

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE
SOLDADURA DE LA UNIÓN DISÍMIL ENTRE
ACEROS API 5L X70 PSL1 Y ASTM A707 L5 F65**

Tesis a fin de optar el título de ingeniero mecánico, que presenta el bachiller:

RENZO ANDRÉ LUNA TEJADA

ASESOR: Ing. Aníbal Rozas Gallegos

Lima, junio de 2015

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la especificación de procedimiento de soldadura para la unión disímil entre una brida y una tubería de materiales API 5L X70 PSL1 y ASTM A707 L5 F65 (no homologado por ASME) respectivamente, ambas de 24 pulgadas de diámetro y 21.5 milímetros de espesor. Los procesos de soldadura empleados fueron GTAW y SMAW, el primero para el pase de raíz y el segundo para los pases de relleno. El objetivo general de la tesis es el de calificar el procedimiento de soldadura para la unión entre la brida y la tubería antes mencionadas, con la finalidad de asegurar su implementación en el sistema de transporte de gas natural por ductos.

La caracterización de los materiales base se realizó a través de ensayos de análisis químico y de tracción. El análisis químico reveló que el acero ASTM A707 L5 F65 presenta variaciones con respecto a la composición química nominal del acero ASTM A707 L5 C14, particularmente, en los porcentajes en peso de manganeso y molibdeno.

Asimismo, se realizaron ensayos de calificación del procedimiento de soldadura. Del cupón soldado se extrajeron dos probetas para ensayos de tracción, cuatro probetas para ensayos de doblez lateral y nueve probetas para ensayos de impacto. En los ensayos de tracción la fractura se presentó en el material base y los esfuerzos máximos obtenidos fueron ligeramente mayores al esfuerzo de tracción de la junta soldada, los ensayos de doblado no revelaron defectos relevantes y en los ensayos de impacto los valores de energía absorbida por el material fueron mayores al mínimo establecido por la especificación técnica API 5L. Por otro lado, se realizaron ensayos de inspección visual y de macrografía, los cuales no revelaron discontinuidades en el cordón que afectaran la calidad del mismo.

Sobre la base de los resultados obtenidos se concluyó que, según lo estipulado en el código ASME sección IX, el procedimiento de soldadura propuesto se encuentra calificado y, por consiguiente, la ejecución del cordón de soldadura entre la brida y la tubería mencionadas debe realizarse en función de dicho procedimiento.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DE LA
UNIÓN DISÍMIL ENTRE ACEROS API 5L X70 PSL1 Y ASTM A707 L5
F65

ÁREA : Materiales # 110

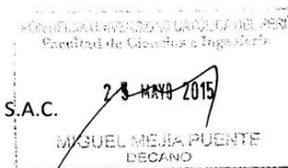
PROPUESTO POR : Compañía Operadora de Gas del Amazonas S.A.C.

ASESOR : Ing. Anibal Rozas Gallegos

TESISTA : Renzo André Luna Tejada

CÓDIGO : 20095802

FECHA : 11 de diciembre de 2014



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Actualmente, en Perú se vienen realizando ampliaciones al sistema de transporte de gas natural por ductos, situación que lleva a comprar materiales con ciertos requerimientos. El caso que motivó la tesis fue el de una brida de material ASTM A707 L5 Cl4. El proveedor de este suministro, debido a la poca comercialización en el mercado de este componente, se comprometió a entregar una brida de similares características, ofreciendo una brida de material ASTM A707 L5 F65 (material no homologado por ASME). En consecuencia, debido al compromiso con el Estado Peruano de proseguir con las ampliaciones, se requiere realizar una evaluación del procedimiento de soldadura de esta brida con la tubería principal de material API 5L X70 PSL1 con la finalidad de asegurar la integridad del sistema de transporte de gas.

El objetivo general de este trabajo de tesis es:

Calificar el procedimiento de soldadura entre la brida ASTM A707 L5 F65 con una tubería API 5L X70 PSL1 para asegurar su implementación en el sistema de transporte de gas natural por ductos.




FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DE LA
UNIÓN DISÍMIL ENTRE LOS ACEROS API 5L X70 PSL1 Y ASTM
A707 L5 F65

Introducción

1. ESTADO DEL ARTE
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Observaciones y Recomendaciones (opcional)

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Ing. Aníbal Rozas Gallegos
Asesor



DEDICATORIA

*A mi madre Susana, abuelita Julia y abuelito César,
que son mi motivación de todos los días y cuyo sacrificio
permite que me gradúe de tan prestigiosa universidad.*

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Aníbal Rozas Gallegos, profesor de la especialidad de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por la asesoría brindada y el apoyo para culminar esta tesis satisfactoriamente.

A mi familia por darme el soporte emocional durante todos estos meses de trabajo.

A la Compañía Operadora de Gas del Amazonas S.A.C. por darme la oportunidad de desarrollar el presente tema de tesis.

A mis compañeros de trabajo por absolver las dudas que tuve durante el desarrollo de mi tesis.

Al área de Calidad y Cumplimiento Regulatorio de COGA por propiciar el espacio, el tiempo y los recursos para desarrollar este trabajo de tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1. Los aceros	4
1.1.1. Clasificación de los aceros.....	5
1.1.2. Soldabilidad de los aceros de alta resistencia y baja aleación	9
1.1.3. Electrodo para soldar aceros al carbono y de baja aleación	13
1.2. Procesos de soldadura.....	18
1.2.1. Proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding).....	18
1.2.2. Proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	21
1.3. Metales Disimilares	23
1.3.1. Consideraciones de Soldadura.....	23
1.3.2. Consideraciones de Servicio	29
1.3.3. Selección de Material de Aporte.....	30
1.3.4. Selección del proceso de soldadura	30
1.4. Calificación de procedimiento de soldadura.....	31
1.4.1 Especificación de procedimiento de soldadura (WPS).....	33
1.4.2. Registro de Calificación de procedimiento (PQR)	36
CAPÍTULO 2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	38
2.1. Características nominales de los materiales base	38
2.1.1. ASTM A707 L5 C14	38
2.1.2. API 5L X70 PSL1	39
2.2. Equipamiento de Soldadura	40
2.3. Elaboración de la especificación de procedimiento de soldadura (WPS)	41
2.3.1. General.....	41
2.3.2. Juntas	42
2.3.3. Metal base	43
2.3.5. Posición.....	49
2.3.6. Tratamiento térmico post-soldadura	50

2.3.7. Pre calentamiento.....	50
2.3.8. Gas de protección.....	51
2.3.9. Características eléctricas	52
2.3.10. Técnica.....	52
2.4. Ejecución del cordón de soldadura	52
2.5. Elaboración de registro de calificación de procedimiento (PQR)	56
2.5.1. Ensayos destructivos aplicados a la junta soldada.....	56
2.5.2 Otros ensayos	60
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
3.1. Especificación de procedimiento de soldadura (WPS).....	61
3.2. Registro de calificación de procedimiento (PQR)	64
3.2.1. Ensayos destructivos aplicados a la junta soldada.....	68
3.2.2. Otros ensayos	72
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción	Unidad
A No	Número A	---
CE	Carbono Equivalente	---
D_A	Dilución en metal base A	---
D_B	Dilución en metal base B	---
D_T	Dilución total	---
E	Módulo de elasticidad	MPa
F No	Número F	---
Group No.	Número de Grupo	---
P No.	Número P	---
ΔT	Variación de temperatura	$^{\circ}\text{C}$
X_A	Porcentaje de X en el metal base A	---
X_B	Porcentaje de X en el metal base B	---
X_F	Porcentaje de X en el metal de aporte F	---
X_W	Porcentaje de X en el metal de soldadura	---
α	Coefficiente de expansión térmica lineal	$(^{\circ}\text{C})^{-1}$
ε	Deformación unitaria	---
σ_H	Esfuerzo en la zona afectada por el calor	MPa
σ_f	Esfuerzo de fluencia	MPa
$\sigma_{\text{máx}}$	Esfuerzo de tracción	MPa

INTRODUCCIÓN

Es curioso observar como la ciencia y tecnología sorprenden cada vez más a las personas. Hoy en día, es común hablar de viajes espaciales; asimismo, la comunicación a larga distancia se ha vuelto algo cotidiano. No obstante, todos estos avances y descubrimientos se remontan a varios años de historia, donde hombres fueron investigando su entorno y aplicaron sus conocimientos con el fin de que les fuese más fácil sobrevivir.

Uno de los campos estudiados por el ser humano es la soldadura. La soldadura es un proceso de fabricación en el cual se realiza la unión de dos piezas de uno o distintos materiales, usualmente logrado a través de la fusión, agregando un material de aporte que al fundirse forma un charco de material fundido entre las piezas a soldar y, al enfriarse, se convierte en la unión fija a la que se le denomina cordón. La soldadura puede ser hecha en diversos ambientes, como el aire libre, debajo del agua o en el espacio.

Hasta finales del siglo XIX, el único proceso de soldadura empleado era la soldadura de fragua, en el cual un herrero juntaba los metales calentándolos y luego golpeándolos. La soldadura por arco eléctrico y la soldadura a gas fueron los primeros procesos en desarrollarse hacia el final de ese siglo. La soldadura avanzó rápidamente durante el principio del siglo XX mientras que la Primera y Segunda Guerra Mundial condujeron la demanda de métodos de soldadura confiables y baratos. Después de las guerras, varias técnicas modernas de soldadura fueron desarrolladas incluyendo técnicas manuales como la soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW), así como procesos semiautomáticos y automáticos tales como la soldadura por arco metálico con gas (GMAW), soldadura de arco sumergido (SAW) y la soldadura de arco con núcleo de fundente (FCAW). Hoy en día, la ciencia continúa avanzando, la soldadura robotizada está llegando a ser más corriente en las instalaciones industriales, y los investigadores continúan desarrollando nuevos métodos con la finalidad de obtener mejor calidad y mejores propiedades en la unión soldada.

Por otro lado, otro campo estudiado es el de los recursos energéticos. Hoy en día, el gas natural es una de las principales fuentes de energía por lo cual representa un gran porcentaje de la matriz energética mundial. El gas natural es un combustible gaseoso cuyo componente principal es el metano (CH_4). Se denomina “natural” porque en su constitución química no interviene ningún proceso.

Este gas puede ayudar a evitar muchas de las preocupaciones a nivel ambiental incluyendo la contaminación, la lluvia ácida y las emisiones de gas de efecto invernadero. Su composición química hace que sea un combustible inherentemente limpio y eficiente, ya que su combustión prácticamente no tiene emisiones atmosféricas de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos reactivos y óxidos de nitrógeno que la combustión de otros combustibles fósiles sí tiene. Asimismo, proporciona la seguridad que las familias o los establecimientos comerciales buscan. No es tóxico ni corrosivo, y se disipa rápidamente a la atmósfera cuando hay alguna fuga, de esta forma se minimizan los riesgos en su uso.

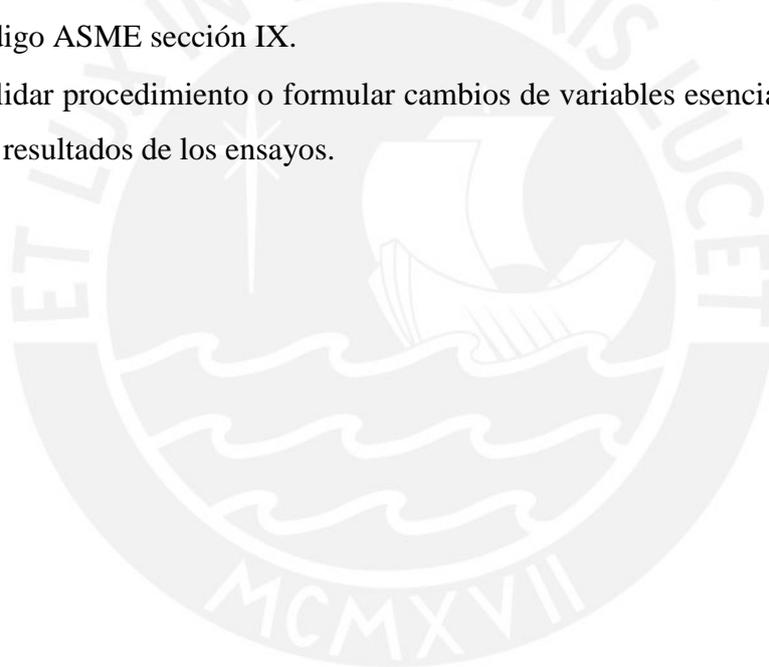
Actualmente, en Perú se vienen realizando ampliaciones al sistema de transporte de gas natural por ductos, situación que lleva a comprar materiales con ciertos requerimientos. El caso que motivó la tesis fue el de una brida de material ASTM A707 L5 C14. El proveedor de este suministro, debido a la poca comercialización en el mercado de este componente, se comprometió a entregar una brida de similares características, ofreciendo una brida de material ASTM A707 L5 F65 (material no homologado por ASME). En consecuencia, debido al compromiso con el Estado Peruano de proseguir con las ampliaciones, se requiere realizar un estudio de la soldabilidad de esta brida con la tubería principal de material API 5L X70 PSL1 con la finalidad de asegurar la integridad del sistema de transporte de gas.

El objetivo general de este trabajo de tesis es:

- Calificar el procedimiento de soldadura para la unión entre una brida ASTM A707 L5 F65 y una tubería API 5L X70 PSL1 con la finalidad de asegurar su implementación en el sistema de transporte de gas natural por ductos.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Conocer las implicancias de realizar una unión disímil entre aceros al carbono de baja aleación.
- Caracterizar los materiales base que formarán parte de la junta disímil y verificar la concordancia de los datos obtenidos con la especificación del material correspondiente.
- Proponer una Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) acorde a lo estipulado en el código ASME sección IX.
- Ejecutar ensayos de calificación a las probetas soldadas según lo estipulado en el código ASME sección IX.
- Validar procedimiento o formular cambios de variables esenciales en función de los resultados de los ensayos.



CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

1.1. Los aceros

Los aceros son aleaciones hierro-carbono con concentraciones notables de otros elementos de aleación. Existen gran variedad de aceros que poseen distintas composiciones y/o tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas dependen del contenido de carbono (Figura 1.1), el cual suele ser inferior al 1%. La soldabilidad de los aceros depende en alto grado del porcentaje de carbono que contengan. A mayor cantidad de carbono presente en la aleación se dificulta la soldadura, y a menor carbono aumenta la soldabilidad del material.

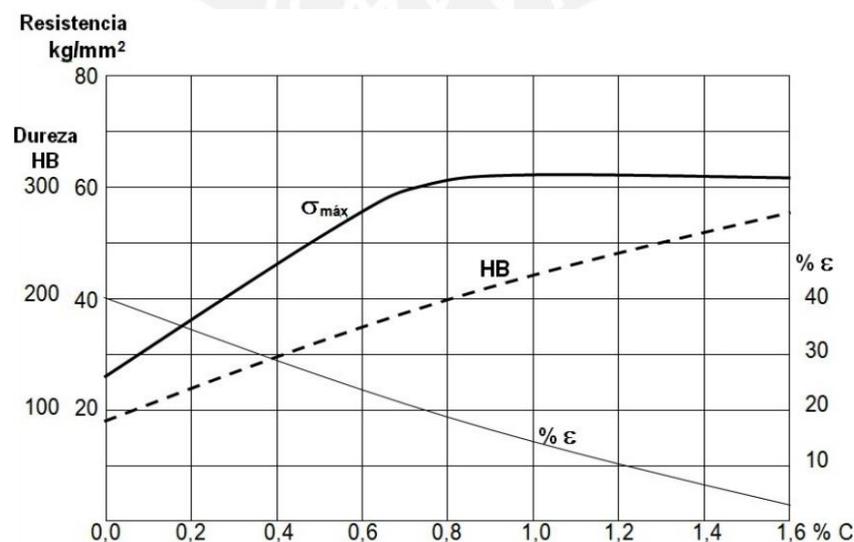


Fig. 1.1 Variación de las propiedades mecánicas según el contenido de carbono (Lean 2008:11)

Los aceros comúnmente son clasificados según su contenido de carbono: bajo, medio y alto carbono. Además, cada grupo posee subclases de acuerdo a la concentración de otros elementos de aleación. Mientras los aceros al carbono solo contienen concentraciones residuales de impurezas distintas al carbono, en los aceros aleados, los elementos de aleación se añaden intencionalmente en concentraciones específicas. En la figura 1.2 se da una clasificación de los aceros.

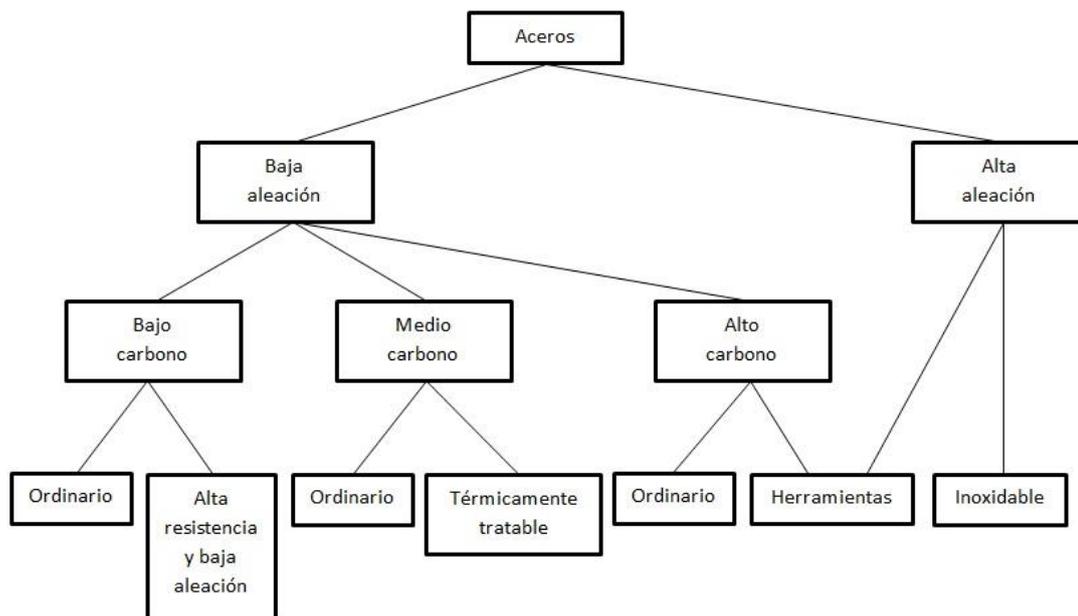


Fig. 1.2 Clasificación de los aceros (Callister 1995:365)

1.1.1. Clasificación de los aceros

1.1.1.1. Aceros al carbono

Son denominados simplemente aceros al carbono, cuando no se especifican ni se garantizan otros elementos aleantes que pudieran contener. Estos aceros obtienen sus propiedades específicamente de su contenido de carbono.

a) Aceros de bajo carbono

La mayor parte de todo el acero fabricado es de bajo carbono. Este tipo de acero contiene menos del 0.3% de carbono, no responde al tratamiento térmico para formar martensita y es endurecible por acritud. Su microestructura consiste en ferrita y perlita.

