DE POZOS PETROLEROS.

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

Tabla 1. Identificación de las muestras.

id. cliente	id. del LAEV
T1 80-1, T1 80-2	M20.038.01- M20.038.02
T2 80-1, T2 80-2	M20.038.03- M20.038.04
T3 80-1, T3 80-2	M20.038.05- M20.038.06
T4 80-1, T4 80-2	M20.038.07- M20.038.08
T5 80-1, T5 80-2	M20.038.09- M20.038.10

3. **CONDICIONES AMBIENTALES:**

Temperatura: $28,5 \pm 1,4^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $31,0 \pm 2,6\%$



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

4. ENSAYO DE TRACCIÓN

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

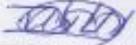
Tabla 2. Resistencia a la tracción de las probetas ensayadas.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.038.01	18,79	13,31	44 067	196 018	113,7	783,8	FMB
M20.038.02	19,22	13,07	40 466	180 003	103,9	716,4	FJS
M20.038.03	18,93	12,97	44 200	196 610	116,1	800,6	FMB
M20.038.04	19,06	12,66	43 731	194 524	116,9	806,1	FMB
M20.038.05	18,93	12,98	41 127	182 941	108,0	744,7	FJS
M20.038.06	19,01	12,50	41 002	182 385	111,3	767,6	FMB
M20.038.07	18,88	12,75	44 128	196 290	118,3	815,4	FMB
M20.038.08	18,54	12,39	42 269	188 022	118,7	818,4	FJS
M20.038.09	18,99	12,52	42 867	190 681	116,4	802,4	FMB
M20.038.10	19,13	12,90	43 289	192 558	113,2	780,2	FMB

FJS: Falla la junta soldada

FMB: Falla el material base

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

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamín
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



ANEXO V. PQR DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)					
Nombre Compañía: Escuela Politécnica Nacional			Fecha de realización: 17/03/2020		
PQR No. EPN-J001			Fecha de expiración: 17/03/2021		
Según norma: ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications"			Inspector: Ing. Gabriel Velastegul		
WP# SOPORTE No. EPN.001-DV					
Nombre del Soldador: Jorge Guzmán		CI# 1720117223		Codigo No. SW-81	
Proceso de soldadura:					
MANUAL		SEMIAUTOMÁTICO		AUTOMÁTICO	
SMAW X		FCAW		GMAW	
SAW		SAW		SAW	
Tipo y grado del metal base: AISI 4140 80 ksi		Espesor: 13 mm (1/2 in.)		Tipo de soldadura: RANURA	
Metal de aporte: Denominación AWS: E 7010 / E11018		Diámetro: 3.2 mm.			
Pre calentamiento: 220°C		Temperatura entre pases: 240°C			
Tipo de máquina de soldar: Inverter		Potencia de la máquina de soldar: 2.4 KVA			
PARÁMETRO DE SOLDADURA					
Pases No. 5		Proceso: SMAW			
Tipo de electrodo (AWS): E 7010 / E11018		Especificación (SFA) No. 5.5			
Diámetro (mm): 3.2		Voltaje: 29 V			
Dirección: D ↓ A ↑		Tipo de corriente y polaridad: 110 DC+			
Oscilado A/D					
EXÁMENES					
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS					
INSPECCIÓN VISUAL		Calificado X		Descalificado	
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL		Calificado X		Descalificado	
CALIFICADO		SI		DESCALIFICADO	
ENSAYOS DESTRUCTIVOS					
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO					
DOBLADOS LATERAL					
Muestra No.	Identificación	Observaciones	Aprobado		
1	P1.1	Indicación de 2.1 mm	SI		
	P1.2	Ausencia de indicaciones	SI		
	P1.3	Indicación de 0.62 mm	SI		
	P1.4	Ausencia de indicaciones	SI		
ENSAYOS DE DOBLADO.		Calificado X		Descalificado	
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN					
Muestra No.	Identificación	Carga máxima registrada (lbf)	Resistencia a la tracción (ksi)	Obs.	Aprobado
1	P1.1	44 057	113,7	FMB	SI
	P1.2	40 466	103,8	FJS	NO
ENSAYOS DE TRACCIÓN.		Calificado		Descalificado X	
Límites de calificación:		No deben existir discontinuidades abiertas en la soldadura o en la zona afectada por el calor mayores a 1/8 in. (3 mm) Las probetas analizadas satisfacen los requerimientos de ASME Sección IX Ed. 2019 para la aceptación de los ensayos de doblado, basado en los criterios indicados en QW-160, QW-161, QW-162, QW-163 Satisfacen los requerimientos para la aceptación de los ensayos de tracción, basado en los criterios indicados en QW-153			
Nosotros certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications" para calificación de soldadores.					
Realizado por: David Vaca			Aprobado por: Ing. Gabriel Velastegul		
Firma:			Firma:		
Fecha: 17/3/2020			Fecha: 17/3/2020		

