

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**ANÁLISIS ECONÓMICO DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA
PARA TANQUE DE ALMACENAMIENTO GLP FABRICADO DE
ACERO SA612 GR. 90**

**Trabajo de suficiencia profesional para obtener el título profesional de
Ingeniero Mecánico**

AUTOR

Diego André Rios Cerdán

ASESOR:

José Luis Hideki Sakihama Uehara

Lima, Enero, 2021

Resumen

En el siguiente trabajo se analiza económicamente diferentes procesos de soldadura a fin de determinar la mejor opción para la fabricación en serie de tanques de acero SA612 Gr. 90 para el almacenamiento de 5200 galones de GLP. Además se determina el material de aporte apropiado que sea disponible con proveedores locales. La fabricación es realizada según el con el código ASME Sección VIII División I “Reglas para la construcción de Recipientes a Presión” y para la calificación del procedimiento de soldadura y soldador se utiliza el código ASME Sección IX “Procedimientos para calificaciones de soldadura, soldadura fuerte y fusión”. Los parámetros a usar para conseguir una soldadura sana y reproducible en serie se consiguieron por recomendaciones según el espesor y el diseño de junta, éstos se deben validar con un registro de ensayos a las probetas para verificar las propiedades mecánicas requeridas antes de la producción en serie. Por último, se muestran dos procedimientos de soldadura preliminares para la fabricación del tanque de almacenamiento. El primero procedimiento se usa para la unión virola-virola y virola-fondo; el segundo se usará para la última unión virola-fondo.

ÍNDICE

Introducción	7
Objetivos	8
Objetivo general	8
Objetivos Específicos	8
Capítulo 1: Estado del arte.....	9
1.1. Gas Licuado de Petróleo:	9
1.2. Recipientes sometidos a Presión:	10
1.3. Procesos de soldadura	11
1.3.1. Proceso SMAW	12
1.3.2. Proceso GMAW	12
1.3.3. Proceso FCAW	13
1.3.4. Proceso SAW	14
1.4. Consideraciones del proyecto:	15
1.4.1. Dimensiones del tanque de almacenamiento	15
1.4.2. Fabricación del tanque de almacenamiento.....	17
Capítulo 2: Justificación de normas y códigos a emplear.....	19
2.1. Normativa peruana:	19
2.2. ASME VIII División I “Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión” ..	19
2.3. API 650 “Tanques Soldados de Acero para Almacenamiento de petróleo”	20
2.4. ASME IX “Calificaciones de soldadura, soldadura fuerte y fusión”	21
Capítulo 3: Análisis económico para la selección del proceso de soldadura	23
Capítulo 4: Procedimiento de Soldadura	33
4.1 Variables esenciales.....	33
4.2 Material Base.....	36
4.2.1 Tratamiento térmico:	36
4.2.2 Composición química:.....	36