Como consecuencia estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes; sin embargo, poseen extraordinaria ductilidad y tenacidad. Además, son fácilmente mecanizables, soldables y baratos. Estos aceros suelen tener un límite elástico de alrededor de 275 MPa, una resistencia a la tracción comprendida entre 415 y 550 MPa y una elongación del 25%. Las tablas 1.1 y 1.2 indican las composiciones y las propiedades mecánicas de varios aceros de bajo carbono.

Tabla 1.1 Composiciones de aceros de bajo carbono y de aceros de baja aleación (Callister 1995:365)

Designación	Composición (% en peso)		
AISI/SAE o número ASTM	C	Mn	Otros
Aceros bajos en carbono			
1010	0.1	0.45	
1020	0.2	0.45	
A36	0.29	1	9.2 Cu (mín)
A516 Grado 70	0.31	1	0.25 Si
Aceros de baja aleación y alta resistencia			
A440	0.28	1.35	0.3 Si (máx), 0.2 C (mín)
A633 Grado E	0.22	1.35	0.3 Si, 0.08 V, 0.2 N, 0.03 Nb
A656 Grado 1	0.18	1.6	0.6 Si, 0.1 V, 0.2 Al, 0.015 N

Tabla 1.2 Características mecánicas de aceros de bajo carbono y de aceros de baja aleación (Callister 1995:366)

AISI/SAE o número ASTM	Resistencia a la tracción [psi x 10 ³ (Mpa)]	Límite elástico [psi x 10 ³ (Mpa)]	Ductilidad (% Elongación)
Aceros bajos en carbono			
1010	47(325)	26(180)	28
1020	55(380)	30(205)	25
A36	58(400)	32(220)	23
A516 Grado 70	70(485)	38(260)	21
Aceros de baja aleación y alta resistencia			
A440	63(435)	42(290)	21
A633 Grado E	75(520)	55(380)	23
A656 Grado 1	95(655)	80(552)	15

b) Aceros de medio carbono

Los aceros de medio carbono tienen porcentajes de carbono comprendidos entre 0.3% y 0.55%. Pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido para mejorar sus propiedades mecánicas. Se suelen usar en la condición de revenidos, con microestructura de martensita revenida. Son de baja templabilidad, solo tratables en velocidades de temple muy rápidas. Las adiciones de cromo, níquel y molibdeno mejoran la capacidad de estas aleaciones para ser tratados térmicamente, generando así un buen número de combinaciones resistencia-ductilidad. Tratados térmicamente son más resistentes que los aceros de bajo carbono, pero menos dúctiles y tenaces. Se usan para fabricar componentes que necesitan alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad.

c) Aceros de alto carbono

Los aceros de alto carbono contienen un porcentaje de carbono mayor a 0.55% y son más duros, resistentes y aún menos dúctiles que los otros aceros al carbono. Se suelen utilizar en la condición templada y revenida, en la cual son especialmente resistentes al desgaste.

d) Aceros de herramientas

Son aceros que poseen entre el 0.9% y el 1.5% de carbono; generalmente ya contienen otros elementos de aleación, que les proporcionan o mejoran sus propiedades. Poseen elementos de aleación como el cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno que se combinan con el carbono para formar carburos muy duros y resistentes al desgaste. Estos aceros se usan como herramientas de corte y matrices, así como cuchillos, navajas, hojas de sierra de alta resistencia.

1.1.1.2. Aceros aleados

Con este nombre genérico son conocidos todos los aceros que, además de contener un determinado porcentaje de carbono, silicio, manganeso, azufre, fósforo, hierro, tienen otros elementos que hacen que el acero adquiera propiedades y características que comúnmente no poseen los aceros ordinarios al carbono.

a) Aceros de alta resistencia y baja aleación

Conocidos también como aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Contienen elementos de aleación como cobre, vanadio, níquel y molibdeno en concentraciones combinadas menores al 10% y poseen mayor resistencia mecánica que los aceros de bajo carbono ordinarios. Son susceptibles a aumento de resistencia por tratamiento térmico; además son dúctiles y mecanizables. Expuestos a la atmósfera, los aceros HSLA son más resistentes a la corrosión que los aceros al carbono ordinarios, a los que suelen reemplazar en aplicaciones donde la resistencia mecánica es crítica, como es el caso de los recipientes a presión o las tuberías para transporte de hidrocarburos.

Su límite elástico se encuentra entre los 300 - 760 MPa y su resistencia a la tracción está en el rango de 420 - 830 MPa. La mayoría de estos aceros se emplea en estado de suministro (estado de laminación en caliente o normalizado). La mayor resistencia de este tipo de aceros se debe a una combinación de mecanismos de refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento sub-estructural (a través de los sublímites de grano de la ferrita). Debido a esto, estos aceros no requieren altos contenidos de carbono para alcanzar una mayor resistencia mecánica, por lo que su soldabilidad se ve favorecida.

La tabla 1.3 muestra los tramos de composición para aceros al carbono y aceros de baja aleación.

Tabla 1.3 Tramos de composición para aceros al carbono y aceros de baja aleación
(Callister 1995:367)

Designación AISI/SAE	Tramos de composición (% en peso de elementos aleantes distintos del C)			
	Ni	Cr	Mo	Otros
10xx, al carbono				0.08-0.33S
11xx, fácil mecanizado				0.1-0.33S
12xx, fácil mecanizado				0.04-0.12P
13xx				1.6-1.9Mn
40xx			0.2-0.3	
41xx		0.8-1.1	0.15-0.25	
43xx	1.65-2	0.4-0.9	0.2-0.3	
46xx	0.7-2		0.15-0.3	
48xx	3.25-3.75		0.2-0.3	

Continuación de Tabla 1.3

Designación AISI/SAE	Tramos de composición (% en peso de elementos aleantes distintos del C)			
	Ni	Cr	Mo	Otros
51xx		0.7-1.1		
61xx		0.5-1.1		0.1-0.15V
86xx	0.4-0.7	0.4-0.6	0.15-0.25	
92xx				1.8-2.2Si

b) Aceros de alta aleación

Son aceros cuya suma total de elementos de aleación sobrepasa el 10%, llegando en algunos casos hasta porcentajes superiores al 40%; tal es el caso de los aceros inoxidables.

1.1.2. Soldabilidad de los aceros de alta resistencia y baja aleación

La soldabilidad de los HSLA requiere los mismos cuidados que la de los aceros al carbono. Por ello, es necesario el precalentamiento de la unión soldada cuando se exceden ciertas condiciones como el carbono equivalente, el nivel de hidrógeno difundible o si se desean unir piezas de espesor grueso.

Una forma de determinar la temperatura de precalentamiento de los aceros HSLA es a través del empleo del método del control de hidrógeno.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación pueden ser soldados empleando todos los procesos de soldadura convencionales (SMAW, GMAW, GTAW, SAW, etc.). La selección del proceso de soldadura adecuado debe ser realizada teniendo en cuenta las consideraciones de resistencia mecánica y tenacidad del cordón de soldadura y el riesgo de la fisuración en frío de la ZAC (zona afectada por el calor).

1.1.2.1. Carbono equivalente

Durante la soldadura es preferible evitar cualquier posibilidad de temple accidental debido a las altas temperaturas involucradas; es decir, no se debe permitir que durante el ciclo térmico de la soldadura alguna parte del acero se transforme en martensita.

Asimismo, se sabe que la templabilidad de un acero es una propiedad que es inversa a la buena soldabilidad de un material. Por lo tanto, se concluye que un acero de buena templabilidad es un acero difícilmente soldable.

Como el carbono es el elemento que más afecta la templabilidad y la dureza de un acero, se ha considerado denominar carbono equivalente (CE) al índice que permite relacionar la composición química de un acero con su tendencia a presentar estructuras frágiles cuando éste es sometido a un proceso de soldadura.

El cálculo del carbono equivalente es una forma de describir la composición química por medio de un solo número, con la finalidad de analizar cómo las variaciones de la misma afectan el comportamiento del material. Además, el carbono equivalente de un acero es una medida de su tendencia potencial a fisurarse durante o después de la soldadura.

Asimismo, el carbono equivalente brinda información sobre diversos aspectos como son:

- La templabilidad.
- La sensibilidad a la fisuración en frío (con la finalidad de estimar la temperatura mínima de precalentamiento).
- La evaluación de las propiedades durante el servicio.

No obstante, no se puede esperar que todas las características de un acero o de una unión soldada puedan describirse de manera fiable mediante un único número que depende solamente de la composición química. El uso de cualquier fórmula para el cálculo del carbono equivalente solo debe limitarse a su objetivo los cuales han sido listados líneas arriba.

Existen diversas expresiones para calcular el carbono equivalente. La fórmula 1.1 es la expresión que propone el International Institute of Welding (Fosca 2007:130):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1.1)$$

No existen restricciones para el uso de esta fórmula; no obstante, se recomienda aplicarla en aquellos casos en que el porcentaje de carbono en el acero sea mayor al 0.12% (API 2013:27).

Si el porcentaje de carbono es igual o menor a 0.12%, se recomienda emplear la ecuación 1.2 (API 2013:27):

$$CE = C + \frac{SI}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1.2)$$

El criterio empleado con el carbón equivalente es que cuanto más alto sea su valor el acero tendrá mayor dificultad para ser soldado. Para evitar riesgos de fisuración en frío por presencia de estructuras frágiles en el cordón, es recomendable que el carbono equivalente no supere el rango 0.35 - 0.40 (Fosca 2007:132).

Debido a esto, se hace una clasificación genérica de la soldabilidad de los aceros en función de su CE:

- Aceros con un $CE < 0.2 - 0.4\%$ poseen buena soldabilidad
- Aceros con un $CE > 0.4\%$ tienen riesgo de fisuración en frío en la ZAC (Fosca 2007:132)

1.1.2.2. Tratamientos térmicos antes de la soldadura

El precalentamiento es el aumento local de temperatura en el metal base, a ambos lados de la unión, a un valor sobre la temperatura ambiente. La necesidad de precalentamiento se determina usualmente por el código de fabricación pertinente y se verifica por el procedimiento de calificación de soldadura. El precalentamiento se utiliza como ayuda a la soldadura por una de las cuatro razones que se describen a continuación:

- Para disminuir la velocidad de enfriamiento y reducir la dureza en la ZAC. Los aceros de alto contenido de carbono y los de baja aleación, se endurecen si son templados desde una alta temperatura (sobre 850° C). El mismo proceso puede ocurrir en una unión soldada en la cara de fusión del metal base. Al aumentar la

temperatura del metal base a soldar, se reduce el diferencial de temperatura entre la pileta líquida y el metal que la rodea, el endurecimiento se reduce al enfriarse la soldadura. Al reducir la dureza se reduce el riesgo de que se produzcan grietas.

- Para controlar la velocidad de difusión del hidrógeno en una unión soldada. El arco de soldadura descompone el agua, presente como humedad, en sus elementos básicos que son hidrógeno y oxígeno. Ambos gases son fácilmente absorbidos en el metal de soldadura a altas temperaturas y pueden quedar atrapados durante el enfriamiento. A altas temperaturas el hidrógeno puede jugar un rol importante en las grietas de la ZAC y del metal de soldadura. El precalentamiento con sus efectos benéficos en la velocidad de enfriamiento, ayuda a promover la difusión de hidrógeno fuera de la estructura del acero. El precalentamiento también ayuda a que la zona de soldadura permanezca seca.
- Para reducir los esfuerzos térmicos. Los esfuerzos térmicos se producen cuando la pileta líquida se enfría. Una soldadura puede agrietarse si el metal base se opone a la contracción del metal de soldadura, cuando éste se enfría, y si el área de sección transversal de la unión es insuficiente para resistir el esfuerzo de tracción resultante. El precalentamiento puede controlar el nivel de esfuerzo, reduciendo los gradientes de temperatura y reduciendo la velocidad de enfriamiento.
- Compensación por pérdidas de calor. Las secciones más delgadas de un acero con alta conductividad térmica pueden necesitar precalentamiento durante la soldadura para asegurar la fusión.

1.1.2.3. Tratamientos térmicos post-soldadura

Los tratamientos térmicos post-soldadura son ciclos térmicos controlados que se aplican después de ejecutada la soldadura. Los objetivos principales de estos tratamientos son los siguientes:

- Aliviar las tensiones residuales que son consecuencia de los calentamientos y enfriamientos rápidos que ocurren por la soldadura.

- Reducir la fragilidad de la unión soldada, originada por la formación de estructuras martensíticas en la ZAC. En estas condiciones, el tratamiento térmico post-soldadura actúa más o menos como un revenido reduciendo la dureza del acero.
- Mejora la tenacidad de la unión soldada, elevando la temperatura de transición dúctil – frágil para aceros al carbono o aceros Cr-Mo.
- Eliminar o reducir el contenido de hidrógeno difundido en la unión soldada durante el proceso de soldadura para reducir el riesgo de fragilización por hidrógeno.

El tratamiento térmico post-soldadura es una secuencia de calentamientos y enfriamientos muy controlados y, como tal, cada uno de sus parámetros debe ser cuidadosamente establecido. Los parámetros que definen cualquier tratamiento térmico son:

- Calentamiento (velocidad de calentamiento, calentamientos escalonados)
- Temperatura de tratamiento
- Tiempo de permanencia a la temperatura de tratamiento
- Etapa de enfriamiento (velocidad de enfriamiento, enfriamientos escalonados)

Los códigos internacionales existentes establecen recomendaciones acerca de las condiciones bajo las cuales se deben ejecutar los tratamientos térmicos post-soldadura. Las condiciones dependerán del espesor de la pieza a soldar y de los tipos de acero involucrados.

1.1.3. Electrodo para soldar aceros al carbono y de baja aleación

Los aceros al carbono y los aceros de baja aleación son los de uso más generalizado en la industria, abarcando su empleo desde la fabricación de rejas y puertas hasta calderos, estructuras, barcos, carros transportadores de mineral, tuberías diversas, puentes, bases de máquinas, equipos agrícolas, chasis, carrocerías, tanques, vagones ferroviarios, muelles etc.

Para estos aceros, clasificados como aceros al carbono de baja aleación, existen gran variedad de electrodos.

1.1.3.1. Electrodo para soldadura por arco eléctrico manual

Se pueden clasificar en cuatro grupos principales:

- Electrodo celulósicos
- Electrodo rúflicos
- Electrodo de hierro en polvo
- Electrodo básicos o de bajo hidrógeno

Cada grupo de electrodos posee determinadas características generales. Los términos celulósico rúflico, hierro en polvo y bajo hidrógeno se refieren al material predominante en el revestimiento del electrodo. Este material predominante determina las características generales del grupo.

Cuando se planea realizar un trabajo, primero se debe escoger el grupo, sea este celulósico, rúflico, hierro en polvo o bajo hidrógeno. Esta selección se hace teniendo en cuenta las características generales del trabajo o las exigencias que plantea la obra, o bien los resultados que espera obtener. Determinado el grupo, se debe seleccionar el electrodo dentro del grupo que más se adecúe a las exigencias particulares de la obra o de la máquina de soldar.

Es muy importante conocer las características de cada grupo, los casos de aplicación general y las diferencias entre un grupo y otro. Del mismo modo deben conocerse los electrodos que pertenecen a cada grupo.

a) Electrodo Celulósicos

El revestimiento de estos electrodos contiene una adecuada proporción de elementos de naturaleza celulósica.

Durante el encendido y mantenimiento del arco, la celulosa se descompone en CO_2 y vapor de agua, formando de esta manera una gran cantidad de gases que, al buscar rápida salida por el extremo del electrodo, produce un efecto de chorro.

La fuerza de los gases excava el material caliente y permite que la mezcla fundida del metal base y del electrodo penetre a una mayor profundidad. La penetración profunda es la característica predominante de estos electrodos.

Las características de los electrodos celulósicos son las siguientes:

- Penetración profunda.
- Arco potente y estable.
- Solidificación rápida de los cordones, lo que permite su empleo eficiente en todas las posiciones de soldadura.
- Ideal para posiciones forzadas, aun en materiales sucios u oxidados
- Escoria liviana.

b) Electrodos rúflicos

Los elementos rúflicos en el revestimiento permiten un fácil encendido y mantenimiento del arco, siendo estos electrodos los más apropiados para soldadores principiantes u operarios con poca experiencia en soldadura eléctrica.

La penetración que se logra con estos electrodos es mediana. Esta característica es de importancia cuando se sueldan planchas, perfiles y tubos de espesores delgados.

La forma y aspecto más vistoso del cordón, la escoria liviana y fácil de desprender, así como la alta fluidez del electrodo encendido se deben a la adecuada proporción de rutilo que poseen estos electrodos.

Las características de los electrodos rúflicos son las siguientes:

- Mediana penetración.
- Cordones de buen aspecto.
- Excelente calidad de los depósitos de soldadura.

- Facilidad de encendido y mantenimiento de arco eléctrico.
- Escoria liviana y fácil de desprender.
- Fluidez y rapidez de fusión del electrodo.

c) Electrodo de hierro en polvo

El revestimiento de estos electrodos posee una cantidad apreciable de hierro finamente pulverizado. Al soldar con estos electrodos, hasta un tercio del metal depositado proviene del revestimiento y dos tercios del núcleo metálico.

La fabricación de estos electrodos favorece ampliamente a la industria, porque con su aplicación se logra una mayor deposición del material en menor tiempo de labor del soldador; esta reducción del tiempo de trabajo trae como consecuencia una reducción de los costos de la obra que se realiza.

El mayor rendimiento, que se logra con estos electrodos, es el resultado de la utilización más eficiente del calor generado por el arco eléctrico. La alta temperatura generada por el arco funde simultáneamente la pieza a soldar, la varilla del electrodo y también el hierro en polvo del revestimiento. Como consecuencia se deposita mayor cantidad de material por cada amperio que es utilizado por la máquina de soldar, ahorrándose energía eléctrica.