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

Nombre Compañía: Escuela Politécnica Nacional	Fecha de realización: 17/03/2020
PQR No. EPN-J002	Fecha de expiración: 17/03/2021
Según norma: ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications"	Inspector: Ing. Gabriel Velastegui
WP8 SOPORTE No. EPN.002-DV	

Nombre del Soldador: Jorge Guzmán	CI #: 1720117223	Código No. 8W-31
Proceso de soldadura:	MANUAL	SEMIAUTOMÁTICO
	SMAW X	FCAW GMAW SAW
Tipo y grado del metal base: AISI 4140 80 ksi	Espeor: 13 mm (1/2 in.)	Tipo de soldadura: RANURA
Metal de aporte: Denominación AWS: E 7010 / E11018		Diámetro: 3.2 mm
Pre calentamiento: 220°C	Temperatura entre pases: 240°C	
Tipo de máquina de soldar: Inverter	Potencia de la máquina de soldar: 2.4 KVA	

PARÁMETRO DE SOLDADURA	
Pases No. 5	Proceso: SMAW
Tipo de electrodo (AWS): E 7010 / E11018	Especificación (SFA) No. 5.5
Diámetro (mm): 3.2	Voltaje: 29 V
Dirección: D ↓ A ↑	Tipo de corriente y polaridad: 110 DC+
Oscilado A/D	

EXÁMENES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS		
INSPECCIÓN VISUAL	Calificado X	Decalificado
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	Calificado	Decalificado X

CALIFICADO	DESCALIFICADO	X
------------	---------------	---

ENSAYOS DESTRUCTIVOS

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO

DOBLADOS LATERAL			
Muestra No.	Identificación	Observaciones	Aprobado
2	P2.1	Indicación de 11.1 mm	NO
	P2.2	Indicación de 4.6 mm	NO
	P2.3	Indicación de 7.4 mm	NO
	P2.4	Indicación de 8.7 mm	NO



ENSAYOS DE DOBLADO.	Calificado	Decalificado	X
---------------------	------------	--------------	---

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

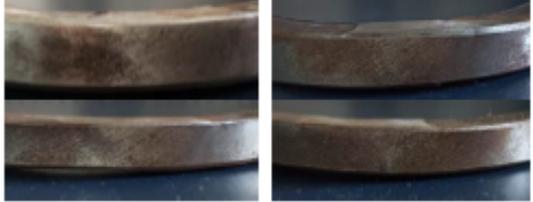
Muestra No.	Identificación	Carga máxima registrada (lbf)	Resistencia a la tracción (ksi)	Obs.	Aprobado
2	P2.1	44 200	118,1	FMB	SI
	P2.2	43 731	118,8	FMB	SI

ENSAYOS DE TRACCIÓN.	Calificado	X	Decalificado
----------------------	------------	---	--------------

Límites de calificación: No deben existir discontinuidades abiertas en la soldadura o en la zona afectada por el calor mayores a 1/8 in. (3 mm)
 Las probetas analizadas satisfacen los requerimientos de ASME Sección IX Ed. 2019 para la aceptación de los ensayos de doblado, basado en los criterios indicados en QW-160, QW-161, QW-162, QW-163
 Satisfacen los requerimientos para la aceptación de los ensayos de tracción, basado en los criterios indicados en QW-153

Nosotros certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications" para calificación de soldadores.

Realizado por: David Vaca	Aprobado por: Ing. Gabriel Velastegui
Firma:	Firma:
Fecha: 17/3/2020	Fecha: 17/3/2020