4.2.3 Propiedades Mecánicas.....	37
4.3 Posición de soldeo.....	38
4.4 Diseño de junta.....	40
4.5 Material de Aporte	41
4.5.1 Material de Aporte para proceso SAW.....	41
4.5.2 Material de Aporte para proceso FCAW	42
4.6 Temperatura mínima permisible	43
4.7 Temperatura de precalentamiento.....	43
4.8 Tratamiento térmico post-soldadura	46
Capítulo 5: Calificación del procedimiento de soldadura	51
5.1 Tipos y Número de probetas a ensayar.....	52
5.2 Ensayo de tracción	52
5.3 Ensayo de doblado guiado de cara y raíz	53
5.4 Cupón de soldadura y localización de probetas.....	56
5.4.1 Cupón de WPS No 204.....	56
5.4.2 Cupón de WPS No 205.....	57
Capítulo 6: Calificación del operador	59
6.1 Tipo y Número de probetas para prueba mecánica	59
6.2 Ensayo de doblado guiado de cara y raíz	60
6.3 Ensayos no destructivos.....	60
6.4 Cupón de soldadura y localización de probetas.....	60
6.4.1 Cupón de WPS No 204	60
6.4.2 Cupón de WPS No 205	61
Conclusiones	63
Bibliografía	64
ANEXOS	65
Anexo 1: Ficha técnica material de aporte FCAW.....	65
Anexo 2: Ficha técnica material de aporte SAW	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de Recipientes para GLP y capacidades de llenado	10
Figura 2 Recipiente de envoltorio cilíndrico	10
Figura 3 Vista isométrica de tanque de almacenamiento de GLP	15
Figura 4 Vista frontal de tanque de almacenamiento de GLP	16
Figura 5 Vista lateral de tanque de almacenamiento de GLP	16
Figura 6 Esquema de Virola.....	17
Figura 7 Esquema de ensamble de envoltorio.....	18
Figura 8 Esquema de chapa para fondo con pestaña	18
Figura 9 ASME II - Parte D 2015 (Metric)	20
Figura 10 Diseños preliminares de juntas soldadas	24
Figura 11 Comparación de Horas: Alternativa 1 y Alternativa 2	31
Figura 12 Comparación de Costos: Alternativa 1 y Alternativa 2.....	31
Figura 13 Diseño de unión para SAW y FCAW	40
Figura 14 Diseño de unión para doble pase SAW	40
Figura 15 Gráfica porcentaje de carbono vs Carbono equivalente.....	44
Figura 16 WPS N°204	47
Figura 17 WPS N°205.....	49
Figura 18 Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción	53
Figura 19 Esquema y dimensiones de probeta para doblado transversal	54
Figura 20 Esquema y dimensiones de probeta de doblado de cara y raíz	55
Figura 21 Cupón para calificación de soldadura-WPS N° 204	56
Figura 22 Cupón para calificación de soldadura-WPS N° 205	57
Figura 23 Cupón para calificación de operador-WPS N°204.....	61
Figura 24 Cupón para calificación de operador-WPS N°205.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Metrado de cordones de soldadura	24
Tabla 2	Horas efectivas de arco: SMAW, FCAW(S) y SAW	25
Tabla 3	Consideraciones Alternativa 1 y Alternativa 2.....	26
Tabla 4	Horas efectivas de arco Alternativa 1 y Alternativa 2.....	28
Tabla 5	Costo Material Alternativa 1 y Alternativa 2	28
Tabla 6	Costo Mano de obra Alternativa 1 y Alternativa 2.....	29
Tabla 7	Costo de Operaciones adicionales Alternativa 1 y Alternativa 2.....	29
Tabla 8	Costo de Consumibles Alternativa 1 y Alternativa 2	30
Tabla 9	Costo Total Alternativa 1 y Alternativa 2	30
Tabla 10	Variables de la especificación de procedimiento de soldadura para SAW	34
Tabla 11	Variables de la especificación de procedimiento de soldadura para FCAW..	35
Tabla 12	Requerimientos químicos ASTM A612/A12M-12.....	37
Tabla 13	Requerimientos de tracción	37
Tabla 14	Calificación de unión soldada de plancha a tope - Limite de posición y diámetro	38
Tabla 15	Calificación de unión soldada de tubo a tope - Limite de posición y diámetro	39
Tabla 16	Diámetro exterior calificado según diámetro de cupón de prueba.....	39
Tabla 17	Fundente y alambre recomendados para proceso SAW	41
Tabla 18	Fundente y alambre recomendados para proceso FCAW.....	42
Tabla 19	Resumen de parámetros eléctricos para procedimientos de soldadura	43
Tabla 20	Grupos de índice de susceptibilidad según nivel de hidrógeno	45
Tabla 21	Índice de susceptibilidad de embriamiento	45
Tabla 22	Requerimientos de tratamientos post- soldadura para aceros al carbono de baja aleación Fuente: Adaptación (ASME, 2015)	46
Tabla 23	Ensayos mecánicos para calificación de WPS	52
Tabla 24	Reducción de espesor de la probeta	55
Tabla 25	Probetas para calificación de operador.....	59

Introducción

El gas licuado es una fuente de energía eficiente con un poder calorífico más alto que los combustibles tradicionales. La gran producción de GLP obtenida en Camisea a partir de setiembre 2004 permitió reemplazar al GLP que se venía importando en forma creciente hasta esa fecha y simultáneamente convertir al Perú en exportador de GLP.

En el sector industrial el GLP viene reemplazando a los combustibles convencionales en procesos que demandan grandes cantidades de calor, en la industria del gas se ha impulsado su producción en la última década y logró multiplicar por diez los hogares y comercios que usan el gas natural en Lima y Callao. Estos sectores en expansión requieren de tanques de gran capacidad para su almacenamiento y distribución.

En este contexto se contempla la fabricación de tanques de almacenamiento para GLP con una capacidad de 5200 galones. Estos tanques operarán a una presión de 250 psi y a temperatura ambiente; así mismo se determinó que las dimensiones necesarias para este tanque serán de 2,17 m de diámetro y 6,2 m de largo. El material de los tanques será el acero SA612 Gr 90 y el espesor necesario para soportar la presión de trabajo es de 13 mm.