Las características de los electrodos de hierro en polvo son las siguientes:

- Relleno rápido de las juntas.
- Penetración moderada.
- Arco suave y estable.
- Buena calidad de la soldadura.
- Escoria abundante que se desprende por sí sola al enfriarse.
- Cordones de perfecto acabado, similares a los que se consiguen por soldadura automática.

d) Electrodo básico o de bajo hidrógeno

Algunos aceros de mediano y alto carbono, los aceros de baja aleación y, en general, todos los aceros con alto contenido de azufre tienden a agrietarse o bien a presentar zonas frágiles en el depósito de soldadura.

El agrietamiento es debido a que el hidrógeno del aire o el hidrógeno proveniente del revestimiento afectan al metal cuando está en estado semi-fluido.

Para contrarrestar ese efecto nocivo del hidrógeno al soldar los aceros mencionados, se fabrican electrodos básicos, que contienen una mínima proporción de hidrógeno en su revestimiento. Poseen además dos elementos en su revestimiento, que mejoran la calidad de la soldadura. Estos elementos son el carbonato de calcio y la fluorita. El carbonato de calcio, al arder, se descompone en óxido de calcio y gas carbónico. El gas CaO se combina con las impurezas, como el fósforo y azufre, perdiéndose en forma de escoria, quedando en consecuencia el metal depositado libre de impurezas. El gas carbónico actúa como protector del metal en fusión. La fluorita se descompone al arder en calcio y flúor. El flúor se combina con el hidrógeno formando gas fluorhídrico (HF). Este gas de composición química muy estable se escapa y desaparece del acero que se ha soldado, dejando de esta manera un depósito casi libre de hidrógeno. Otra función del carbonato de calcio y de la fluorita es el afinamiento de grano metálico del depósito, quedando de esta manera un depósito de metal más elástico.

Las características de los electrodos básicos o de bajo hidrógeno son las siguientes:

- Penetración mediana.
- Propiedades mecánicas excepcionales.
- Depósitos de muy alta calidad.

1.1.3.2. Electrodo para soldadura por arco de tungsteno y gas

a) Wolframio puro (W al 100%)

Es el electrodo más barato y posee una temperatura de fusión de alrededor de 3400°C . Se usa principalmente con corriente alterna ya que mantiene la punta en buenas

condiciones (extremo redondeado), lo que le otorga buena estabilidad de arco. Muy usado para soldar aluminio y sus aleaciones.

b) Wolframio con Torio (W + 1 a 2% de Torio)

Electrodo de larga vida y de mayor precio (15 a 20% más caro) con temperatura de fusión de aproximadamente 4000 °C (permite disminuir diámetro del electrodo). Se usa con corriente continua ya que mantiene la punta en buenas condiciones (extremo afilado). Cuando la punta se redondea es necesario afilarla para mantener el arco bien direccionado. Muy usado para soldadura de todo tipo de aceros, cobre, titanio, etc.

c) Wolframio con Zirconio (W + 0.3 a 0.9% de Zirconio):

Tiene características intermedias con respecto a los 2 anteriores y con una temperatura de fusión de aproximadamente 3800 °C. Puede usarse con corriente continua o corriente alterna. Muy usado para soldar materiales ligeros como aluminio y magnesio.

1.2. Procesos de soldadura

De acuerdo con la AWS, los diferentes métodos de unión de materiales son la soldadura por fusión, soldadura en estado sólido y la soldadura fuerte y blanda. Para el presente estudio es importante conocer los procesos de soldadura por fusión.

Los procesos de soldadura por fusión son aquellos en los que siempre se produce la fusión del material base y la del metal de aporte cuando este se emplea. Es decir, siempre existe una fase líquida formada solo por el metal base, o por el metal base y el de aporte.

1.2.1. Proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

El soldeo por arco con electrodo revestido es un proceso en el que la fusión del metal se produce gracias al calor generado por un arco eléctrico establecido entre el electrodo y el metal base de una unión a soldar, alcanzando temperaturas alrededor de los 4000°C.

El material de aporte se obtiene por la fusión del electrodo en forma de pequeñas gotas (Figura 1.3). La protección se obtiene por la descomposición del revestimiento en forma de gases y en forma de escoria líquida que flota sobre el baño de fusión y, posteriormente, solidifica.

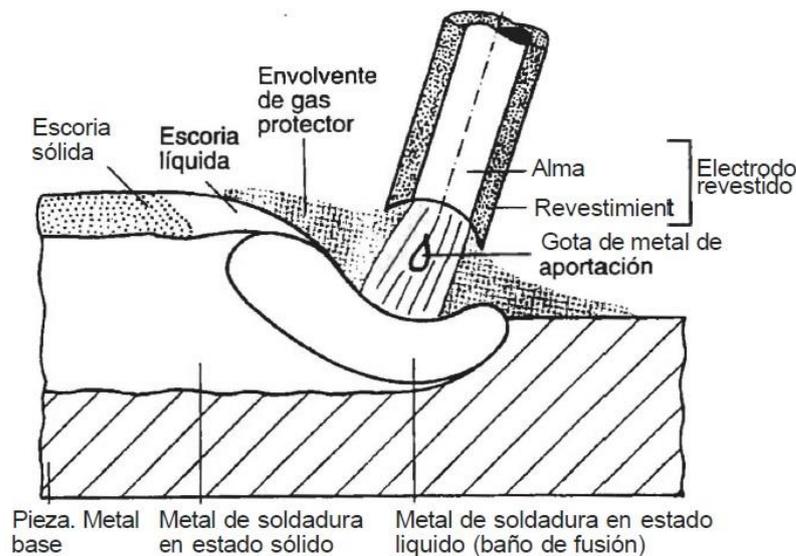


Fig. 1.3 Proceso SMAW (Hernández 2006:193)

Las principales características del proceso SMAW son las siguientes:

- Versatilidad de uso en todas las posiciones.
- Buena calidad de la unión soldada.
- Requiere gran habilidad por parte del soldador.
- No requiere protección adicional durante la ejecución.
- Se puede usar en áreas de acceso limitado.
- El equipo es relativamente sencillo, económico y portátil.
- El rango normal de espesor de material base es hasta 200 mm.

Las principales variables del proceso son las siguientes:

- Voltaje (V): Suele variar entre 17 y 40 V y se determina por la separación entre el electrodo y el material base (a mayor separación se tiene mayor voltaje). Es definido por el soldador.

- Velocidad de avance (mm/min): Está definida por el espesor a soldar, tipo de electrodo, amperaje, posición de soldadura, etc. Es definida por el soldador.
- El amperaje (I): Suele variar entre 25 y 500 A, depende del espesor a soldar, tipo de electrodo, etc. Definido por la máquina.

Los factores a considerar en la selección de una fuente de poder son los siguientes:

- Tipo de corriente a utilizar (CC o CA)
- Rango de Amperaje requerido
- Potencia Disponible de la fuente de poder
- Tipo de corriente de la red (monofásica o trifásica)
- Voltaje de la red (220 V, 360 V)

Las características de las máquinas de corriente continua son:

- El arco eléctrico es estable y presenta también un buen arranque de arco
- Existe la posibilidad de cambiar de polaridad de acuerdo a la penetración que se requiera en la soldadura (ver figura 1.4).

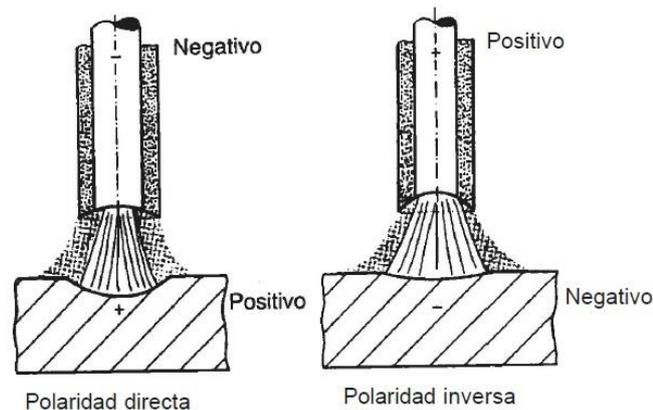


Fig. 1.4 Efecto en la penetración debido al cambio de polaridad (Hernández 2006:197)

Las características de las máquinas de corriente alterna son:

- No se pega el electrodo durante el soldeo.
- Posee penetración intermedia

- No presenta soplo magnético como en máquinas de corriente continua.

Principales características de las máquinas de soldar:

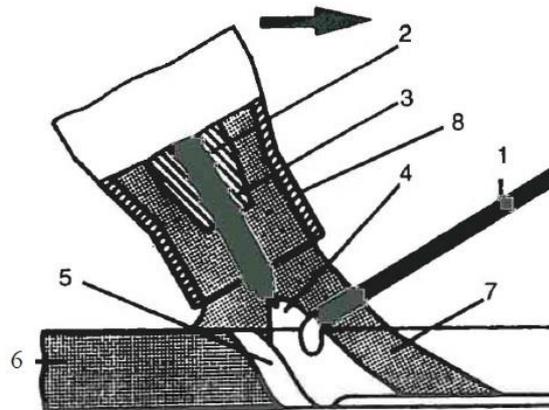
- Voltaje en vacío: Suministrado por la máquina antes de iniciar el arco. Suele variar entre 50 y 100 V.
- Voltaje de trabajo: Proporcionado por la máquina cuando el arco está encendido. Suele variar entre 17 y 40 V.
- Regulación de Amperaje: Proporcionado por la máquina y se regula antes de iniciar el arco. Suele variar entre 25 y 500 A.
- Para la selección adecuada del amperaje se debe tomar en cuenta el diámetro y tipo de electrodo.
- Para la selección adecuada del amperaje se debe tomar en cuenta el diámetro y tipo de electrodo.
- El tamaño del electrodo se elige en función del electrodo a soldar.

La influencia de las principales variables del proceso es como se detalla a continuación:

- Voltaje alto (arco largo): Penetración deficiente, gotas grandes, sobremonta, salpicaduras.
- Voltaje bajo (arco corto): Cordón grueso, inclusiones. El arco tiende a pegarse
- Avance rápido: Socavación, cordón delgado, poca penetración, porosidad.
- Avance lento: Escorias, amontonamiento de material.
- Amperaje alto: Porosidades, salpicaduras, socavación.
- Amperaje bajo: Mala penetración, apagado de arco, difícil encendido.

1.2.2. Proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

El procedimiento de soldeo por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno no consumible, también llamado TIG (Tungsten inert gas), utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. El material de aporte, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas como el soldeo oxiacetilénico. La figura 1.5 muestra esquemáticamente los principios del proceso GTAW.



- 1.- Varilla de aportación. Metal de aportación
- 2.- Electrodo no consumible
- 3.- Boquilla de contacto
- 4.- Arco eléctrico
- 5.- Metal de soldadura fundido
- 6.- Pieza a soldar. Metal base
- 7.- Protección gaseosa
- 8.- Tobera

Fig. 1.5 Proceso GTAW (Hernández 2014:245)

Hay que recordar que el wolframio y tungsteno son dos denominaciones para el mismo metal cuyo símbolo en la tabla periódica es W.

Las características básicas de este proceso son las siguientes:

- Emplea un electrodo de Tungsteno no consumible y usa protección gaseosa con gas inerte (Argón y Helio).
- La alimentación del alambre puede ser manual o automática.
- La fuente de energía puede ser CC o CA.
- Puede usarse como TIG pulsado cuando se requiere mayor control sobre el aporte de calor al material base.
- Esto se consigue con variaciones de corriente entre 2 valores prefijados antes de iniciar la soldadura.

Las principales ventajas y limitaciones de este proceso son las siguientes:

- Excelente calidad de unión soldada por su bajo contenido de impurezas y defectos.
- Buen acabado superficial y no requiere limpieza posterior (ausencia de escoria).

- Se puede usar sin material de aporte para bajos espesores.
- Se emplea en todo tipo de posiciones.
- Baja tasa de deposición de material de aporte.
- Requiere buena habilidad del soldador.
- Existe la posibilidad de presentar inclusiones de W.
- No es económico para espesores mayores a 10 mm.

1.3. Metales disimilares

Los metales disimilares pueden ser aquellos químicamente diferentes, como también pueden ser aleaciones de un metal particular que son significativamente distintas desde un punto de vista metalúrgico. Cuando metales disimilares son unidos mediante un proceso de soldadura por fusión, la junta soldada puede comportarse de forma distinta a uno o ambos materiales base durante el servicio. Una combinación de metales con propiedades químicas, mecánicas y físicas significativamente diferentes puede fácilmente presentar problemas durante y después de la soldadura.

Consecuentemente, factores como el tipo de junta, el proceso de soldadura, el material de aporte y los tratamientos térmicos deben ser establecidos y propiamente evaluados antes de la ejecución de la junta soldada, ya que la finalidad es obtener un cordón de soldadura que satisfaga los requerimientos de servicio.

1.3.1. Consideraciones de soldadura

1.3.1.1. Metal de soldadura

El metal de soldadura es el metal que se ha fundido y resolidificado como resultado de la ejecución de la soldadura. Cuando el material de aporte es agregado a la piqueta de soldadura, la composición del metal de soldadura usualmente difiere de la de los materiales base.

En la soldadura por fusión de juntas disímiles, la consideración más importante es la composición del metal de soldadura y sus propiedades. Su composición depende de la

composición de los materiales base, los materiales de aporte y la dilución relativa de estos. La composición del metal de soldadura usualmente no es uniforme, particularmente con soldaduras multipase, y es probable que exista un gradiente de composición en el metal de soldadura adyacente a cada metal base.

Estas características de solidificación del metal de soldadura son influenciadas también por las diluciones relativas y los gradientes de composición cerca de cada metal base. Estas características son importantes con respecto a la fractura en caliente del metal de soldadura durante la solidificación

Los conceptos básicos de la aleación, las características metalúrgicas de la aleación resultante, y sus propiedades mecánicas y físicas deben ser considerados al diseñar una junta disímil. Si fases complejas o compuestos intermetálicos se forman cuando los dos metales base se funden juntos, la probabilidad de obtener una soldadura exitosa depende de la disponibilidad del material de aporte y del procedimiento de soldadura que evitará tales compuestos o fases y producirá metal de soldadura con propiedades aceptables para el servicio requerido.

1.3.1.2. Dilución

Durante la soldadura por fusión, ambos metales base y el material de aporte, son fundidos juntos en la piqueta de soldadura. Tras la solidificación, el metal de soldadura será o bien una sola fase o una mezcla de dos o más fases. Una fase puede ser una solución sólida (Cu-Ni), un compuesto intermetálico (CuAl_2), o un compuesto intersticial (Fe_3C , TiC). El número, tipo, cantidad y disposición metalúrgica de las fases presentes determinan en gran medida las propiedades y solidez del metal de soldadura. Las velocidades de solidificación y enfriamiento también tienen un efecto significativo en las fases presentes y la estructura metalúrgica del metal.

En la soldadura de metales disímiles, el metal de aporte debe alearse fácilmente con los metales base para producir un metal de soldadura que tenga una matriz de fase dúctil y continua. Específicamente, el metal de relleno debe ser capaz de aceptar dilución por parte de los materiales base sin producir una microestructura propensa a las fracturas. La microestructura del metal de soldadura también debe ser estable bajo las condiciones

de servicio esperadas. La resistencia del metal de soldadura debe ser equivalente o mejor que la del metal base más débil.

En la soldadura multipase, la composición de cada cordón de soldadura debe ser relativamente uniforme. La composición media de todo el metal de soldadura puede ser calculada cuando se conocen dos cosas: (1) la relación de los volúmenes de metales de base fundidos con el volumen de metal de soldadura entero, y (2) las composiciones de los metales base y de aporte. La dilución puede basarse en mediciones de área de sección transversal a través de una soldadura de prueba. La figura 1.6 ilustra cómo determinar la dilución por dos metales comunes, A y B, al soldar con un material de aporte F; asimismo, muestra ejemplos de dilución total.

El porcentaje promedio de un elemento de aleación específico en el metal de soldadura diluido puede ser calculado usando la ecuación 1.3 (AWS 1997:515):

$$X_W = (D_A)(X_A) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F) \quad (1.3)$$

Donde:

X_W es el porcentaje promedio del elemento X en el metal de soldadura.

X_A es el porcentaje promedio del elemento X en el material base A.

X_B es el porcentaje promedio del elemento X en el material base B.

X_F es el porcentaje promedio del elemento X en el material base F.

D_A es el porcentaje de dilución por el material base A, expresado como decimal.

D_B es el porcentaje de dilución por el material base B, expresado como decimal.

D_T es el porcentaje de dilución total por los materiales base A y B, expresado como decimal.

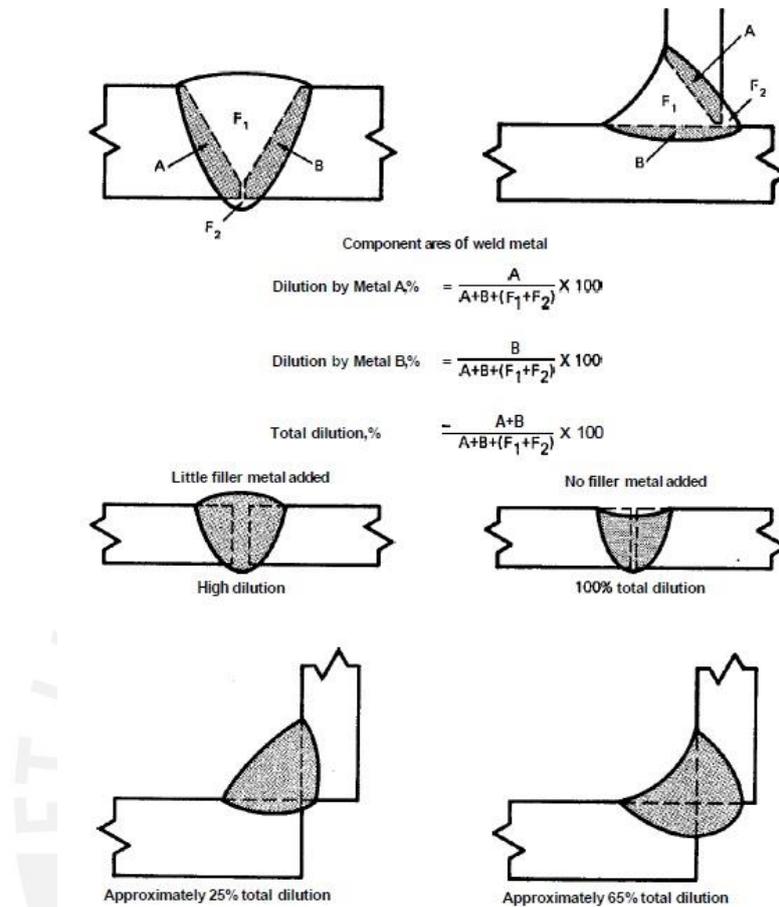


Fig. 1.6 Dilución en una junta disimilar (AWS 1997:516)

1.3.1.3. Temperaturas de fusión

La unión de metales disimilares mediante soldadura por fusión requiere que ambos materiales base se fusionen. Si las temperaturas de fusión son cercanas, digamos 100° C, los procedimientos y técnicas de soldadura normales son satisfactorias. Cuando existe una gran diferencia entre las temperaturas de fusión podría ser necesario emplear “brazing” o técnicas de soldadura en estado sólido para unir aquellos metales disimilares. La tabla 1.4 compara las temperaturas de fusión y otras propiedades físicas importantes de algunos metales con las del acero al carbono. Como se puede apreciar, es bastante difícil soldar aluminio con acero o aluminio con aleaciones de níquel de acuerdo a estos datos.