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)					
Nombre Compañía: Escuela Politécnica Nacional			Fecha de realización: 17/03/2020		
PQR No. EPN-J003			Fecha de expiración: 17/03/2021		
Según norma: ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications"			Inspector: Ing. Gabriel Velastegui		
WPS SOPORTE No. EPN.003-DV					
Nombre del Soldador: Jorge Guzmán		CI #: 1720117223		Codigo No. SW-31	
Proceso de soldadura:		MANUAL		SEMIAUTOMÁTICO	
SMAW		X		FCAW	
				GMAW	
				SAW	
Tipo y grado del metal base: AISI 4140 80 ksi		Espesor: 13 mm (1/2 in.)		Tipo de soldadura: RANURA	
Metal de aporte: Denominación AWS: E 7010 / E11018		Diámetro: 3.2 mm			
Pre calentamiento: 220°C		Temperatura entre pases: 240°C			
Tipo de máquina de soldar: Inverter		Potencia de la máquina de soldar: 2.4 KVA			
PARÁMETRO DE SOLDADURA					
Pases No. 5		Proceso: SMAW			
Tipo de electrodo (AWS): E 7010 / E11018		Especificación (SFA) No. 5.5			
Diámetro (mm): 3.2		Voltaje: 29 V			
Dirección: D ↓ A ↑		Tipo de corriente y polaridad: 110 DC+			
Oscilado A/D					
EXÁMENES					
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS					
INSPECCIÓN VISUAL		Calificado X		Decalificado	
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL		Calificado X		Decalificado	
CALIFICADO SI			DESCALIFICADO		
ENSAYOS DESTRUCTIVOS					
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO					
DOBLADOS LATERAL					
Muestra No.	Identificación	Observaciones	Aprobado		
3	P3.1	Indicación de 0.88 mm	SI		
	P3.2	Ausencia de indicaciones	SI		
	P3.3	Ausencia de indicaciones	SI		
	P3.4	Ausencia de indicaciones	SI		
ENSAYOS DE DOBLADO.			Calificado X	Decalificado	
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN					
Muestra No.	Identificación	Carga máxima registrada (lbf)	Resistencia a la tracción (ksi)	Obs.	Aprobado
3	P3.1	41 127	108	FJS	SI
	P3.2	41 002	111,3	FMB	SI
ENSAYOS DE TRACCIÓN.			Calificado X	Decalificado	
Límites de calificación:		No deben existir discontinuidades abiertas en la soldadura o en la zona afectada por el calor mayores a 1/8 in. (3 mm) Las probetas analizadas satisfacen los requerimientos de ASME Sección IX Ed. 2019 para la aceptación de los ensayos de doblado, basado en los criterios indicados en QW-160, QW-161, QW-162, QW-163 Satisfacen los requerimientos para la aceptación de los ensayos de tracción, basado en los criterios indicados en QW-153			
Nosotros certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications" para calificación de soldadores.					
Realizado por: David Vaca			Aprobado por: Ing. Gabriel Velastegui		
Firma:			Firma:		
Fecha: 17/3/2020			Fecha: 17/3/2020		

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

Nombre Compañía: Escuela Politécnica Nacional	Fecha de realización: 17/03/2020
PRQ No. EPN-J004	Fecha de expiración: 17/03/2021
Según norma: ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications"	Inspector: Ing. Gabriel Velastegui
WPS SOPORTE No. EPN.004-DV	

Nombre del Soldador: Jorge Guzmán	CI# 1720117223	Código No. 8W-31
Proceso de soldadura:	MANUAL	SEMIAUTOMÁTICO
	SMAW X	FOAW
		GMAW
		SAW
Tipo y grado del metal base:	AISI 4140 80 ksi / AISI 4145 120 ksi	Espeor: 13 mm (1/2 in.)
Metal de aporte:	Denominación AWS: E 6010 / E11018	Diámetro: 3.2 mm
Pre calentamiento:	220°C	Temperatura entre pases: 240°C
Tipo de máquina de soldar:	Inverter	Potencia de la máquina de soldar: 2.4 KVA

PARÁMETRO DE SOLDADURA

Pases No. 5	Proceso: SMAW
Tipo de electrodo (AWS): E 6010 / E11018	Especificación (SFA) No. 5.5
Diámetro (mm): 3.2	Voltaje: 26 V
Dirección: D ↓ A ↑	Tipo de corriente y polaridad: 110 DC+

EXÁMENES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

INSPECCIÓN VISUAL	Calificado X	Descalificado
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	Calificado	Descalificado X

CALIFICADO

DESCALIFICADO

X

ENSAYOS DESTRUCTIVOS

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO

DOBLADOS LATERAL			
Muestra No.	Identificación	Observaciones	Aprobado
4	P4.1	Inducción de 8.0 mm	NO
	P4.2	Inducción de 11.1 mm	NO
	P4.3	Inducción de 9.48 mm	NO
	P4.4	Inducción de 8.44 mm	NO



ENSAYOS DE DOBLADO.	Calificado	Descalificado X
---------------------	------------	-----------------