Se cuenta con información histórica sobre fabricación de diversos recipientes a presión con equipos de soldadura como SMAW, FCAW y SAW; en base de a esto se analizará la fabricación en serie de tanques horizontales para GLP por lo que se necesita un procedimiento para estas condiciones específicas.

A continuación se seleccionarán los parámetros de soldadura como proceso, diseño de juntas, material de aporte, etc, los cuales se plasmarán en dos procedimientos de soldadura.

Objetivos

Objetivo general

A partir de un análisis de costos de fabricación, seleccionar los procesos de soldadura y desarrollar un procedimiento de soldadura preliminar para la fabricación de tanques de SA612 Gr. 90 de 13 mm de espesor para almacenamiento de GLP con una capacidad de 5200 galones según el código ASME VIII..

Objetivos Específicos

- Evaluar el costo de fabricación de tanques a producir con diferentes procesos de soldadura y ratios históricos disponibles por la empresa.
- Seleccionar el proceso de soldadura y material de aporte óptimo de acuerdo a la realidad del mercado nacional.
- Seleccionar los diseños de juntas apropiados, según el proceso de soldadura, que cumplan con los requisitos del proyecto.
- Preparar los procedimientos de soldadura para una alta demanda de producción de tanques: dimensiones, parámetros, cantidades de cupones y probetas a realizar y/o ensayar.

Capítulo 1: Estado del arte

1.1. Gas Licuado de Petróleo:

El GLP se define como un hidrocarburo que a condición normal de presión y temperatura (1 atm y 15°C) se encuentra en estado gaseoso, pero a temperatura ambiente (25°C) y presión moderadamente alta (entre 4 y 8 atm) es licuable. Usualmente está compuesta de propano, butano, polipropileno y butileno o mezcla de los mismos, en determinados porcentajes forman una mezcla explosiva.

Se le almacena en estado líquido en recipientes a presión (cilindros portátiles, tanques estacionarios, cisternas, etc.), en el interior se debe mantener dos fases: una gaseosa o de vapor y otra líquida, por lo que estos recipientes deben llenarse hasta un máximo de 80%.

El GLP cuenta con las siguientes propiedades:

- No es tóxico pero puede provocar asfixia.
- Puede ocasionar irritaciones en contacto con la piel y con los ojos.
- Es altamente inflamable, su combustión es muy rápida y genera altas temperaturas.
- Es más pesado que el aire, por ello en caso de fugas tiende a ubicarse o depositarse en lugares bajos.

Los tipos de recipientes de almacenamiento para GLP lo podemos ver en la figura 1, tomar en cuenta que las cantidades son referenciales ya que las compañías distribuyen diferentes tipos de recipientes con capacidades distintas.





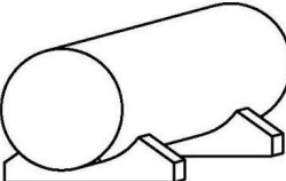
ENVASES PORTÁTILES			TANQUES ESTACIONARIOS		
					
3 Kg	13 Kg	45 Kg	190 Kg	800, 1800, 3300 Kg	2, 4, 7.3 m ³
GARRAFAS		CILINDROS	DEPÓSITOS		
ENVASADO			A GRANEL		

Figura 1 Tipos de Recipientes para GLP y capacidades de llenado

Fuente: (UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, 2015)

1.2. Recipientes sometidos a Presión:

Un recipiente a presión está constituido por una cámara estanca con respecto al medio que lo rodea. En dicha cámara se da una presión diferente al medio, de modo que sus paredes están sometidas a una diferencia de presión. En la figura 2 se detallarán las partes principales de un recipiente de presión.