Tabla 1.4 Relación de Propiedades Físicas de Varios Metales con las del Acero al Carbono
(AWS 1997:517)

Propiedades	Materiales					
	Acero al Carbono	Cobre	Aluminio	Acero Inoxidable Austenítico	70Ni-30Cu	76Ni-16Cr-8Fe
Coefficiente de Expansión Térmica	1.0	1.5	2.1	1.4	1.2	1.0
Conductividad Térmica	1.0	5.9	3.1	0.7	0.4	0.2
Capacidad Calorífica	1.0	0.8	1.9	1.0	1.1	0.9
Densidad	1.0	1.1	0.3	1.0	1.1	1.1
Temperatura de Fusión	1.0	0.7	0.4	0.9	0.9	0.9

Una diferencia significativa en las temperaturas de fusión de los materiales base puede provocar la ruptura del metal con la menor temperatura de fusión. La solidificación o contracción del metal con la mayor temperatura de fusión inducirá esfuerzos en el otro metal. Este problema puede ser solucionado al depositar una o más capas de un material de aporte con temperatura de fusión intermedia sobre el borde del material con mayor temperatura de fusión. Este procedimiento se conoce como “buttering”. La capa de “buttering” servirá para reducir la diferencia entre temperaturas de fusión.

1.3.1.4. Conductividad térmica

La mayoría de los metales y aleaciones son relativamente buenos conductores del calor, pero algunos son mucho mejores que otros. La conducción rápida del calor proveniente de la piletta de soldadura por un metal base adyacente puede afectar la energía de entrada requerida para fundir localmente ese metal base. Cuando dos metales disimilares con conductividades térmicas significativamente diferentes van a ser soldados, el procedimiento de soldadura debe considerar esta diferencia. A menudo la fuente de calor debe estar dirigida hacia el metal con la mayor conductividad térmica más alta para obtener el balance térmico adecuado.

La conductividad térmica de un metal está en función de su temperatura. Cuando se sueldan metales disimilares, el calor disipado hacia los materiales base puede ser balanceado al precalentar selectivamente el metal con la mayor conductividad térmica. La dilución es más uniforme con un calentamiento balanceado.

El precalentamiento del material base con la mayor conductividad térmica también reduce la velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor. El principal efecto del precalentamiento es reducir el calor necesario para fundir el metal base.

1.3.1.5. Expansión térmica

La expansión térmica de los metales disimilares es una consideración importante. Grandes diferencias entre los coeficientes de expansión térmica de los metales adyacentes durante el enfriamiento inducirán esfuerzos de tracción en uno de ellos y esfuerzos de compresión en el otro. El metal sometido a esfuerzos de tracción puede sufrir ruptura en caliente durante la soldadura, o ruptura en frío durante el servicio a menos que los esfuerzos sean aliviados térmica o mecánicamente.

El coeficiente de expansión térmica lineal α , puede ser definido como el cociente de la deformación unitaria ($\Delta\varepsilon$) y el cambio de temperatura (ΔT), tal como se muestra en la ecuación 1.4 (AWS 1997:518):

$$\alpha = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} \quad (1.4)$$

El esfuerzo, σ , en la zona afectada por el calor de uno de los metales asociados puede ser estimado usando la ecuación 1.5 (AWS 1997:518):

$$\sigma = E \times \Delta\alpha \times \Delta T \quad (1.5)$$

Dónde:

E es el módulo de elasticidad del metal.

$\Delta\alpha$ es la diferencia entre los coeficientes de expansión lineal de los dos metales.

Este último factor es particularmente importante en juntas que operarán con temperaturas variables. Idealmente, el coeficiente de expansión lineal de la junta

resultante debe ser un valor intermedio que oscile entre los valores de los coeficientes de los metales base, especialmente si la diferencia entre ellos es grande.

1.3.1.6. Pre calentamiento y post calentamiento

La selección de un apropiado pre calentamiento o post calentamiento puede significar un problema con ciertas combinaciones de metales disimilares. Soldar un acero que requiere pre calentamiento con otro que no lo requiere, puede hacerse si el pre calentamiento puede ser independientemente aplicado en el lado correcto de la junta.

1.3.1.7. Diseño de junta

Cuando se diseñan juntas a tope se deben tener en consideración las características de fusión de cada metal base y del material de aporte así como los efectos de la dilución. Mientras mayor es la distancia entre los metales base a la hora de soldar la dilución decrece y se provee suficiente espacio para una mejor manipulación del arco, hecho que favorece una buena fusión del material.

1.3.2. Consideraciones de Servicio

1.3.2.1. Propiedades mecánicas y físicas

En una junta disimilar, las propiedades del cordón de soldadura dependen de la composición del metal de aporte, el procedimiento de soldadura y la dilución relativa de cada metal base. También hay dos diferentes zonas afectadas por el calor (ZAC), una en cada metal base y adyacentes al cordón. Las propiedades mecánicas y físicas del cordón de soldadura y de ambas ZAC deben ser consideradas en servicio.

Consideraciones especiales son tomadas cuando la junta trabaja con fluctuaciones grandes de temperatura. Una condición favorable existe cuando la junta trabaja a temperaturas constantes. Asimismo, durante el servicio a elevadas temperaturas, los esfuerzos internos son aliviados y alcanzan un equilibrio.

1.3.2.2. Resistencia a la corrosión

Tanto el cordón de soldadura como los metales base poseen conductas corrosivas específicas que deben ser consideradas.

Diferencias en la composición química pueden causar problemas de corrosión a altas temperaturas. Variaciones composicionales en las caras de ambos materiales base pueden resultar en oxidación y se pueden formar muescas en estos sitios. Tales muescas son concentradoras de tensiones en la junta y pueden generar corrosión bajo tensión.

Si la resistencia de una junta disimilar a un ambiente corrosivo específico es desconocida, existen ensayos de corrosión acelerada que pueden ser empleados para predecir la vida estimada de la junta propuesta.

1.3.3. Selección de material de aporte

La selección de un material de aporte adecuado es un factor importante al producir una junta de metales disimilares. El metal de aporte debe ser compatible con ambos metales, y debe ser capaz de ser depositado con un mínimo de dilución.

Algunos criterios importantes que deben primar en la selección de un metal de aporte apropiado son los siguientes:

- El metal de aporte debe proveer los requerimientos necesarios de diseño tales como propiedades mecánicas o resistencia a la corrosión.
- El metal de aporte debe cumplir el criterio de soldabilidad con respecto a dilución, temperatura de fusión y otros requerimientos de propiedades físicas de la soldadura.
- El metal de aporte debe tener suficiente ductilidad para tolerar esfuerzos inducidos por cambios de temperatura debido a diferencias en las características de expansión térmica de ambos metales base.
- Es recomendable que el material de aporte sea bajo en elementos intersticiales tales como carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. De esta manera el material de aporte será más dúctil, más estable, y menos propenso a fractura en caliente que un material de aporte con alto contenido de elementos intersticiales.

1.3.4. Selección del proceso de soldadura

Seleccionar el proceso de soldadura para ejecutar una unión disimilar es una consideración importante. La profundidad de fusión en los metales base y la dilución

resultante pueden variar con los diferentes procesos y técnicas de soldadura que se empleen.

Además del proceso, la dilución es también afectada por otros factores, incluyendo el diseño de junta. Siempre es mejor tener una dilución mínima uniforme a lo largo de toda la junta. Variaciones en la dilución puede producir inconsistencia en las propiedades de la junta.

1.4. Calificación de procedimiento de soldadura

Las pruebas de calificación de procedimientos soldadura pueden ser categorizadas bien sea como pruebas estándares o especiales. Las pruebas estándares incluyen pruebas visuales, metalúrgicas y ensayos no destructivos, análisis químicos, pruebas de susceptibilidad al agrietamiento y ensayos para determinar propiedades mecánicas. Los ensayos de propiedades mecánicas pueden incluir tensión, doblado, dureza y otras pruebas, así como también pruebas para determinar la tenacidad a la fractura.

Antes de aplicar un proceso de soldadura en taller o en campo, se debe realizar una calificación del mismo. El objeto fundamental es determinar los parámetros y secuencia de soldadura que se sabe dan un resultado satisfactorio para luego aplicarlos en forma idéntica en sitio. Igualmente, permite dejar un registro en el tiempo de cómo se realizó una determinada soldadura.

Las normas y códigos establecen el procedimiento de calificación de las uniones. Para todos los casos de calificación de soldaduras, se debe elaborar unas “Especificaciones del Procedimiento de Soldadura” (EPS) o, mejor conocido con sus siglas en inglés como WPS, “Welding Procedure Specifications”. Este documento recoge todas las condiciones, características, parámetros y demás información sobre el proceso de soldadura a calificar. El resultado de los ensayos requeridos se registra en el “Procedure Qualification Record” o PQR. Un procedimiento quedará aprobado cuando los resultados reflejados en el PQR sean satisfactorios.

La Sección IX del Código sobre Calderas y Recipientes a Presión de la ASME

se relaciona con la calificación de soldadores, operarios de soldadura, soldadores para soldadura fuerte y operarios de soldadura fuerte, y los procedimientos que ellos emplean al soldar o al hacer soldadura fuerte de acuerdo con el Código de Calderas y Recipientes Sujetos a Presión de la ASME y con el Código para Tuberías de Presión ASME B31.

Según la sección IX del Código ASME sobre calderas y recipientes a presión, el propósito de la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) y del Registro de Calificación del Procedimiento (PQR) es determinar que el conjunto de partes soldadas propuesto para construcción sea capaz de proveer las propiedades requeridas para su aplicación destinada. Se presupone que el soldador o el operario de soldadura que efectúa la prueba de calificación del procedimiento de soldar es un trabajador experimentado. Esto es, la prueba de calificación del procedimiento de soldar establece las propiedades del conjunto soldado, no la experiencia del soldador o del operario de soldadura. Un WPS relaciona las variables del proceso, tanto esenciales como no esenciales, y los órdenes aceptables de estas variables. Un WPS tiene como fin proveer especificaciones para el soldador/operario de soldadura. El PQR relaciona lo que se usó al calificar el WPS y los resultados de las pruebas.

Concluida la soldadura como indica el WPS, se toman probetas de ensayo para verificar el resultado de la unión. Estas probetas pueden ser destinadas a ensayos de tracción, doblado guiado, impacto, dureza, metalografía o macroataque, según se indique en la norma o código o así lo acuerden cliente y contratista. En todo caso, siempre prima lo establecido en la norma o código. Las probetas deben ser preparadas por mecanizado siguiendo la geometría indicada en las normas.

Otras Secciones del Código establecen las condiciones según las cuales los requerimientos de la Sección IX son obligatorios, en todo o en parte, y dan requerimientos adicionales.

Algunos aspectos que no contempla la Sección IX son: parámetros para soldaduras de producción, estándares de aceptación y requisitos de inspección para estándares de calidad, selección de materiales base y/o metales de aporte para las condiciones de servicio esperadas, tiempos/temperaturas requeridos para tratamientos térmicos de

alivio de tensiones posteriores a la soldadura.

1.4.1 Especificación de procedimiento de soldadura (WPS)

Según la sección IX del Código ASME, todo WPS debe contener:

- Las variables esenciales relacionadas a cada proceso empleado en el Procedimiento. Las Variables Esenciales son aquellas que al ser cambiadas, afectan las propiedades mecánicas de la soldadura obtenida. Por lo tanto se requiere recalificación. Por ejemplo, cambio de Número P, proceso de soldar, metal de aporte, electrodo, precalentamiento o tratamiento térmico después de soldar, entre otras.
- Las variables suplementarias esenciales, si se requiere prueba de impacto. Las variables esenciales suplementarias de un procedimiento de soldadura son aquellas que al cambiarse, afectan las propiedades de impacto de la soldadura a bajas temperaturas. Estas variables deben tenerse en cuenta cuando alguna sección del código o una especificación exija prueba de impacto.
- Las variables no esenciales relativas al o los procesos utilizados en el procedimiento. Las variables no esenciales de un procedimiento de soldadura son aquellas que al cambiarse no afectarán las propiedades mecánicas de las piezas soldadas, por ejemplo, diseño de junta, método de remoción o limpieza, etc. Estas variables deben incluirse en todo WPS y deben respetarse en el procedimiento de soldadura. Pueden cambiarse revisando el WPS, sin necesidad de recalificar el procedimiento de soldadura.

Tabla. 1.5 Variables en el proceso GTAW (Parte 1 de 2)
(ASME 2010:30)

Paragraph	Brief of Variables	Essential	Supplementary Essential	Nonessential
QW-402 Joints	.1 ϕ Groove design			X
	.5 + Backing			X
	.10 ϕ Root spacing			X
	.11 \pm Retainers			X
QW-403 Base Metals	.5 ϕ Group Number		X	
	.6 T Limits		X	
	.8 T Qualified	X		
	.11 ϕ P-No. qualified	X		
QW-404 Filler Metals	.3 ϕ Size			X
	.4 ϕ F-Number	X		
	.5 ϕ A-Number	X		
	.12 ϕ Classification		X	
	.14 \pm Filler	X		
	.22 \pm Consum. insert			X
	.23 ϕ Filler metal product form	X		
	.30 ϕ t	X		
	.33 ϕ Classification			X
.50 \pm Flux			X	
QW-405 Positions	.1 + Position			X
	.2 ϕ Position		X	
	.3 ϕ \updownarrow Vertical welding			X
QW-406 Preheat	.1 Decrease > 100°F (55°C)	X		
	.3 Increase > 100°F (55°C) (IP)		X	
QW-407 PWHT	.1 ϕ PWHT	X		
	.2 ϕ PWHT (T & T range)		X	
	.4 T Limits	X		
QW-408 Gas	.1 \pm Trail or ϕ comp.			X
	.2 ϕ Single, mixture, or %	X		
	.3 ϕ Flow rate			X
	.5 \pm or ϕ Backing flow			X
	.9 - Backing or ϕ comp.	X		
	.10 ϕ Shielding or trailing	X		

Tabla. 1.5 Variables en el proceso GTAW (Parte 2 de 2)
(ASME 2010:31)

Paragraph	Brief of Variables	Essential	Supplementary Essential	Nonessential
QW-409 Electrical Characteristics	.1 > Heat input		X	
	.3 ± Pulsing I			X
	.4 ϕ Current or polarity		X	X
	.8 ϕ I & E range			X
	.12 ϕ Tungsten electrode			X
QW-410 Technique	.1 ϕ String/weave			X
	.3 ϕ Orifice, cup, or nozzle size			X
	.5 ϕ Method cleaning			X
	.6 ϕ Method back gouge			X
	.7 ϕ Oscillation			X
	.9 ϕ Multi to single pass/slide		X	X
	.10 ϕ Single to multi electrodes		X	X
	.11 ϕ Closed to out chamber	X		
	.15 ϕ Electrode spacing			X
	.25 ϕ Manual or automatic			X
	.26 ± Peening			X
.64 Use of thermal processes	X			

Legend:

+ Addition > Increase/greater than ↑ Uphill ← Forehand ϕ Change
 - Deletion < Decrease/less than ↓ Downhill → Backhand

- Información Adicional considerada necesaria para obtener las soldaduras deseadas. El WPS debe definir las diferentes variables con los valores precisos o los rangos aceptables para ser empleados al realizar las soldaduras. Las tablas 1.5 y 1.6 muestran las variables en los procesos GTAW y SMAW respectivamente.

Tabla. 1.6 Variables en el proceso SMAW (ASME 2010:22)

Paragraph		Brief of Variables	Essential	Supplementary Essential	Nonessential
QW-402 Joints	.1	ϕ Groove design			X
	.4	– Backing			X
	.10	ϕ Root spacing			X
	.11	± Retainers			X
QW-403 Base Metals	.5	ϕ Group Number		X	
	.6	T Limits impact		X	
	.8	ϕ T Qualified	X		
	.9	t Pass > ½ in. (13 mm)	X		
	.11	ϕ P-No. qualified	X		
QW-404 Filler Metals	.4	ϕ F-Number	X		
	.5	ϕ A-Number	X		
	.6	ϕ Diameter			X
	.7	ϕ Diameter > ¼ in. (6 mm)		X	
	.12	ϕ Classification		X	
	.30	ϕ t	X		
	.33	ϕ Classification			X
QW-405 Positions	.1	+ Position			X
	.2	ϕ Position		X	
	.3	ϕ ↑↓ Vertical welding			X
QW-406 Preheat	.1	Decrease > 100°F (55°C)	X		
	.2	ϕ Preheat maint.			X
	.3	Increase > 100°F (55°C) (IP)		X	
QW-407 PWHT	.1	ϕ PWHT	X		
	.2	ϕ PWHT (T & T range)		X	
	.4	T Limits	X		
QW-409 Electrical Characteristics	.1	> Heat input		X	
	.4	ϕ Current or polarity		X	X
	.8	ϕ I & E range			X
QW-410 Technique	.1	ϕ String/weave			X
	.5	ϕ Method cleaning			X
	.6	ϕ Method back gouge			X
	.9	ϕ Multiple to single pass/side		X	X
	.25	ϕ Manual or automatic			X
	.26	± Peening			X
	.64	Use of thermal processes	X		

Legend:

+ Addition > Increase/greater than ↑ Uphill ← Forehand ϕ Change
 – Deletion < Decrease/less than ↓ Downhill → Backhand

1.4.2. Registro de calificación de procedimiento (PQR)

El mantenimiento de registros es una parte esencial de la calificación de procedimiento de soldadura. Los datos obtenidos al soldar y ensayar una probeta, deben ser consignados en el PQR, el cual debe contener:

- Las variables Esenciales de los procesos empleados en el procedimiento.
- Las variables Esenciales Suplementarias cuando se requiere Prueba de Impacto.
- El registro de las variables No Esenciales, a elección del fabricante.
- Cualquier otra información que se considere necesaria para la elaboración de la soldadura.