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

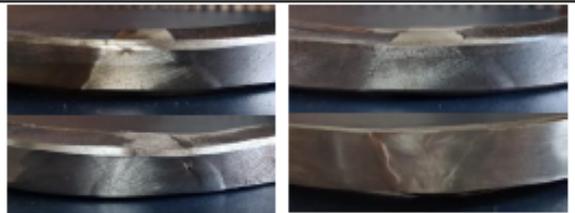
Muestra No.	Identificación	Carga máxima registrada (libf)	Resistencia a la tracción (ksi)	Obs.	Aprobado
4	P4.1	44 128	118,3	FMB	SI
	P4.2	42 269	118,7	FJS	SI

ENSAYOS DE TRACCIÓN.	Calificado X	Descalificado
----------------------	--------------	---------------

<p>Límites de calificación:</p> <p>No deben existir discontinuidades abiertas en la soldadura o en la zona afectada por el calor mayores a 1/8 in. (3 mm)</p> <p>Las probetas analizadas satisfacen los requerimiento de ASME Sección IX Ed. 2019 para la aceptación de los ensayos de doblado, basado en los criterios indicados en QW-150, QW-151, QW-152, QW-153</p> <p>Satisfacen los requerimientos para la aceptación de los ensayos de tracción, basado en los criterios indicados en QW-153</p>
--

Nosotros certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications" para calificación de soldadores.

Realizado por: David Vaas	Aprobado por: Ing. Gabriel Velastegui
Firma:	Firma:
Fecha: 17/3/2020	Fecha: 17/3/2020

REGISTRO DE CALIFICACION DEL PROCEDIMIENTO (PQR)					
Nombre Compañía: Escuela Politécnica Nacional			Fecha de realización: 17/03/2020		
PRQ No. EPN-J005			Fecha de expiración: 17/03/2021		
Según norma: ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications"			Inspector: Ing. Gabriel Velastegui		
WPS SOPORTE No. EPN.005-DV					
Nombre del Soldador: Jorge Guzmán		CI#: 1720117223		Codigo No. SW-81	
Proceso de soldadura:					
MANUAL		SEMIAUTOMATICO		AUTOMATICO	
SMAW X		FCAW		SAW	
Tipo y grado del metal base: AISI 4140 110 ksi / AISI 4145 120 ksi		Espesor: 13 mm (1/2 in.)		Tipo de soldadura: RANURA	
Metal de aporte: Denominación AWS: E11018		Diámetro: 3.2 mm			
Pre calentamiento: 220°C			Temperatura entre pases: 240°C		
Tipo de máquina de soldar: Inverter		Potencia de la máquina de soldar: 2.4 KVA			
PARÁMETRO DE SOLDADURA					
Pases No. 5		Proceso: SMAW			
Tipo de electrodo (AWS): E11018		Especificación (SFA) No. 5.5			
Diámetro (mm): 3.2		Voltaje: 22 V			
Dirección: D ↓ A ↑		Tipo de corriente y polaridad: 110 DC+			
Oscilado A/D					
EXÁMENES					
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS					
INSPECCIÓN VISUAL		Calificado X		Descalificado	
RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL		Calificado X		Descalificado	
CALIFICADO SI		DESCALIFICADO			
ENSAYOS DESTRUCTIVOS					
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO					
DOBLADOS LATERAL					
Muestra No.	Identificación	Observaciones	Aprobado		
6	PS.1	Inducción de 1.68 mm	SI		
	PS.2	Ausencia de inducciones	SI		
	PS.3	Inducción de 1.78 mm	SI		
	PS.4	Ausencia de inducciones	SI		
ENSAYOS DE DOBLADO.			Calificado X	Descalificado	
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN					
Muestra No.	Identificación	Carga máxima registrada (lbf)	Resistencia a la tracción (ksi)	Obs.	Aprobado
6	PS.1	42 867	118,4	FMB	NO
	PS.2	43 289	113,2	FMB	NO
ENSAYOS DE TRACCIÓN.			Calificado	Descalificado X	
Límites de calificación: No deben existir discontinuidades abiertas en la soldadura o en la zona afectada por el calor mayores a 1/8 in. (3 mm) Las probetas analizadas satisfacen los requerimiento de ASME Sección IX Ed. 2019 para la aceptación de los ensayos de doblado, basado en los criterios indicados en QW-160, QW-161, QW-162, QW-163 Satisfacen los requerimientos para la aceptación de los ensayos de tracción, basado en los criterios indicados en QW-153					
Nosotro certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma ASME Sección IX-2019 "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications" para calificación de soldadores.					
Realizado por: David Vaca			Aprobado por: Ing. Gabriel Velastegui		
Firma:			Firma:		
Fecha: 17/3/2020			Fecha: 17/3/2020		