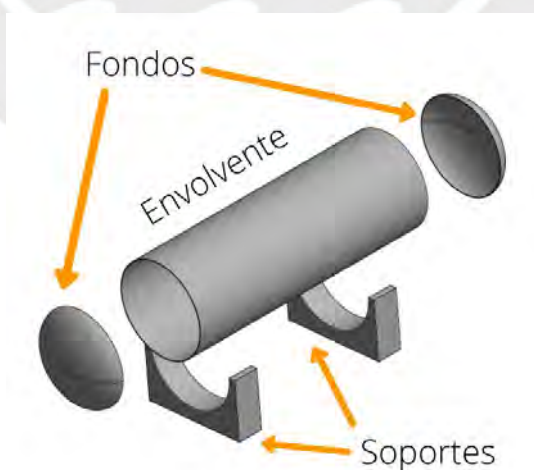


Figura 2 Recipiente de envoltorio cilíndrica

Fuente: Elaboración propia

La búsqueda de simplicidad y de economía en la fabricación del equipo a presión requiere utilizar menores espesores posibles, por tanto se recurre a formas geométricas sencillas para configurar las paredes del recipiente: cilindros, esferas y conos. Los equipos de envolventes cilíndricas son los más utilizados, porque la forma cilíndrica de las chapas que la conforman permite su obtención por curvado en una máquina de rodillo, dado que se trata de una superficie de simple curvatura. La envolvente está conformada por anillos cilíndricos llamados virolas, estas virolas a su vez pueden estar compuestas por chapas denominadas tejas.

Los fondos se encargan de cerrar los extremos de una envolvente cilíndrica para proporcionar la estanqueidad de la cámara a presión, con relación al medio exterior. El tipo de fondo que mejor soporta los esfuerzos derivados de la presión es el semiesférico; sin embargo, tiene costos de fabricación elevados por lo que se prefiere usar otro tipo de fondos. El fondo semielíptico se caracteriza por una buena capacidad de resistir presión de modo que el espesor requerido, para una presión dada, es del mismo orden que la envolvente.

Los soportes son elementos auxiliares que solo soportan los esfuerzos derivados del peso, así como los eventuales momentos flectores producidos por cargas horizontales.

Además de lo mencionado en esta parte, los tanques de almacenamiento tienen elementos secundarios: manhole, escalera de acceso, válvula de servicio, válvula de llenado, medidor de porcentaje y válvula de seguridad.

1.3. Procesos de soldadura

Según el Welding Handbook de la AWS, se tienen diferentes tipos de procesos de soldadura, son de interés para este trabajo los procesos de soldadura por fusión. Estos procesos se caracterizan porque siempre producen la fusión del material base y la de metal de aporte, en caso sea empleado. Es importante conocer los procesos de soldadura por fusión para aplicarlos correctamente, por lo que se mencionarán los procesos comúnmente usados para soldar recipientes a presión de aceros al carbono y de baja aleación. (AWS, 1991)

1.3.1. Proceso SMAW

El proceso de soldadura manual por arco con electrodo revestido es un proceso en el que la fusión del metal se produce por el calor generado en un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo revestido y el metal base de una unión a soldar. (CESOL, 2012)

a. Ventajas del proceso SMAW

- El equipo de soldeo es relativamente sencillo, económico y portátil.
- No es necesario ninguna protección adicional, ya que el revestimiento tiene elementos de protección.
- Aplicable para soldeo de materiales con espesores en general mayores a 2 mm.
- Aplicable para el soldeo de la mayoría de metales y aleaciones de uso cotidiano.

b. Limitaciones del proceso SMAW

- Proceso lento, de baja tasa de deposición y con necesidad de retirar escoria.
- Requiere gran habilidad del soldador.
- No resulta productivo para espesores mayores a 10 mm.

1.3.2. Proceso GMAW

El proceso Gas Metal Arc Welding, es un proceso de soldadura donde el calor necesario para la unión es producido por un arco eléctrico entre un electrodo consumible y la pieza a soldar. La protección del arco eléctrico y del baño de fusión se obtiene mediante un gas o mezcla de gases. El electrodo es un alambre sólido desnudo que se alimenta de forma continua automáticamente y se convierte en metal depositado según se consume. (CESOL, 2012)

a. Ventajas del proceso GMAW

- Materiales de aporte comerciales para una gran gama de aleaciones ferrosas y no ferrosas. Es el único proceso que puede soldar todos los metales y aleaciones que se utilizan comercialmente.
- Material de aporte alimentado de forma continua, se evita tiempos muertos por cambios de electrodos.
- Mínima o nula generación de escoria.
- Mayor velocidad y tasa de deposición, pudiendo realizarse soldadura de gran longitud sin paradas.
- Procesos de soldadura más fácil de aprender que el proceso SMAW.

b. Limitaciones del proceso GMAW

- Equipo más complejo y costoso que el usado para SMAW.
- Alto nivel relativo de calor irradiado, por lo que se requiere mayor protección del soldador.
- Es necesario aproximar la pistola entre 10 y 20 mm para asegurar que la soldadura está protegida por el gas.