Solamente debe consignarse la información real que se observe durante la prueba. No deben registrarse datos que no fueron observados. El PQR verifica las propiedades mecánicas de una soldadura mediante la documentación de los resultados obtenidos de los ensayos destructivos, suministra la prueba de soldabilidad y detalla los valores reales de las variables empleadas para realizar la soldadura. En el PQR deben escribirse las variables esenciales para cada proceso empleado en caso de ser un proceso combinado.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestra el procedimiento empleado para la elaboración del cupón de soldadura y las probetas de ensayo, así como los pasos que se siguieron para la caracterización y determinación de las propiedades de las uniones soldadas y los materiales base API 5L X70 PSL1 y ASTM A707 L5.

2.1. Características nominales de los materiales base

En el presente trabajo, se utilizaron aceros API 5L X70 PSL1 y ASTM A707 L5 F65. Se tomaron muestras de ambos materiales para someterlos a un análisis químico con la finalidad de conocer los elementos que componen a dichos materiales. Asimismo, se realizaron ensayos de tracción a ambos aceros para conocer sus propiedades mecánicas.

2.1.1. ASTM A707 L5 C14

La especificación técnica de este material cubre a bridas forjadas de acero al carbono y acero aleado destinadas principalmente a tuberías de petróleo y gas en áreas sometidas a bajas temperaturas ambientales.

La tabla 2.1 muestra los requerimientos químicos estipulados en la especificación técnica ASTM A707/A707M - 13 para grado L5 y clase 4 (ver anexo A).

Tabla 2.1 Requerimientos de composición química (ASTM 2013:2)

Elemento de Aleación	% en peso (mín - máx) ASTM A707 L5 C14	
C	0	0.09
Mn	0.35	0.75
P	0	0.03
S	0	0.035
Si	0	0.37
Ni	0.67	1.03
Cr	0.56	0.94
Mo	0.14	0.28
V	0	0.06
N	0	0
Cu	0.95	1.35
Co	0	0.02

Por otro lado, la tabla 2.2 muestra los requerimientos mecánicos estipulados en la especificación técnica ASTM A707/A707M - 13 para grado L5 y clase 4 (ver anexo B).

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas (ASTM 2013:3)

Propiedad	Límite inferior ASTM A707 L5 C14
Resistencia a la tracción, psi [MPa]	90000 [620]
Resistencia a la fluencia, psi [MPa]	75000 [515]
Elongación (%)	20
Reducción de área (%)	40

2.1.2. API 5L X70 PSL1

La especificación técnica de este material establece los requisitos para la fabricación de tubos de acero sin costura y con costura para su uso en los sistemas de transporte por tuberías en las industrias del petróleo y el gas natural.

La tabla 2.3 muestra los requerimientos químicos estipulados en la especificación técnica API 5L 2013 para grado X70 PSL1 (ver anexo C).

Tabla 2.3 Requerimientos de composición química (API 2013:28)

Elemento de Aleación	% en peso (máx.) API 5L X70
C	0.28
Mn	1.4
P	0.03
S	0.03
V	V+Nb+Ti < 0.15
Nb	
Ti	

Por otro lado, la tabla 2.4 muestra los requerimientos mecánicos estipulados en la especificación técnica API 5L 2013 para grado X70 PSL1 (ver anexo D).

Tabla 2.4 Propiedades mecánicas (API 2013:31)

Propiedad	Límite inferior API 5L X70 PSL1
Resistencia a la tracción, psi [MPa]	82700 [570]
Resistencia a la fluencia, psi [MPa]	70300 [485]

2.2. Equipamiento de Soldadura

En el presente trabajo de tesis, el equipo empleado fue una máquina de soldeo portátil de marca Lincoln Electric y modelo Invertec V350 pro. En la tabla 2.5 se muestran los datos técnicos de la máquina y en la figura 2.1 se muestra una fotografía de la misma. El equipo en mención permite trabajar tanto con el proceso GTAW como con el proceso SMAW. El anexo E muestra las especificaciones técnicas de la máquina.

Tabla 2.5 Datos técnicos (Lincoln Electric 2001:A1)

Voltaje de suministro	(3~) 230V \pm 15%, 50 / 60 Hz
Fusible	125 A
Peso (con cables de suministro)	37.4 kg
Rango de soldadura	5A / 1 V – 425 A / 18 V
Eficiencia a máxima corriente	0,88
Corriente nominal 60%	350 A
Clase de protección	IP 21
Dimensiones externas (L x W x H)	373 x 338 x 706 mm

**Fig. 2.1** Máquina de Soldar Lincoln Electric Modelo Invertec V350 (Lincoln Electric 2014:1)

2.3. Elaboración de la especificación de procedimiento de soldadura (WPS)

A continuación se describen las variables presentadas en el WPS para la elaboración de la junta disímil entre los aceros ASTM A707 L5 y API 5L X70 PSL1.

2.3.1. General

2.3.1.1. Proceso de soldadura

En el presente trabajo se emplearon dos procesos de soldadura, el proceso GTAW y el proceso SMAW.

El proceso GTAW es recomendable para los pases de raíz ya que posee una baja tasa de deposición y genera un cordón de excelente calidad.

Por otra parte, se empleó el proceso SMAW en las pasadas posteriores ya que no existe ningún requerimiento especial. Asimismo, este proceso está ampliamente difundido debido a su versatilidad de posiciones de soldeo y por ser un proceso que requiere equipos y electrodos de menor costo.

2.3.1.2. Tipo de soldadura

El tipo de soldadura es manual debido a que ambos procesos de soldadura serían ejecutados completamente de forma manual por el soldador.

2.3.2. Juntas

2.3.2.1. Diseño de junta

El cupón de soldadura fue elaborado a partir de un anillo de acero ASTM A707 L5 F65 y un tramo de tubería de acero API 5L X70 PSL1. Ambos materiales tienen 24" (609.6 mm) de diámetro exterior y 21.5 mm de espesor. Se trabajaron biseles en "V" de 35° cada uno con un talón de 2mm. La figura 2.2 muestra el diseño de junta empleado en la soldadura.

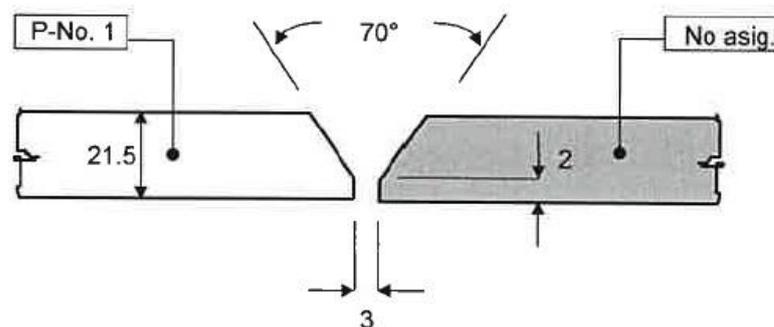


Fig. 2.2 Diseño de junta

2.3.2.2. Respaldo

La soldadura requerida correspondía a una junta de penetración completa. Como el diseño de la junta y el proceso GTAW garantizaban este requerimiento, no se utilizó respaldo.

2.3.3. Metal base

Para los procesos de soldadura empleados, según el código ASME, un cambio en el número P supone un cambio en una variable esencial suplementaria. El código ASME sección IX ha definido un parámetro conocido como el P No. (Número P) el cual agrupa a los materiales de acuerdo a su composición química y propiedades mecánicas.

A continuación, la tabla 2.6 muestra las características del acero API 5L X70 (entre ellos el P No.) según el código ASME sección IX (ver anexo F).

Tabla 2.6 Características del acero API 5L X70 según QW-422 (ASME 2010:110)

Especificación y grado	Rotura mínima especificada ksi (MPa)	P No.	Group. No.	Composición Nominal	Forma del Producto
API 5L X70	82 (565)	1	3	C-Mn	Tubos y tuberías con y sin costura

Por otro lado, el acero ASTM A707 correspondiente a la brida, no se encuentra homologado por ASME, es por ello que no figura en la tabla de metales base para calificación del código ASME sección IX y por consiguiente no se le ha asignado un P No.

La tabla 2.7 muestra en forma resumida los P No. en función del tipo de material base.

Tabla 2.7 QW-420: P No. según el tipo de aleación (ASME 2010:74)

Base Metal	Welding
Steel and steel alloys	P-No. 1 through P-No. 15F
Aluminum and aluminum-base alloys	P-No. 21 through P-No. 26
Copper and copper-base alloys	P-No. 31 through P-No. 35
Nickel and nickel-base alloys	P-No. 41 through P-No. 49
Titanium and titanium-base alloys	P-No. 51 through P-No. 53
Zirconium and zirconium-base alloys	P-No. 61 and P-No. 62

En cuanto al rango de espesores a soldar, según se aprecia en el anexo G, el mínimo espesor es de 5 mm, mientras que el máximo espesor a soldar sería igual a dos veces el espesor de los metales base; es decir 43 mm. Sin embargo, En el WPS se define 31.75 mm como valor máximo de espesor ya que se trata de un requerimiento del proyecto.

2.3.4. Metal de aporte

Se seleccionaron los consumibles considerando las propiedades mecánicas de los metales base, su composición química, la posición de soldeo, el espesor del metal base, el diseño de junta y las características del metal base a soldar.

El código ASME sección IX ha clasificado los metales de aporte en función de un parámetro conocido como el A No. El cual está asociado al tipo de depósito de soldadura que realiza cada electrodo o varilla. La tabla 2.8 muestra la clasificación de los metales de aporte según el A No.

Tabla 2.8 QW-442 Clasificación de metal depositado en función del A No. (ASME 2013:143)

A-No.	Types of Weld Deposit	Analysis, % [Note (1)]					
		C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si
1	Mild Steel	0.20	1.60	1.00
2	Carbon-Molybdenum	0.15	0.50	0.40-0.65	...	1.60	1.00
3	Chrome (0.4% to 2%)-Molybdenum	0.15	0.40-2.00	0.40-0.65	...	1.60	1.00
4	Chrome (2% to 4%)-Molybdenum	0.15	2.00-4.00	0.40-1.50	...	1.60	2.00
5	Chrome (4% to 10.5%)-Molybdenum	0.15	4.00-10.50	0.40-1.50	...	1.20	2.00
6	Chrome-Martensitic	0.15	11.00-15.00	0.70	...	2.00	1.00
7	Chrome-Ferritic	0.15	11.00-30.00	1.00	...	1.00	3.00
8	Chromium-Nickel	0.15	14.50-30.00	4.00	7.50-15.00	2.50	1.00
9	Chromium-Nickel	0.30	19.00-30.00	6.00	15.00-37.00	2.50	1.00
10	Nickel to 4%	0.15	...	0.55	0.80-4.00	1.70	1.00
11	Manganese-Molybdenum	0.17	...	0.25-0.75	0.85	1.25-2.25	1.00
12	Nickel-Chrome-Molybdenum	0.15	1.50	0.25-0.80	1.25-2.80	0.75-2.25	1.00

NOTE:

(1) Single values shown above are maximum.

Asimismo, el código ASME sección IX ha definido un parámetro conocido como el F No. El F No. está basado esencialmente en las características de usabilidad de un electrodo o varilla, las cuales fundamentalmente determinan la habilidad de los soldadores para realizar soldaduras adecuadas con un material de aporte dado. Esta agrupación se hace para reducir el número de procedimientos de soldadura y

calificaciones de desempeño del soldador. La existencia de esta agrupación no implica que los metales de aporte en un grupo pueden ser sustituidos indiscriminadamente por algún otro del mismo grupo, ya que previamente se requiere considerar la compatibilidad entre los metales base y metales de aporte desde un punto de vista de propiedades mecánicas y condiciones de servicio. La tabla 2.9 muestra la clasificación de los metales de aporte según el F No.

Tabla 2.9 Clasificación de electrodos y varillas según F No.

F Number	Descripción General
1 - 6	Aceros y aceros aleados
21 - 24	Aluminio y aleaciones de aluminio
31 - 37	Cobre y aleaciones de cobre
41 - 45	Níquel y aleaciones de níquel
51 - 54	Titanio y aleaciones de titanio
61	Circonio y aleaciones de circonio
71 - 72	Recubrimiento resistente al desgaste

Para la ejecución de la soldadura se emplearon dos materiales de aporte distintos (uno por cada proceso de soldadura involucrado).

2.3.4.1. Material de aporte en proceso GTAW

Como se mencionó anteriormente, se usó el proceso GTAW para el pase de raíz. En este caso se empleó una varilla ER70S-3 con A-No. igual a 1. Se ha previsto no superar los 13 mm de espesor de material depositado durante esta pasada. La figura 2.3 muestra la designación de las varillas según AWS A5.18.



Fig. 2.3 Designación de varillas según AWS A5.18 (AWS 2001:20)

Las características de esta varilla son las siguientes:

- Varilla de acero al carbono con alto contenido de manganeso y silicio para soldar por proceso TIG (GTAW).
- Presenta buena soldabilidad, proporcionando un charco de soldadura limpio y con buen aspecto.
- Su depósito es libre de poros y fisuras.
- Ideal para soldar en toda posición.

Los gases recomendados a usar con esta varilla son el Helio y el Argón puro, siendo este último el empleado en este estudio.

A continuación, la tabla 2.10 muestra los requerimientos de composición química para electrodos sólidos y varillas según AWS A5.18 (ver anexo H).

Tabla 2.10 Requerimientos de composición química para electrodos sólidos y varillas según AWS A5.18 (AWS 2001:2)

Clasificación AWS	Porcentaje en peso (%)									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
A 5.18				máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.
ER70S-3	0.06 a 0.15	0.90 a 1.40	0.45 a 0.75	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.03	0.50

Asimismo, la tabla 2.11 muestra las propiedades mecánicas para electrodos sólidos y varillas según AWS A5.18 (ver anexo I).

Tabla 2.11 Propiedades mecánicas para electrodos sólidos y varillas según AWS A5.18 (AWS 2001:4)

Clasificación AWS	Esfuerzo de Tracción (mínimo)		Esfuerzo de Fluencia (mínimo)		Porcentaje de Elongación (mínimo)
	psi	MPa	psi	Mpa	
A 5.18					
ER70S-3	70000	480	58000	400	22

Como se mencionó anteriormente, se ha asignado un F-No. a las varillas con clasificación AWS A5.18. La tabla 2.12 muestra el F-No (ver anexo J).

Tabla 2.12 F-No. del consumible ER70S-3 según Tabla de Electrodo y Varillas para Calificación de ASME IX (ASME 2010:134)

F-No.	Especificación ASME	Clasificación AWS
6	SFA 5.18	Todas las clasificaciones

2.3.4.2. Material de aporte en proceso SMAW

El proceso SMAW fue empleado para las pasadas posteriores. En este caso se empleó un electrodo E8018-C3. Al igual que en el proceso GTAW, se ha previsto no superar los 13 mm de espesor de material depositado por cada pasada. La figura 2.4 muestra la designación de los electrodos según AWS A5.5.



Fig. 2.4 Designación de electrodos según AWS A5.5 (AWS 1996:31)

Las características de este electrodo son las siguientes:

- Su composición química es similar a la de un acero de baja aleación al níquel
- El metal depositado es bastante resistente a las fisuras en frío y caliente.
- Sus depósitos son de excelente calidad radiográfica en cualquier posición.

A continuación, la tabla 2.13 muestra las corrientes de trabajo recomendadas según el diámetro del electrodo.

Tabla 2.13 Valores de corriente en función del diámetro del electrodo (EXSA 2014:131)

Diámetro	3/32"	1/8"	5/32"
	2.5 mm	3.25 mm	4.0 mm
Amperaje mínimo	70	110	140
Amperaje máximo	100	160	200

Asimismo, la tabla 2.14 muestra los requerimientos de composición química para este electrodo según AWS A5.5 (ver anexo K).

Tabla 2.14 Requerimientos de composición química para electrodos según AWS A5.5 (AWS 1996:4)

Clasificación AWS	Porcentaje en peso (%)								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
A 5.5	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.
E8018-C3	0.12	0.40 a 1.25	0.80	0.03	0.03	0.80 a 1.10	0.15	0.35	0.05

Además, la tabla 2.15 muestra las propiedades mecánicas para los electrodos de este tipo según AWS A5.5 (ver anexo L).

Tabla 2.15 Propiedades mecánicas para electrodos sólidos y varillas según AWS A5.18 (AWS 1996:6)

Clasificación AWS	Esfuerzo de Tracción (mínimo)		Esfuerzo de Fluencia (mínimo)		Porcentaje de Elongación (mínimo)
	psi	MPa	psi	MPa	
A 5.5					
E8018-C3	80000	550	68000 a 80000	470 a 550	24

Por otro lado, al igual que con el proceso GTAW, el código ASME sección IX ha asignado un F-No. a los electrodos con clasificación AWS A5.5. La tabla 2.16 muestra el F-No (ver anexo M).

Tabla 2.16 F-No. del electrodo E8018-C3 según Tabla de Electrodo y Varillas para Calificación de ASME IX (ASME 2010:134)

F-No.	Especificación ASME	Clasificación AWS
4	SFA 5.5	E(X)XX18-X

2.3.5. Posición

2.3.5.1. Posición de la ranura

Se realizó la probeta de soldadura usando la posición de prueba 5G que consiste en colocar el eje del anillo y de la tubería de forma horizontal sin rotarlos (ver figura 2.5). Este parámetro no constituye una variable esencial del proceso, por lo tanto, el procedimiento utilizado aplica para todas las posiciones.

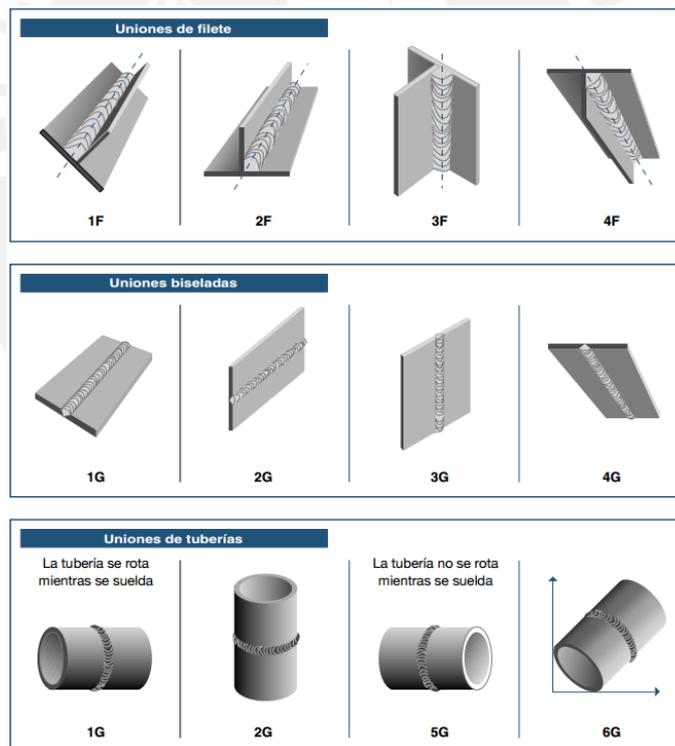


Fig 2.5 Posiciones en soldadura (INDURA 2007:16)

2.3.5.2. Progresión de soldadura

Fue realizada de forma vertical ascendente según la especificación del electrodo.

2.3.6. Tratamiento térmico post-soldadura

No se realizó tratamiento térmico post-soldadura para la junta soldada, por disposición del proyecto, debido a las condiciones de servicio a las que estarían destinadas la juntas soldadas con el procedimiento elaborado.

2.3.7. Pre calentamiento

Para el cálculo de la temperatura de pre calentamiento se empleó el Método de Control de Hidrógeno (Fosca 2007:153).

Primero se procede a calcular el valor del parámetro de composición (PCM) el cual se calcula de la misma forma que el carbono equivalente en la ecuación 1.2.

En el caso del acero API 5L X70 PSL1, el parámetro de composición viene dado por:

$$PCM = C + \frac{SI}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$PCM = 0.09 + \frac{0.23}{30} + \frac{0.88}{20} + \frac{0.136}{20} + \frac{0.36}{60} + \frac{0.17}{20} + \frac{0.119}{15} + \frac{0.048}{10} + 5(0)$$

$$PCM = 0.176$$

En el caso del acero ASTM A707 L5 F65, el parámetro de composición viene dado por:

$$PCM = C + \frac{SI}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$PCM = 0.03 + \frac{0.07}{30} + \frac{1.1}{20} + \frac{1.1}{20} + \frac{0.88}{60} + \frac{0.63}{20} + \frac{0.44}{15} + \frac{0.006}{10} + 5(0)$$

$$PCM = 0.218$$

De los dos parámetros de composición obtenidos, tomamos el PCM=0.218 correspondiente al acero ASTM A707 L5 F65 ya que sugiere una condición menos favorable para la soldadura.

Por otra parte, es necesario conocer el nivel de hidrógeno difundido durante la ejecución del cordón de soldadura. Se definen tres niveles de hidrógeno:

- H1 Extra bajo hidrógeno

- H2 Bajo hidrógeno
- H3 Hidrógeno no controlado

La tabla 2.17 muestra la cantidad de hidrógeno difundible para cada nivel:

Tabla 2.17 Hidrógeno difundible por cada 100 g de metal depositado

Nivel de Hidrógeno	H
H1	5 ml/100g
H2	10 ml/100g
H3	30 ml/100g

Para este caso, consideramos un nivel de hidrógeno H2, debido a los consumibles empleados durante la soldadura.

Una vez dispuestos el PCM y el nivel de hidrógeno, es posible determinar el índice de susceptibilidad a la fisuración, el cual viene determinado por la siguiente expresión:

$$\text{Índice de susceptibilidad} = 12 PCM + \text{Log}H \quad (2.1)$$

Reemplazando en la ecuación 2.1 se tiene:

$$\text{Índice de susceptibilidad} = 12 \times 0.218 + \text{Log}10 = 3.616$$

Con el índice de susceptibilidad a la fisuración y conociendo el espesor a soldar se puede ingresar a la tabla del anexo N, considerando un nivel de restricción Alto (debido a que se trata de uniones de considerable espesor), y obtener la temperatura mínima de precalentamiento e interpase.

En este caso se obtuvo una temperatura mínima de 115°C.

2.3.8. Gas de protección

- Gas de protección: Argón
- Composición de la mezcla (%): 99.9 % Argón
- Caudal: 8 - 15 L/min

2.3.9. Características eléctricas

Los valores de amperaje, polaridad y voltaje que se indicaron en la especificación de procedimiento de soldadura fueron extraídos de la descripción y recomendaciones de fabricantes para cada electrodo utilizado. En ambos procesos se utilizó corriente directa. En el proceso GTAW se utilizó la polaridad directa; es decir, el electrodo conectado al polo negativo, mientras que en el proceso SMAW se utilizó polaridad inversa. Asimismo en el proceso GTAW se empleó un electrodo de tungsteno de 2.4 milímetros.

- Rango de amperaje: 80 – 120 A para GTAW y 90 – 200 A para SMAW.
- Rango de Voltaje: 8 – 18 V para GTAW y 20 – 30 V para SMAW.

2.3.10. Técnica

- Cordón simple u oscilado: Simple, para disminuir la posibilidad de agrietamiento en caliente.
- Oscilación: Máxima de 8mm
- Dimensión de la boquilla de gas: 10 mm
- Distancia de tubo a pieza: 15 mm
- Limpieza inicial y entre pasadas: Cepillado y amolado con esmeril de piedra.
- Electrodo simple o múltiple: Simple, según los procesos empleados.
- Pasada simple o múltiple: Múltiple. El pase de raíz se realizó con GTAW. Los pases de relleno se realizaron con SMAW.

2.4. Ejecución del cordón de soldadura

- **Limpieza y preparación de la junta**

El área a soldar que se limpió incluyó los bordes de la junta y aproximadamente 5cm (2 pulg.) de la superficie adyacente para así evitar defectos en la soldadura tales como fisuras, porosidad o falta de fusión. Después de limpiadas, las juntas fueron cubiertas, hasta realizar la soldadura. Las figuras 2.6 y 2.7 muestran cómo eran preparados los bordes tanto en la tubería como en el anillo.



Fig. 2.6 Limpieza y preparación de bordes del tramo de tubería API 5L X70 PSL1



Fig. 2.7 Limpieza y preparación de bordes del anillo ASTM A707 L5 F65

- **Posicionamiento de las piezas a soldar**

La figura 2.8 ilustra cómo se realiza el posicionamiento de ambas piezas. Para lograr esto se hizo uso de un teclé. La idea es que los ejes de ambos componentes coincidan.



Fig. 2.8 Posicionamiento de las piezas a soldar con ayuda de un tecele

- **Pre calentamiento**

El pre calentamiento se realizó con un soplete. El calentamiento entre pasadas se realizaba cada vez que un electrodo se consumía en su totalidad antes de reemplazarlo por un nuevo electrodo. Se verificó tanto la temperatura de pre calentamiento como la temperatura entre pases con un medidor infrarrojo de temperatura el cual es mostrado en la figura 2.9. Esto se llevó a cabo proyectando el haz infrarrojo sobre los metales base a una distancia de dos pulgadas a ambos lados del cordón



Fig. 2.9 Medidor infrarrojo de temperatura

- **Apuntalado**

El apuntalado o tack-weld es el punto de soldadura que sirve para sujetar la junta de forma preliminar antes de ejecutar las pasadas que conforman el cordón de soldadura final. Este apuntalado es realizado con el proceso GTAW por los mismos soldadores que se encargaron posteriormente de hacer los pases de soldadura. La figura 2.10 muestra como se hizo el apuntalado en esta unión soldada.



Fig. 2.10 Apuntalado

- **Ejecución de pases**

En la figura 2.11 se puede apreciar cómo los soldadores se encuentran ejecutando los pases correspondientes. Asimismo, en la figura 2.12 se puede observar cómo quedó finalmente el cordón de soldadura.



Fig. 2.11 Ejecución de pases

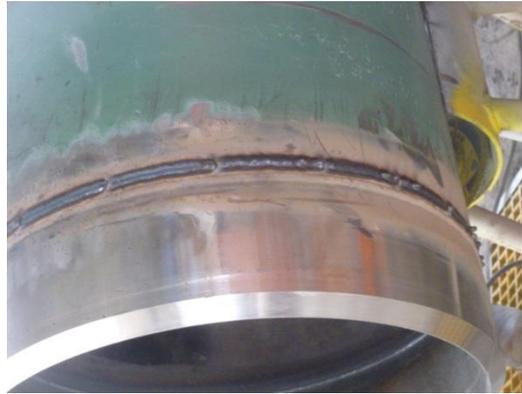


Fig. 2.12 Cordón de soldadura final

Toda la soldadura se realizó siguiendo el WPS elaborado. Se realizó la soldadura de ambos elementos en la ciudad de Pisco por soldadores ya calificados. Los parámetros utilizados fueron registrados en un formato de control de soldadura, para la posterior elaboración del PQR. La temperatura entre pases fue registrada con un pirómetro.

2.5. Elaboración de registro de calificación de procedimiento (PQR)

Para la elaboración del Registro de Calificación de Procedimiento (PQR) de los materiales API 5L X70 PSL1 y ASTM A707 L5 F65, una vez soldado el espécimen de prueba en base al WPS elaborado, con los ensayos requeridos por el Código ASME sección IX y con ensayos complementarios realizados, se procedió a evaluar los resultados obtenidos y a documentarlos en el formato para PQR recomendado por la sección IX del código ASME.

2.5.1. Ensayos destructivos aplicados a la junta soldada

Los ensayos destructivos correspondieron a las pruebas mecánicas requeridas por la sección IX del Código ASME para la calificación de procedimientos de soldadura, específicamente, ensayos de tracción, doblez guiado y de impacto, cuyos resultados fueron plasmados en el registro de calificación de procedimiento o PQR.

Se utilizaron 2 muestras del cupón soldado para el ensayo de tracción y 4 probetas para ensayo de doblez guiado lateral, por requerimiento del código ASME sección IX.

La cantidad y tipos de ensayos practicados se pueden obtener a partir de la tabla mostrada en el anexo G.

La figura 2.13 muestra un croquis de cómo se extraen las probetas para los ensayos correspondientes.

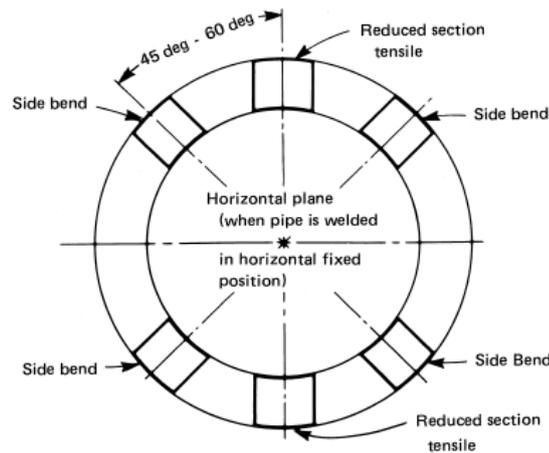


Fig. 2.13 Disposición de probetas de ensayos de tracción y doblado para calificación de WPS (ASME 2010:179)

2.5.1.1. Ensayo de tracción

Según requerimientos del código ASME sección IX, en la Figura 2.14 se muestran las dimensiones que aplican para las dos probetas que se emplearán en el ensayo de tracción. Estas dimensiones pueden verificarse en el anexo O.

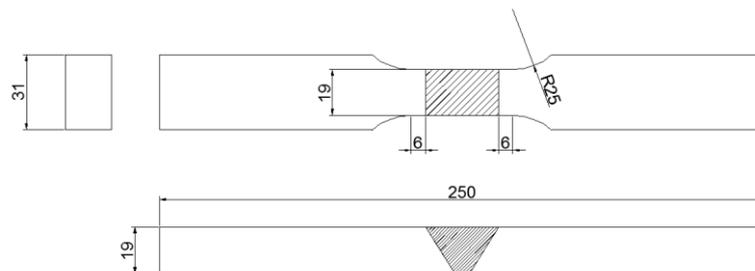


Fig. 2.14 Configuración de probeta para ensayo de tracción

La probeta sometida a tracción fue llevada a la ruptura bajo una carga de tensión. La resistencia a la tracción se calculó al dividir la carga total de rotura por el área de la sección recta más pequeña de la pieza, siendo un cálculo realizado por mediciones reales antes de que la carga fuera aplicada.

2.5.1.2. Ensayo de doblez guiado transversal

Siguiendo las especificaciones de ASME sección IX, se prepararon especímenes para prueba de doblez guiado mediante el corte del tubo de prueba para formar probetas de sección recta aproximadamente rectangular. Las superficies de corte designaron los lados de la pieza. Las otras dos superficies fueron llamadas superficies de cara y de raíz, teniendo la superficie de cara el mayor ancho de soldadura. La figura 2.15 ilustra las dimensiones de la probeta empleada para el ensayo de doblez lateral.

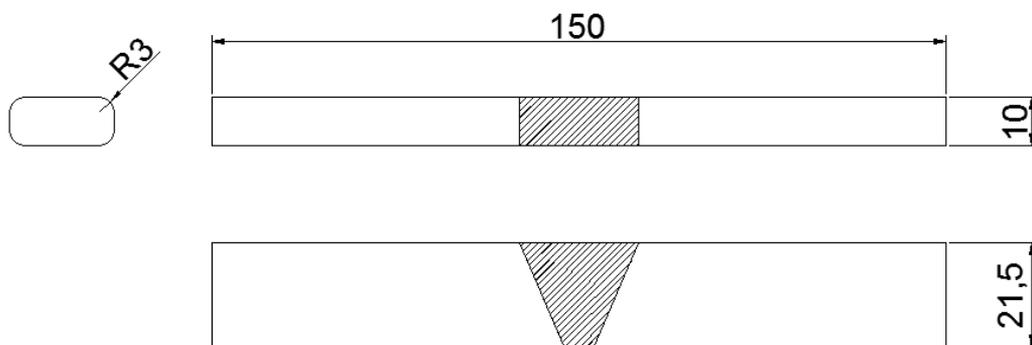


Fig. 2.15 Configuración de probeta para ensayo de doblez lateral

Estas medidas se pueden verificar en el anexo P. Los especímenes de prueba de doblez guiado se doblaron en un dispositivo de prueba según el anexo Q. El espécimen fue obligado a entrar en el dado mediante la aplicación de una carga sobre el émbolo.

2.5.1.3. Ensayo de impacto

En este estudio, por requerimiento del proyecto, se hicieron ensayos de impacto sobre la unión soldada ya que la misma estará sometida a temperaturas relativamente bajas. Según el código ASME sección IX las probetas para prueba de impacto se deben extraer de la zona sombreada mostrada en la figura 2.16.

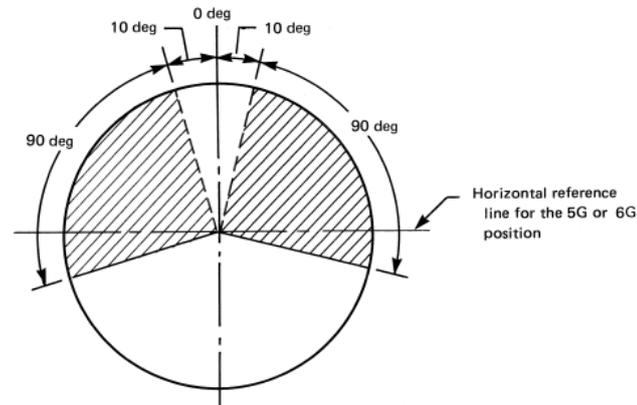


Fig. 2.16 QW-463.1: Ubicación de probetas para ensayo de impacto (ASME 2010:180)

Asimismo, la configuración de las probetas para el ensayo de impacto fue como se ilustra en la figura 2.17.

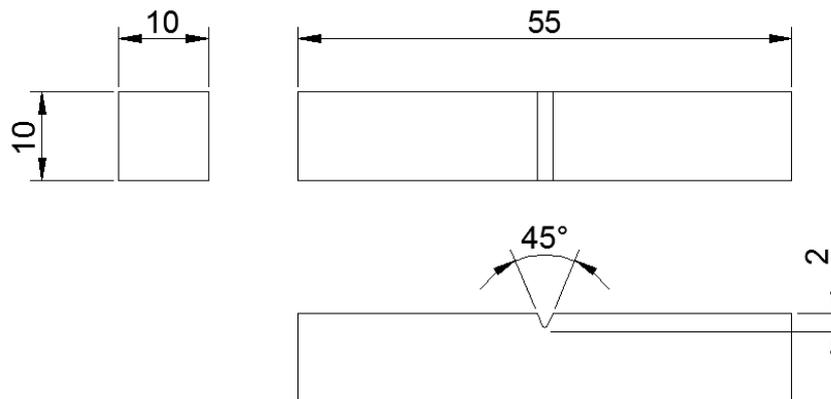


Fig. 2.17 Configuración de probeta para ensayo de impacto

2.5.1.4. Análisis químico del cordón de soldadura

El análisis químico por espectrometría de emisión óptica permite determinar los elementos presentes en una muestra así como el porcentaje de cada uno de ellos. Este método consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa. El estándar más conocido para este tipo de análisis en materiales metálicos es el ASTM-E415. Este se considera el método más exacto.

2.5.1.5. Macrografía

La Macrografía es un método que permite observar discontinuidades o defectos en los materiales con la ayuda de un microscopio a aumentos no mayores de 5x. Las probetas utilizadas en esta prueba son de varias formas y tamaños, pero siempre se apegan a los estándares requeridos de forma estricta.

2.5.2 Otros ensayos

2.5.2.1. Análisis químico de los metales base

Se realizó mediante el método de espectrometría de emisión óptica con la finalidad de determinar la composición química de los materiales base y verificar que la misma esté acorde a la especificación técnica correspondiente.

2.5.2.2. Ensayo de tracción a los metales base

Estos ensayos se llevaron a cabo con la finalidad de determinar las propiedades mecánicas de los materiales base y verificar que las mismas estén acorde a la especificación técnica correspondiente.

2.5.2.3. Inspección visual

La inspección visual se realizó durante toda la fabricación de las probetas, al cordón de soldadura entre pases y al acabado final de la soldadura, de manera de detectar cualquier discontinuidad en la soldadura como falta de penetración, porosidad, socavaciones, falta de fusión, entre otros.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo permiten determinar si se valida el procedimiento elaborado para la soldadura de los aceros ASTM A707 L5 F65 y API 5L X70 PSL1.