1.3.3. Proceso FCAW

El proceso de soldadura con alambre tubular utiliza el calor generado para la unión de un arco eléctrico entre el hilo continuo tubular que se consume y el metal a soldar. La protección de la unión se realiza por el flux contenido en el alambre tubular y que puede ayudarse con un suministro externo de gas. (CESOL, 2012)

a. Ventajas del proceso FCAW

- Elevada calidad y apariencia de la soldadura, similar al proceso SMAW pero a menor costo.

- Elevada velocidad de deposición, lo que se traduce en un aumento de productividad.
- Producción de escoria, la cual protege, soporta y mejora el baño.
- Mayor tolerancia a contaminantes y requisitos de limpieza inicial que pudieran originar discontinuidades y posteriores defectos en soldadura.

b. Limitaciones del proceso FCAW

- La escoria que produce, si es en grandes cantidades, puede ocasionar demoras para necesitar eliminarla, especialmente en el pase de raíz.
- Eficiencia menor a la de los alambres sólidos (GMAW)
- Equipo más caro y complejo que el proceso SMAW.
- Genera mayor nivel de humos respecto a GMAW y SMAW.

1.3.4. Proceso SAW

El proceso de soldadura por arco sumergido consiste en la fusión de un electrodo continuo protegida por la escoria generada por un flux con el que se alimenta el arco por separado. (CESOL, 2012)

a. Ventajas del proceso SAW

- Permite depositar grandes volúmenes de metal de soldadura de excelente calidad a bajo coste para una amplia gama de aplicaciones.
- Permite obtener grandes rendimientos de producción.
- El flux utilizado para proteger el arco y el baño de fusión puede recuperarse y reciclarse en el proceso.

b. Desventajas del proceso SAW

- Requiere un ajuste preciso de las piezas a soldar.
- Solo se puede utilizar en posición plana y filete.

1.4. Consideraciones del proyecto:

1.4.1. Dimensiones del tanque de almacenamiento

Se considera el tanque con envoltura cilíndrica horizontal y con fondos semielípticos, de la misma manera se consideraran cuatro soportes esbeltos para el apoyo sobre la superficie. Este tanque tendrá un manhole para trabajos de mantenimiento, medidor de porcentaje, conexión a válvula de llenado, válvula de servicio y válvula de seguridad. En la figura 3 se muestran la distribución de los elementos mencionados, en la figura 4 y 5 muestran las dimensiones generales.