Dichos resultados están dispuestos de la siguiente forma:

- Especificación de procedimiento de soldadura (WPS)
- Registro de calificación de procedimiento (PQR)

3.1. Especificación de procedimiento de soldadura (WPS)

La especificación de procedimiento de soldadura elaborada bajo los requerimientos del código ASME IX, para la soldadura de la junta entre aceros ASTM A707 L5 F65 y API 5L X70 PSL1, se muestra a continuación en la Tabla 3.1 en un formato establecido para la aplicación de dos procesos de soldadura.

La especificación se realizó con finalidad de que representara tanto una guía para el soldador como un procedimiento que garantizara la confiabilidad de los resultados obtenidos y, por ende, de la unión soldada que posteriormente sería corroborado por las pruebas mecánicas. Como el procedimiento de soldadura fue calificado, el WPS elaborado fue aprobado para ser utilizado en la fabricación de la junta soldada que se menciona líneas arriba. De igual manera, considerando las variables esenciales del

proceso requeridas por la sección IX de ASME, el WPS representó un procedimiento maestro para elaborar, en caso de ser necesario, especificaciones con otras variables no esenciales, como por ejemplo, posición de la junta o un electrodo distinto perteneciente al mismo grupo de los metales de aporte calificados.

Tabla 3.1 Especificación de procedimiento de soldadura (Parte 1 de 3)

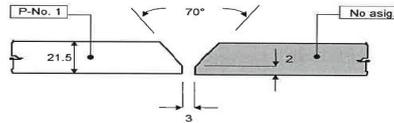
PROCESO DE SOLDADURA: Welding Process (es)		GTAW/SMAW		TIPO(S): Type(s)	MANUAL	
JUNTAS (QW-402):						
DISEÑO DE JUNTA: Joint Design						
RESPALDO: Backing	YES: - NO: X	MATERIAL DE RESPALDO (Tipo): Backing Material (Type)		GTAW NO / SMAW metal de soldadura –weld metal		
METAL BASE (QW-403) / Base Metals						
SN ^o :	1	Gr. N ^o :	TODOS		A SN ^o :	1
ESPECIFICACION TIPO Y GRADO: Specification Type and Grade		N/A		A ESPECIFICACION TIPO Y GRADO: to Specification Type and Grade		API 5L X70 A707 L5 F65
COMP. QUIMICA Y PROP. MECANICAS: Chemical Composition and Mechanical Properties			NA		A...COMP. QUIMICA Y PROP. MECANICAS: to Chemical Composition and Mechanical Properties	
RANGO DE ESPESORES(mm) Thickness Range	BISEL: Groove	5 mm	A To	31.75 mm	FILETE: Fillet	TODOS / ALL
RANGO DIAMETRO TUBO: Pipe Diameter Range		ALL				
METAL DE APORTE (QW-404) / Filler Metals						
			GTAW		SMAW	
ESPECIFICACION N° SFA / SFA Specification			5.18		5.5	
AW SN° (CLASE) / AWS N° (Class)			ER70S-3		E8018-C3	
F N°:			6		4	
A N°:			1		10	
MEDIDAS METALES DE APORTE / Size of Filler Metal (mm)			2.4		2.5/ 3.25 / 4 / 4.8	
RANGO DE ESPESORES (mm) Thickness Range	BISEL / Groove máx mm		8		27	
	FILETE / Fillet		TODOS		TODOS	
No superar los 13 mm por pasada / Do not exceed 13 mm per pass						
NOMBRE COMERCIAL DEL FUNDENTE / Flux Trade Name			NA		NA	
NOMBRE COMERCIAL DEL ELECT. / Electrode Trade Name			NA		NA	
ELECTRODO – FUNDENTE (CLASE) / Electrode – Flux (Class)			NA		NA	

Tabla 3.1 Especificación de procedimiento de soldadura (Parte 2 de 3)

POSICIONES / Positions (QW-405)		TRAT. TERMICO POST-SOLDADURA Post Weld Heat Treatment (QW-407)			
POSICIONES DE JUNTA: Groove Positions:	TODAS / ALL	RANGO DE TEMPERATURA (°C): Temperature Range		NA	
PROGRESION DE SOLDADURA: Welding Progresión	ASCENDENTE / Uphill	RANGO DE TIEMPO (h): Time Range		NA	
POSICIONES DE FILETE: Fillet Positions	TODAS / ALL	OTROS: Others		NA	
PRECALENTAMIENTO / Preheat (QW-406)		GAS (QW-408)			
TEMP. PRECALENT. MIN. (°C): Minimum Preheat T°	115°C	COMPOSICION PORCENTUAL Percent Composition			
Notas: (Notes)		GAS (ES) / Gas (es)	MEZCLA / Mixture	CAUDAL/ Flow Rate	
TEMP. ENTRE PASADAS MAX. (°C): Maximum Inter-Pass Temperature	MAX 250 °C	PROTECCION Shielding GTAW	ARGON	99.99 %	8-15 L/min
		PROTECCION Shielding FCAW -GS	N/A	N/A	N/A
		RESPALDO Backing	NA	NA	NA
MANTENIMIENTO DE PRECALENTAM.: Preheat Maintenance	NA	NOTA / Note:			
CARACTERISTICAS ELECTRICAS / Electrical Characteristics (QW-409)					
CORRIENTE : Current	CC	POLARIDAD: Polarity	(-) GTAW (+) SMAW		
AMPERAJE (RANGO): Amp. (Range)	Ver tabla 3.2 – see table 3.2–	VOLTAJE (RANGO): Voltage (Range)	Ver tabla 3.2 –see table 3.2–		
ELECTRODO DE TUNGSTENO – DIAMETRO Y TIPO: Tungsten Electrode – Diameter and Type	EW Th-2 / Ø2.4MM				
MODO DE TRANSFERENCIA METALICA : Mode of Metal Transfer	NA				
TECNICA / Technique (QW-410)					
CORDON SIMPLE U OSCILADO: String or W eave Bead	AMBOS / BOTH	OSCILACION: Oscillation	Max 8 mm		
DIMENSION DE LA BOQUILLA DE GAS: Orifice or Gas Cup Size	10 mm	DISTANCIA TUBO PIEZA: Contact Tube to W ork Distance	15 mm		
LIMPIEZA INICIAL Y ENTRE PASADAS (CEPILLADO, ESMERILADO, ETC): Initial and Inter-pass Clearing (Brushing, Grinding, etc.)	AMOLADO Ó CEPILLADO.		Grinding or brushing.		
METODO DE SANEADO DE RAIZ: Method of Back Gouging.	NA	ELECTRODO (S) SIMPLE O MULTIPLE: Multiple or Single Electrodes	SIMPLE / Single		
PASADA (S) SIMPLE O MULTIPLE (POR LADO): Multiple or Single Pass (per Side)	MULTIPLE	MARTILLADO: Peening	NO		

Tabla 3.1 Especificación de procedimiento de soldadura (Parte 3 de 3)

NÚMERO DE CAPAS/ Layer Number	PROCESO/ Process	METAL DE APORTE/ Filler Metal		CORRIENTE / Current		RANGO DE VOLTAJE / Voltage Range	VELOCIDAD DE AVANCE / Avance Travel Speed cm/min	NOTAS/ Notes
		CLASE/ Class	DIÁMETRO / Diameter (mm)	POLARIDAD / Polarity	RANGO AMP. / Amp. Range			
1	GTAW	ER70S-3	2.4	CC (-)	80 - 120	8 - 18	4 - 14	NA
2 - N	SMAW	E8018-C3	2.5/ 3.25 / 4 / 4.8	CC (+)	90 - 200	20 - 30	6 - 14	NA

3.2. Registro de calificación de procedimiento (PQR)

Los resultados obtenidos para el cupón soldado se muestran en la tabla 3.2, en el formato utilizado para el PQR según las especificaciones del código ASME sección IX. Se verificó los ensayos mecánicos realizados a las probetas que se cumplieron los requerimientos del código ASME Sección IX. Debido a que el material estaría sometido a temperaturas por debajo de los 0°C se realizaron ensayos de impacto para la calificación de procedimiento. Adicionalmente, el PQR contiene los resultados del análisis de composición química obtenido con un espectrómetro de emisión óptica, los cuales arrojaron la composición resultante del cordón de soldadura.

Cabe destacar que los ensayos de análisis químico y de tracción a los metales base e inspección visual, a pesar de no aparecer explícitamente en el PQR, fueron necesarios para garantizar calidad de la junta fabricada. De igual manera, los resultados de los ensayos de impacto y análisis químico aplicados a la junta, a pesar de no ser requeridos de forma obligatoria para la calificación del procedimiento por la sección IX del Código ASME, están relacionados con las variables y procesos utilizados en la especificación de procedimiento de soldadura utilizada y permitieron un análisis complementario de la junta soldada. A continuación se muestra el PQR resultante.

Tabla 3.2 Registro de calificación de procedimiento (Parte 1 de 3)

PROCESOS DE SOLDADURA WELDING PROCESSES	GTAW	SMAW	GMAW	SAW	TYPE(S)	MANUAL	SEMIAUTOMATIC	MACHINE
Junta / JOINTS (QW-402)								
ALL DIMENSIONS ARE EXPRESSED IN mm / Todas las dimensiones están expresadas en mm.								
Material Base / BASE METALS (QW-403)					Tratamiento Térmico Post-Soldadura POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)			
Espec. Mat./ Mat. Spec. Tipo o Grado / Type or Grade: API 5L X70 to A707 L5 F65					Temperatura / Temperature: NA			
P N° - To P N° -					Tiempo / Time: NA			
Espesor de Cupón / Thickness of Test Coupon: 21,5 mm					Otros / Other: NA			
Diámetro del Cupón / Diameter of Test Coupon: 24"								
Otros / Other:					GAS (QW-408)			
					Gas(es)	Mixture (%)	Flow Rate (l/min)	
Metal de Aporte / FILLER METALS (QW-404)					Protección / Shielding: Argón			
					Respaldo / Backing: NA			
					Arrastre / Trailing: NA			
					Otros / Other: NA			
					Características Eléctricas ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)			
					Corriente / Current: VER TABLA/SEE TABLE			
					Polaridad / Polarity: VER TABLA/SEE TABLE			
					Amps: VER TABLA/SEE TABLE Volts: VER TABLA/SEE TABLE			
					Diámetro del Tungsteno / Tungsten Electrode Size: NA			
					Otros / Other: NA			
Posición / POSITION (QW-405)					Técnica / TECHNIQUE (QW-410)			
Clasificación / Classification: 5G					Velocidad de Avance / Travel Speed: VER TABLA/SEE TABLE			
Progresión / Progression: Ascendente								
Otros / Others:								
Pre-Calentamiento / PREHEAT (QW-406)					Cordones Rectos u Osilantes / String or Weave Bead: Oscilado/Weaved			
Temperatura de Pre-Calentamiento Preheat Temperature: 115 °C					Osilación / Oscillation: 3 a 5mm			
					Pasadas Múltiples o simples Multipass or Single Pass (per side): Múltiples			
Temperatura entre Pasadas Interpass Temperature: 200°C					Electrodo Simple o Múltiple / Single or Multiple Electrode: Simple			
Otros / Other:					Otros / Other:			

Tabla 3.2 Registro de calificación de procedimiento (Parte 2 de 3)

Ensayo de Tracción / TENSILE TEST (QW-150)						
Specimen No. [QW-462.1(b)]	Anchura/ Width (mm)	Espesor/ Thickness (mm)	Area (mm ²)	Carga Total / Total Load [kN]	Tensión/ Tension [MPa]	Tipo de Falla y Locación / Type of Failure and Location
1	20.27	19.2	289.2	228.5	587	Metal Base API 5L X70
2	20.15	18.9	380.8	223.4	587	Metal Base API 5L X70
Ensayo de Plegado / GUIDED-BENT TESTS (QW-160)						
Tipo y número de figura / Type and Figure No.				Resultado / Result		
Doble Lateral 1				Sin discontinuidades relevantes		
Doble Lateral 2				Sin discontinuidades relevantes		
Doble Lateral 3				Sin discontinuidades relevantes		
Doble Lateral 4				Sin discontinuidades relevantes		
Ensayo de Impacto / TOUGHNESS TESTS (QW-170)						
Specimen No.	Ubicación entalla / Notch Location	Tamaño probeta / Specimen Size (mm)	Temperatura de ensayo / Test Temperature (°C)	Valores de Impacto / Impact Values (Joules)		
1	ZAC API 5L X70	10x10x55	-30	210.6		
2	ZAC API 5L X70	10x10x55	-30	124.2		
3	ZAC API 5L X70	10x10x55	-30	273.6		
4	METAL DE SOLDADURA	10x10x55	-30	1312		
5	METAL DE SOLDADURA	10x10x55	-30	122.8		
6	METAL DE SOLDADURA	10x10x55	-30	177.6		
7	ZAC A707 L5 F65	10x10x55	-30	162		
8	ZAC A707 L5 F65	10x10x55	-30	240.4		
9	ZAC A707 L5 F65	10x10x55	-30	336		
Comentarios / Remarks:						
Ensayo del Metal de Aporte / FILLET-WELD TEST (QW-180)						
Resultado Satisfactorio / Result - Satisfactory (Yes / No): -				Penetración en Metal Base Penetration into Parent Metal (Yes / No): -		
Resultados Macro / Macro - Results: -						
Otros Ensayos / OTHER TESTS						
Tipo de Ensayo / Type of Test				Resultado / Result		
Análisis químico de cordón de soldadura				Metal de aporte compatible con AWS A5.5 E8018-C3		
Macrografía				Sin defectos relevantes		

Tabla 3.2 Registro de calificación de procedimiento (Parte 3/3)

DATOS DE LA SOLDADURA / Welding Data													
Pasada / Pass	Proceso/ Process	Equipo/ Machine	Metal de Aporte / Filler Metal			Gas							
			Fabricante/ Manufacturer	Class/ Class	AWS	Denominación / Denomination				% de la Mezcla / % Mixture			
Raíz / Root	GTAW	Invertec V350	EXSA	ER70S3	5,18	Argon				99,9			
Caliente / Hot	SMAW	Invertec V350	EXSA	E8018 C3	5,5	N/A				N/A			
Relleno / Filling	SMAW	Invertec V350	EXSA	E8018 C3	5,5	N/A				N/A			
Cobertura / Cover	SMAW	Invertec V350	EXSA	E8018 C3	5,5	N/A				N/A			

DATOS DE SOLDADORES / Welder Data														
Pasada / Pass	Cuiño/Nombre / Tag			Cuiño/Nombre / Tag										
Raíz	560	Wilmer Seclen			---									
Caliente / Hot	560	Wilmer Seclen			---									
Relleno / Filling	560	Wilmer Seclen			---									
Cobertura / Cover	560	Wilmer Seclen			---									

PARÁMETROS de la SOLDADURA / Operative Variables													
Pasada / Pass	Diam mm	Corriente / Current		Voltaje/ Voltage [Volt]	Vel / Speed (cm/min)	Dirección/ Direction		Polaridad / Polarity		Temperatura / Temperature		Oscilación/ Oscillation (mm)	Stickout (mm)
		Min.	Max.			Desc / D↓	Asc / U↑	(+)	(-)	Inicial/ Initial	Final/ Final		
1	3.2	90	99	10-12	8,4	---	x	x	x	100	112	3	---
2	3.2	95	103	23-24	9,5	---	x	x	x	170	221	3	---
3	3.2	102	106	23-25	10,2	---	x	x	x	180	234	3	---
4	3.2	98	104	23-26	10,9	---	x	x	x	209	228	5	---
5	3.2	110	116	23-27	11,5	---	x	x	x	201	225	5	---
6	3.2	115	119	23-28	11,2	---	x	x	x	210	233	5	---
7	3.2	120	122	23-29	10,8	---	x	x	x	203	240	5	---
8	3.2	118	120	23-30	11,3	---	x	x	x	211	234	5	---
9	3.2	120	125	22-25	10,5	---	x	x	x	198	245	5	---
10	3.2	120	125	23-30	10,1	---	x	x	x	201	239	5	---
11	3.2	110	115	21-26	11,4	---	x	x	x	199	246	5	---
12	3.2	120	128	23-27	12,7	---	x	x	x	203	236	5	---
13	3.2	121	128	23-28	12,3	---	x	x	x	213	231	5	---
14	3.2	123	126	23-26	12,8	---	x	x	x	211	239	4	---
15	3.2	122	127	23-29	11,9	---	x	x	x	210	241	4	---
16	3.2	120	126	20-26	10,4	---	x	x	x	198	238	4	---
17	3.2	121	125	21-27	10,9	---	x	x	x	220	235	4	---

JOINTS (QW-402)

DIMENSION ARE EXPRESSED IN (mm)

El presente análisis tiene como objeto valorar e interpretar los resultados del estudio realizado a través del desarrollo experimental para evaluar características mecánicas y sanidad del material base y el material depositado en la junta.

Inicialmente se ejecutó el análisis con los resultados consignados en el registro de calificación del procedimiento (PQR), basados en los criterios de aceptación de las pruebas no destructivas descritos en la sección IX del código ASME.

3.2.1. Ensayos destructivos aplicados a la junta soldada

3.2.1.1. Ensayo de tracción

Se realizaron dos ensayos de tracción. El esfuerzo de tracción de la soldadura debe ser superior o igual al esfuerzo de tracción mínimo especificado del material. En este estudio, al tratarse de una unión disímil, el esfuerzo de tracción de la soldadura debe ser superior o igual al esfuerzo de tracción mínimo especificado entre ambos materiales. En este caso, el metal base que posee menor esfuerzo de tracción según su especificación técnica es el API 5L X70 con 82.7 ksi (570 MPa).

Tabla 3.3 Comparación de esfuerzos de tracción

Esfuerzo de tracción API 5L X70 PSL1	Esfuerzo de tracción ensayo T1	Esfuerzo de tracción ensayo T2
570 MPa	587 MPa	587 MPa

Según muestra la tabla 3.3, el ensayo reveló que el esfuerzo de tracción del cordón de soldadura fue el esperado, ya que superó los 570 MPa que era la resistencia a la tracción mínima entre ambos metales base, mientras que el esfuerzo máximo de tracción para cada probeta fue de 587 MPa.

La fractura se presentó en el metal base y no sobre el cordón de soldadura, confirmando de esta manera que la resistencia del metal de soldadura presentó un buen comportamiento por lo cual podemos afirmar que el procedimiento elaborado es aprobado.