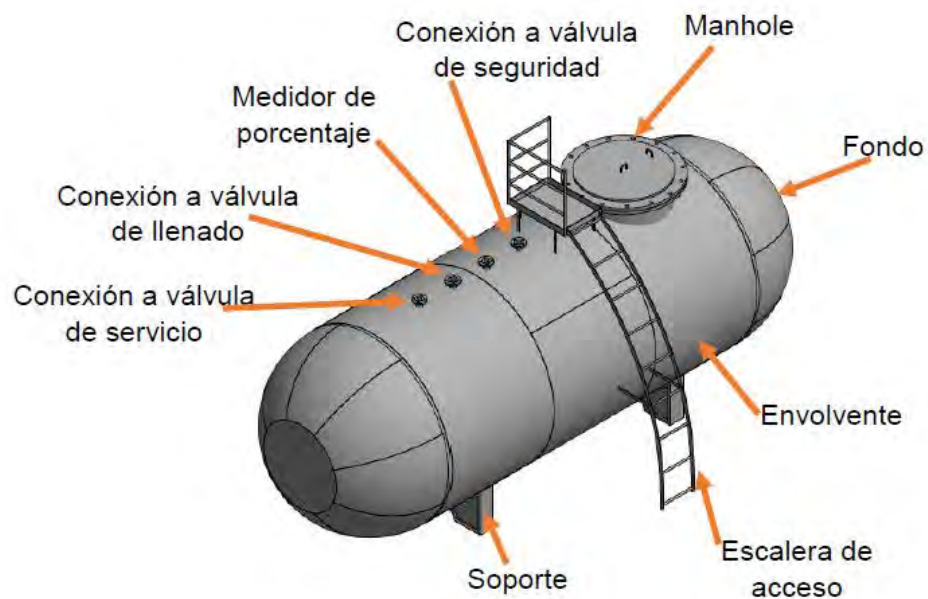


Figura 3 Vista isométrica de tanque de almacenamiento de GLP

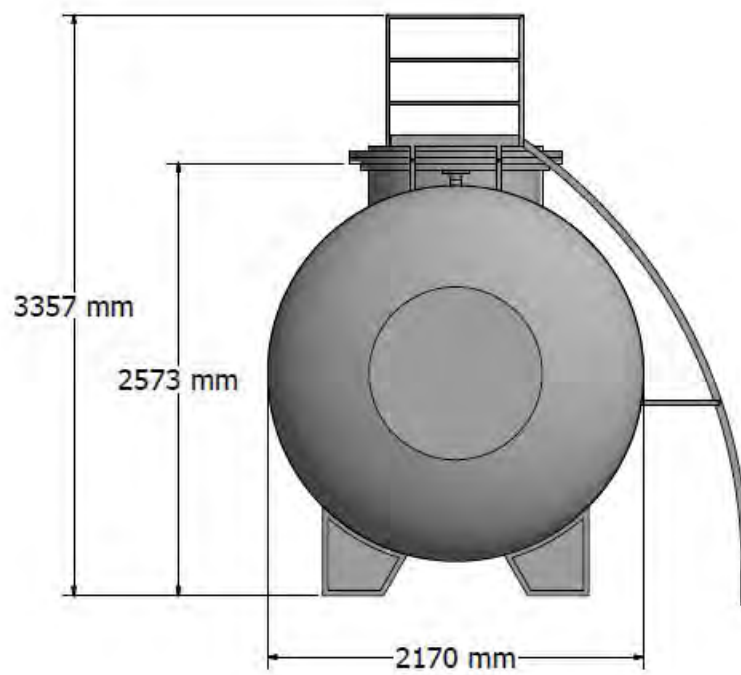


Figura 4 Vista frontal de tanque de almacenamiento de GLP

Fuente: Elaboración propia

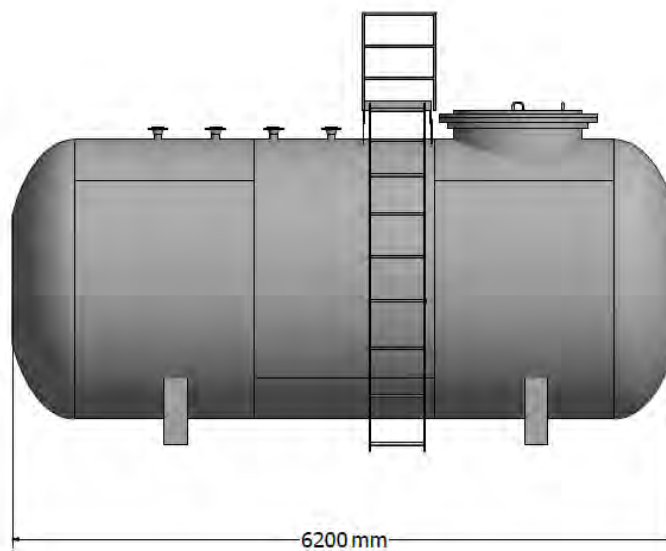


Figura 5 Vista lateral de tanque de almacenamiento de GLP

Fuente: Elaboración propia

1.4.2. Fabricación del tanque de almacenamiento

Según las cotizaciones realizadas con proveedores locales de planchas A612 se determinó que el formato de esta plancha es de 2.3 m x 7.3 m.

a. Envoltente

El desarrollo de la envoltente nos da unas dimensiones de 4200 mm x 6018 mm. Por lo tanto se debe formar dicha envoltente con tres virolas 1400 mm de longitud para cubrir el área requerida.

Las planchas serán roladas para obtener las dimensiones requeridas y se realizará una soldadura longitudinal como se puede ver en la figura 6.



Figura 6 Esquema de Virola

Fuente: Elaboración propia

La unión de los anillos será intercalada para que las soldaduras longitudinales que forman cada anillo no coincidan con las soldaduras del anillo a continuación. Esto evitará la coincidencia de 3 soldaduras en un mismo punto. Se muestra un esquema de la disposición de las planchas mencionadas en la figura 7.

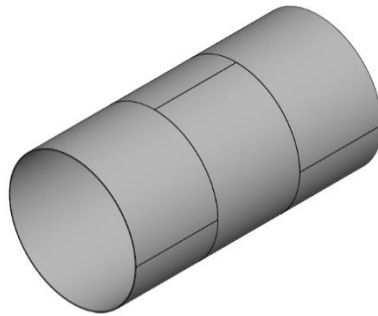


Figura 7 Esquema de ensamble de envolvente

Fuente: Elaboración propia

b. Fondos

Para la construcción de los fondos semielípticos se debe considerar que serán formados en una máquina embombadora para conseguir la forma deseada y una pestañadora para obtener la pestaña cilíndrica para unir con la envolvente. El fondo contará con un agujero para evitar las concentraciones en la parte central del fondo y se soldará con una tapa plana como vemos en la figura 8.

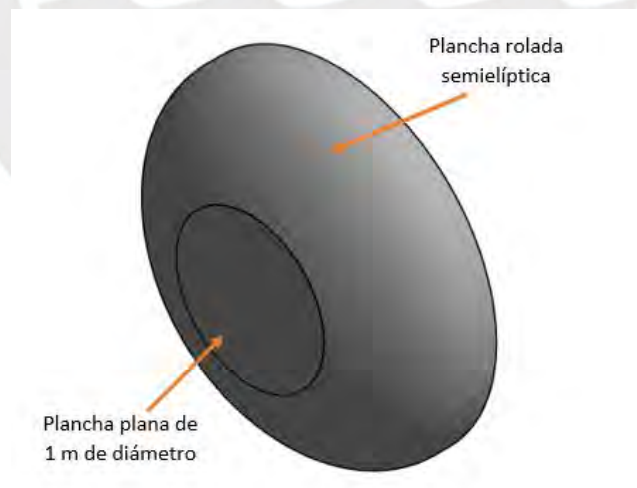


Figura 8 Esquema de chapa para fondo con pestaña

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 2: Justificación de normas y códigos a emplear

A continuación se detallarán las normas más aplicables a la fabricación de tanques de almacenamiento para luego seleccionar la indicada, esto servirá de base para los siguientes análisis.

2.1. Normativa peruana:

El reglamento para la comercialización de Gas Licuado de Petróleo, aprobado mediante Decreto Supremos N° 01-94-EM señala la siguiente definición:

TANQUE ESTACIONARIO DE GLP: Recipiente de acero fabricado de acuerdo a NTP 321.123 , o en su defecto de acuerdo al Código ASME, Sección VIII, División I. Puede ser instalado de forma aérea, soterrado o monticulado, dependiendo de las condiciones de la instalación.

Definición incluida por el Artículo 1 del Decreto Supremo N° 001-2007-EM:

En caso de tanques de GLP preexistentes deberá cumplirse con la NTP 321.123, en su defecto con una Norma Técnica Internacional vigente.

Definición incluida por el Artículo 1 del Decretos Supremo N° 001-2007-EM:

En caso de la instalación de Tanques Estacionarios de GLP preexistentes deberá cumplirse con la Norma Técnica Peruana aprobada por INDECOPI, o en su defecto con el código ASME, SECCION VIII, División I o con una Norma técnica Internacional reconocida por el Ministerio de Energía y Minas.

2.2. ASME VIII División I “Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión”

Se tiene la parte UG “Requerimientos Generales para todos los Métodos de Construcción y todos los Materiales”, se ve que en UG-5 nos hacen referencia a ASME Sección II sobre las planchas.

En la figura 9 se tiene la Seccion II Parte D (Metric), en donde se encuentra el material para la construcción del tanque de almacenamiento (SA 612), además el espesor brindado por el área de diseño se encuentra dentro del rango permitido.

Table 1A (Cont'd)
Section I; Section III, Classes 2 and 3;* Section VIII, Division 1; and Section XII
Maximum Allowable Stress Values S for Ferrous Materials
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy	Class/ Condition/ Temper	Size/ Thickness,	P-No.	Group No.
					Desig./ UNS No.		mm		
1	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	3	64 < t ≤ 100	1	3
2	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	2	64 < t ≤ 100	1	3
3	Carbon steel	Wld. pipe	SA-691	CMSH-80	K12437	...	64 < t ≤ 100	1	3
4	Carbon steel	Plate	SA-738	C	K02008	...	64 < t ≤ 100	1	3
5	Carbon steel	Plate	SA-299	B	K02803	...	>25	1	3
6	Carbon steel	Plate	SA-299	B	K02803	...	≤25	1	3
7	Carbon steel	Forgings	SA-765	IV	K02009	1	3
8	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	3	≤64	1	3
9	Carbon steel	Plate	SA-537	...	K12437	2	≤64	1	3
10	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CD80	K12437	...	≤64	1	3
11	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	D80	K12437	...	≤64	1	3
12	Carbon steel	Wld. pipe	SA-691	CMSH-80	K12437	...	≤64	1	3
13	Carbon steel	Plate	SA-738	C	K02008	...	≤64	1	3
14	Carbon steel	Plate	SA-841	B	...	2	≤100	1	3
15	Carbon steel	Plate	SA-612	...	K02900	...	13 < t ≤ 25	10C	1
16	Carbon steel	Plate	SA-612	...	K02900	...	≤13	10C	1
17	Carbon steel	Plate	SA-738	B	K12007	1	3