La resistencia a la tracción se calculó dividiendo la máxima carga de falla por la mínima área transversal de la probeta a ensayar antes de aplicarle la carga.

3.2.1.2. Ensayo de doblado

Se realizaron cuatro ensayos de doblez lateral. Su análisis se realizó bajo el criterio de aceptación para los ensayos de doblez del código ASME sección IX. Los ensayos de doblez lateral se consideraron aceptables ya que no se hallaron defectos relevantes debido a que no se encontró en la superficie grietas u otros defectos que superaran 1/8”

(3 mm). Asimismo, se pudo constatar que la ductilidad en la zona de la soldadura se conserva.

3.2.1.3. Ensayo de impacto

Como se mencionó en el capítulo anterior, el ensayo de impacto no es un requerimiento establecido por el código ASME sección IX; sin embargo, en este estudio sí se consideró someter al cupón de soldadura a pruebas de impacto, ya que las condiciones de servicio del cordón de soldadura serán tales que experimentará temperaturas por debajo de los 0°C. El criterio de aceptación de este ensayo se basa en la especificación del acero API 5L X70.

Tabla 3.4 Requerimientos de absorción de energía a 0°C (API 2013:35)

Specified outside diameter <i>D</i> mm (in)	Full-size CVN absorbed energy, minimum						
	K_V J (ft·lbf)						
	Grade						
	≤ L415 or X60	> L415 or X60 to ≤ L450 or X65	> L450 or X65 to ≤ L485 or X70	> L485 or X70 to ≤ L555 or X80	> L555 or X80 to ≤ L625 or X90	> L625 or X90 to ≤ L690 or X100	> L690 or X100 to ≤ L830 or X120
≤ 508 (20.000)	27 (20)	27 (20)	27 (20)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)
> 508 (20.000) to 762 (30.000)	27 (20)	27 (20)	27 (20)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)
> 762 (30.000) to 914 (36.000)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	54 (40)	54 (40)
> 914 (36.000) to 1 219 (48.000)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	54 (40)	68 (50)
> 1 219 (48.000) to 1 422 (56.000)	40 (30)	54 (40)	54 (40)	54 (40)	54 (40)	68 (50)	81 (60)
> 1 422 (56.000) to 2 134 (84.000)	40 (30)	54 (40)	68 (50)	68 (50)	81 (60)	95 (70)	108 (80)

Como se puede observar en la tabla 3.4, a 0°C para un acero de grado menor o igual a X70 con diámetro entre 20 y 30 mm, el mínimo valor de energía absorbida requerida en un ensayo de impacto es igual a 27 J.

De acuerdo a lo mostrado en el PQR (Tabla. 3.2 parte 2/3), se realizaron nueve ensayos de impacto en total. Tres se realizaron tomando probetas del metal de soldadura y los

otros seis fueron realizados tomándolas de los metales base. Asimismo, todos los ensayos fueron ejecutados a una temperatura de -30°C .

Tabla 3.5 Energía absorbida en ensayo de impacto (J)

Temperatura 0°C	Especificación API 5L	27
Temperatura -30°C	Metal de soldadura 1	131.2
	Metal de soldadura 2	122.8
	Metal de soldadura 3	177.6
	ZAC API 5L 1	210.6
	ZAC API 5L 2	124.2
	ZAC API 5L 3	273.6
	ZAC A707 1	162
	ZAC A707 2	240.4
	ZAC A707 3	336

En la tabla 3.5 se puede observar que todos los valores obtenidos en los ensayos de impacto superan al requerido en la especificación técnica. Asimismo, si hacemos una extrapolación del valor que muestra la especificación técnica para -30°C , se obtendría un número menor a 27 J ya que a temperaturas tan bajas como ésta el acero se hace más frágil, reduciéndose su capacidad para absorber energía.

3.2.1.4. Análisis químico del cordón de soldadura

Al practicar el análisis químico mediante el método de espectrometría de emisión se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Composición química del metal de soldadura

Elemento	Porcentaje en peso
C	0.09
Mn	0.96
Si	0.27
P	0.013
S	0.018
Ni	1.33
Cr	0.02
Mo	0.15
Cu	0.02

De acuerdo a la composición química de la muestra y teniendo como referencia el AWS A5.5/5.5 M Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, el material analizado es compatible con el metal de aporte de soldadura bajo la clasificación AWS A5.5 E 8018-C3. Por lo tanto, con este ensayo se verifica que el electrodo empleado efectivamente posee una composición química dentro de los rangos estipulados en su especificación técnica.

3.2.1.5. Macrografía

La figura 3.1 muestra la macrografía realizada a la unión soldada.

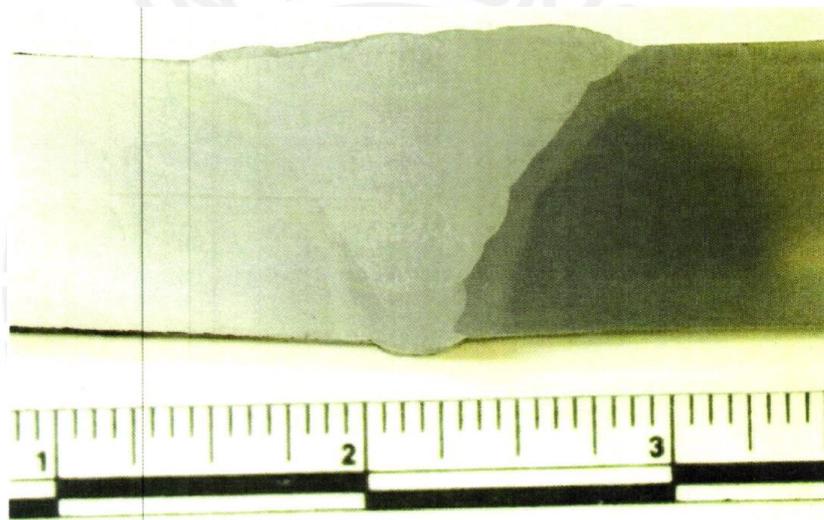


Fig. 3.1 Fotomacrografía

En la figura 3.1 el material que se encuentra del lado izquierdo es el de la tubería API 5L X70 PSL1 mientras que el que se encuentra al lado derecho es el del material ASTM A707 L5 F65.

Se puede apreciar que la unión soldada no muestra defectos relevantes. Presenta buena penetración de soldadura. Asimismo, no presenta falta de fusión, socavaciones ni sobremonta excesiva. Además, no se hallan fisuraciones en la zona de fusión ni en la ZAC.

3.2.2. Otros ensayos

3.2.2.1. Análisis químico de los metales base

La tabla 3.7 muestra una comparación de la composición química del material ASTM A 707 L5 F65 (obtenida a partir del análisis químico practicado) con los requerimientos químicos estipulados en la especificación técnica ASTM A707/A707M - 13 para grado L5 y clase 4.

Tabla 3.7 Cuadro comparativo de composición química

Elemento de Aleación	% en peso A707 L5 F65	% en peso mín – máx ASTM A707 L5 Cl4		Verificación
C	0.03	0	0.09	Cumple
Mn	1.1	0.35	0.75	No cumple
P	0.004	0	0.03	Cumple
S	0.002	0	0.035	Cumple
Si	0.07	0	0.37	Cumple
Ni	0.88	0.67	1.03	Cumple
Cr	0.63	0.56	0.94	Cumple
Mo	0.44	0.14	0.28	No cumple
V	0.006	0	0.06	Cumple
N	0.0084	0	0	No cumple
Cu	1.1	0.95	1.35	Cumple
Co	0.001	0	0.02	Cumple

Se puede observar en dicha tabla que existen variaciones con respecto a lo establecido en la especificación técnica, particularmente en los porcentajes de manganeso, molibdeno y nitrógeno presentes.

Asimismo, si calculamos el carbono equivalente con la ecuación 1.2 obtendremos lo siguiente:

$$CE = C + \frac{SI}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B = 0.218$$

Si comparamos este valor con el criterio establecido en el apartado 1.1.2.1 podemos concluir que al ser el $CE < 0.4$, el acero no presenta riesgo de fisuración en frío en la ZAC.

Por otro lado, la tabla 3.8 muestra una comparación de la composición química del material API 5L X70 PSL1 (obtenida a partir del análisis químico practicado) con los requerimientos químicos estipulados en la especificación técnica API 5L 2013 para grado X70 PSL1.

Tabla 3.8 Cuadro comparativo de composición química

Elemento de Aleación	% en peso API 5L X70 (Ensayado)	% en peso (máx) API 5L X70 (Según especificación)	Verificación
C	0.09	0.28	Cumple
Mn	0.88	1.4	Cumple
P	0.008	0.03	Cumple
S	0.001	0.03	Cumple
V	0.048	$V+Nb+Ti < 0.15$	Cumple
Nb	0.021		
Ti	0.012		

Se puede observar en dicha tabla que el porcentaje de elementos de aleación presentes, se encuentra de acuerdo con lo estipulado en la especificación técnica del material.

Igualmente, si calculamos el carbono equivalente con la ecuación 1.2, obtendremos lo siguiente:

$$CE = C + \frac{SI}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B = 0.176$$

Si comparamos este valor con el criterio establecido en el apartado 1.1.2.1 podemos concluir que al ser el $CE < 0.4$, el acero es de buena soldabilidad.

3.2.2.2. Ensayo de tracción a los metales base

La tabla 3.9 muestra una comparación de las propiedades mecánicas del material ASTM A707 L5 F65 (obtenidas a partir del ensayo de tracción practicado) con los requerimientos mecánicos estipulados en la especificación técnica ASTM A707/A707M - 13 para grado L5 y clase 4.

Tabla 3.9 Cuadro comparativo de propiedades mecánicas

Propiedad	A707 L5 F65	Límite inferior ASTM A707 L5 C14	Verificación
Resistencia a la tracción (ksi)	93.5	90	Cumple
Resistencia a la fluencia (ksi)	83	75	Cumple
Elongación (%)	27	20	Cumple
Reducción de área (%)	80	40	Cumple

Se puede observar en dicha tabla que los valores obtenidos en el ensayo de tracción están de acuerdo a lo estipulado en la especificación técnica del material.

Por otro lado, la tabla 3.10 muestra una comparación de las propiedades mecánicas del material API 5L X70 PSL1 (a partir del ensayo de tracción practicado) con los requerimientos mecánicos estipulados en la especificación técnica API 5L 2013 para grado X70 PSL1.

Tabla 3.10 Cuadro comparativo de propiedades mecánicas

Cuadro comparativo de propiedades mecánicas			
Propiedad	API 5L X70 (Ensayado)	Límite Inferior API 5L X70 (Según especificación)	Verificación
Resistencia a la tracción (ksi)	85.7	82.7	Cumple
Resistencia a la fluencia (ksi)	73.5	70.3	Cumple

Se puede observar en dicha tabla que los valores obtenidos en el ensayo de tracción están de acuerdo a lo estipulado en la especificación técnica del material.

3.2.2.3. Inspección visual

La inspección visual realizada tomó en cuenta los siguientes aspectos: control en la preparación de la junta a soldar, verificación de las condiciones operativas de equipos de soldadura que estuvieran calibrados y en buen estado, calidad del material de aporte y consumibles, gas, material base, calidad del cordón de soldadura de raíz, temperatura entre pases, calidad de los cordones de relleno, limpieza entre pasadas, apariencia final de la soldadura.

La inspección visual en la soldadura, no detectó discontinuidades en el cordón de soldadura que afectaran la calidad del mismo.

No se observó penetración incompleta sin desalineación ya que se alcanzó la temperatura adecuada de fusión para una completa penetración.

Se observó un cordón homogéneo gracias al control que se tuvo en las condiciones eléctricas aplicadas y con un manejo del electrodo apropiado.

No se presentó falta de fusión entre los metales base y el metal de soldadura abierta a la superficie debido a que la temperatura alcanzada en el metal base fue la apropiada para llegar al punto de fusión.

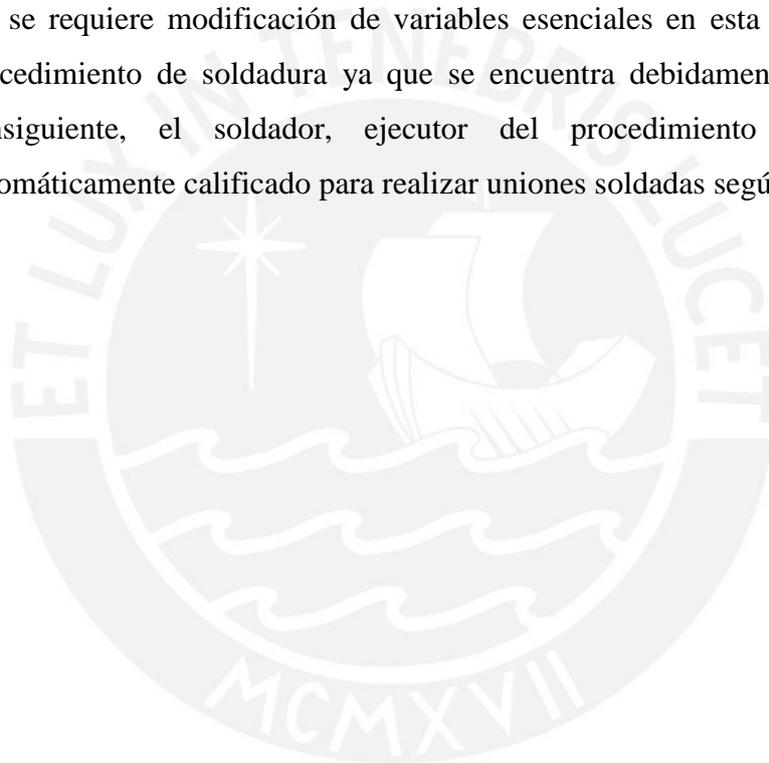
La probeta no mostró ningún tipo de distorsión relevante debido a la aplicación de calor y la fusión de metal de soldadura en los metales base.

Sin embargo, presentó unas pocas salpicaduras que son glóbulos de metal de aporte adheridos al metal base producto del proceso, las cuales se eliminaron con amoladora ya que pueden producir microfisuras.

CONCLUSIONES

- La especificación de procedimiento de soldadura para tubería de acero API 5L X70 PSL1 y brida ASTM A707 L5 F65 quedó calificada, aplicando el Código ASME, Sección IX.
- La desviación en la composición química del material ASTM A707 L5 F65 con respecto a la especificación técnica ASTM A707, particularmente en los porcentajes en peso de manganeso y molibdeno, no genera un cambio significativo en el valor del carbono equivalente ($CE=0.218$) de manera que no excede el límite superior ($CE=0.4$) a partir del cual existe riesgo de fisuración en frío. Además, gracias al bajo contenido de carbono presente en ambos metales base se favorece la correcta ejecución del cordón de soldadura.
- Las dos probetas soldadas que fueron sometidas a ensayos de tracción rompieron en el metal base API 5L X70 y alcanzaron un esfuerzo de tracción de 587 MPa en ambos casos, el cual, es mayor al esfuerzo de tracción mínimo entre los dos metales base (570 MPa correspondiente al API 5L X70). Dada esta ruptura en el metal base, se comprueba que el cordón presentó buen comportamiento y que las propiedades mecánicas del cordón de soldadura son mayores.
- No se evidenciaron discontinuidades relevantes en los cuatro ensayos de doblado lateral; por consiguiente, la ductilidad en la zona de la soldadura se mantiene.
- Los valores de energía absorbida en los nueve ensayos de impacto llevados a cabo a -30°C tanto en los metales base como en el metal de soldadura resultaron ser mayores al mínimo estipulado por la especificación API 5L X70; en consecuencia, se garantiza la buena tenacidad de la unión soldada a la temperatura de servicio (Aprox. 10°C).

- La utilización conjunta de los procesos de soldadura GTAW para los pases de raíz y SMAW para los de relleno proporciona una opción para realizar soldaduras de muy buena calidad en un tiempo relativamente corto. Asimismo, aunque las resistencias mecánicas de los consumibles empleados difieren en 10 ksi (70 ksi para GTAW y 80 ksi para SMAW), la resistencia mecánica del cordón es homogénea debido a la dilución que se da entre los materiales de aporte.
- No se requiere modificación de variables esenciales en esta especificación de procedimiento de soldadura ya que se encuentra debidamente calificada; por consiguiente, el soldador, ejecutor del procedimiento queda también automáticamente calificado para realizar uniones soldadas según este WPS.



RECOMENDACIONES

- Para ejecutar la soldadura entre metales disímiles, particularmente aceros de bajo carbono y alta aleación, es importante seleccionar los consumibles adecuados considerando la resistencia mecánica y la composición química de los metales base.
- Es importante evitar la ejecución del procedimiento de soldadura en condiciones climáticas de alta humedad. En estos casos, es conveniente aislar el proceso para que no sea afectado.
- Es importante considerar la realización de ensayos de impacto siempre que la temperatura de servicio de la unión soldada sea relativamente baja (menor a 10°C). De esta manera, se garantiza la buena tenacidad de la unión soldada y se controlan los riesgos de fragilización de los materiales debido a bajas temperaturas.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

2010 *Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers and Welding and Brazing Operators* New York: Library of Congress.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

2013 *Specification for Line pipe*. Washington: API publishing services.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS

2013 *Standard Specification for Forged Carbon and Alloy Steel Flanges for Low-Temperature Services*.

AMERICAN WELDING SOCIETY

2001 *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*.

1997 *Welding Handbook, Seventh Edition, Volume 4, Metals and their Weldability*.

1996 *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*.

CALLISTER, William

2000 *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Madrid: Reverté.

EXSA

2014 *Manual de Soldadura y Catálogo de productos*.

FOSCA, Carlos

2007 *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial.

HERNÁNDEZ, Germán

2006 *Manual del Soldador.* Madrid: Cesol.

INDURA

2007 *Manual de sistemas y materiales de Soldadura.*

LEAN, Paul

2008 *Introducción a la Ingeniería de Materiales.* Lima: Pontificia Universidad Católica, Fondo Editorial.

LINCOLN ELECTRIC

2014 *Invertec V350 pro.* Información del Producto.

2014 *Invertec V350 pro.* Manual del Operador.

SHELL

2012 *Manufacture, Testing, and Inspection of Carbon and Low-Alloy Steel Forgings for Primary Steel Applications in Deepwater Offshore Structures and Pipelines (Based on ASTM A 788, ASTM A961 and MSS SP-75).*