Figura 9 ASME II - Parte D 2015 (Metric)

Fuente: ASME II, 2015

El código ASME VII División 1 tiene el inciso UCS-5 sobre materiales para recipientes a presión construidos de aceros al carbono y de baja aleación, esto nos indica que el material que está sometido a presión debe estar limitado a la tabla UCS-23, en donde también está incluido el material SA 612.

2.3. API 650 “Tanques Soldados de Acero para Almacenamiento de petróleo”

Norma internacional brindada por la American Petroleum Institute utilizada para almacenamiento de petróleo. Como se puede ver en la sección 1.1.5 nos indican que el máximo espesor nominal para las planchas deberá ser de 1”

En la Sección 2.1.1 indica que los materiales deben de cumplir las especificaciones listadas en esta sección, además resalta que para materiales que no figuran en su lista, podrían utilizarse materiales alternativos siempre y cuando se compruebe que la alternativa a utilizar cumple con los requerimientos del API 650 y que se deberá tener la aprobación del comprador. Vemos que el material ASTM A612 que usaremos para el tanque no se encuentra dentro de las especificaciones de esta sección.

2.4. ASME IX “Calificaciones de soldadura, soldadura fuerte y fusión”

Sección del Código ASME que establece los requerimientos para la calificación de procedimientos de soldadura, soldadores y operadores para ser aplicados en la fabricación, reparación y mantenimiento de recipientes a presión, calderas y equipos relacionados. Se usa el código ASME IX como complemento para la calificación.

El código ASME VIII División 1 incluye las características de material y espesor solicitado por el cliente, por lo cual se usará en la selección de material, diseño, fabricación, inspección, prueba, certificación y liberación.





Capítulo 3: Análisis económico para la selección del proceso de soldadura

Según el artículo UW27 de la norma ASME sección VIII – DIVISIÓN 1, los procesos que podrían ser usados son los procesos por arco eléctrico e incluso otro tipo de procesos.

En el punto UW28 indica que si el proceso de soldadura es manual, mecanizado o semiautomático la calificación del procedimiento es requerida y acorde con la sección IX de la norma ASME cuando la soldadura es un proceso de soldadura automática realizado de acuerdo con una especificación de procedimiento de soldadura (de conformidad con la Sección IX en la medida en que corresponda), no se requieren pruebas para la calificación del procedimiento. Por lo tanto, tenemos una gran variedad de procesos que podríamos seleccionar, por ello es importante definir los factores que tendremos en cuenta para la selección.

En ese sentido se seleccionará el proceso de soldadura teniendo en consideración lo expuesto anteriormente en el inciso 1.4, donde se expone las consideraciones del proyecto, y el punto 1.3, donde se explica las ventajas y limitaciones de los diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico que son más usadas para la aplicación evaluada. Por lo tanto, se analizarán los procesos: SMAW, FCAW y SAW.

Se considera el factor económico uno de los más importantes, debido a que el minimizar los costos de soldadura ampliará el margen de ganancia. Por tanto, se analizará los costos de mano de obra, de material de aporte y otros consumibles según el respectivo proceso de soldadura. Los costos por consumo eléctrico no serán evaluados debido a que usualmente este valor no es de gran relevancia comparado con los demás.

Como primer paso, se determina la longitud total de cordones soldados como indica la tabla 1, donde se distingue la longitud total de cordones circunferenciales, longitudinales para la fabricación de la envolvente, así como la longitud de soldadura necesaria para unir las tapas a la envolvente.

Tabla 1 Medrado de cordones de soldadura

Fuente: Elaboración propia

	Longitud de cordón (m)	Cantidad de Cordones (unid.)	Longitud Total (m)
Soldadura Circuferencial	6.82	4	27.28
Soldadura Longitudinal	1.70	3	5.10
Soldadura de tapas planas	3.14	2	6.28
		Total (m)	38.66

Primero seleccionamos el diseño de junta preliminar, como vemos en la figura 10, para los tres procesos a analizar mediante recomendaciones del Welding Handbook

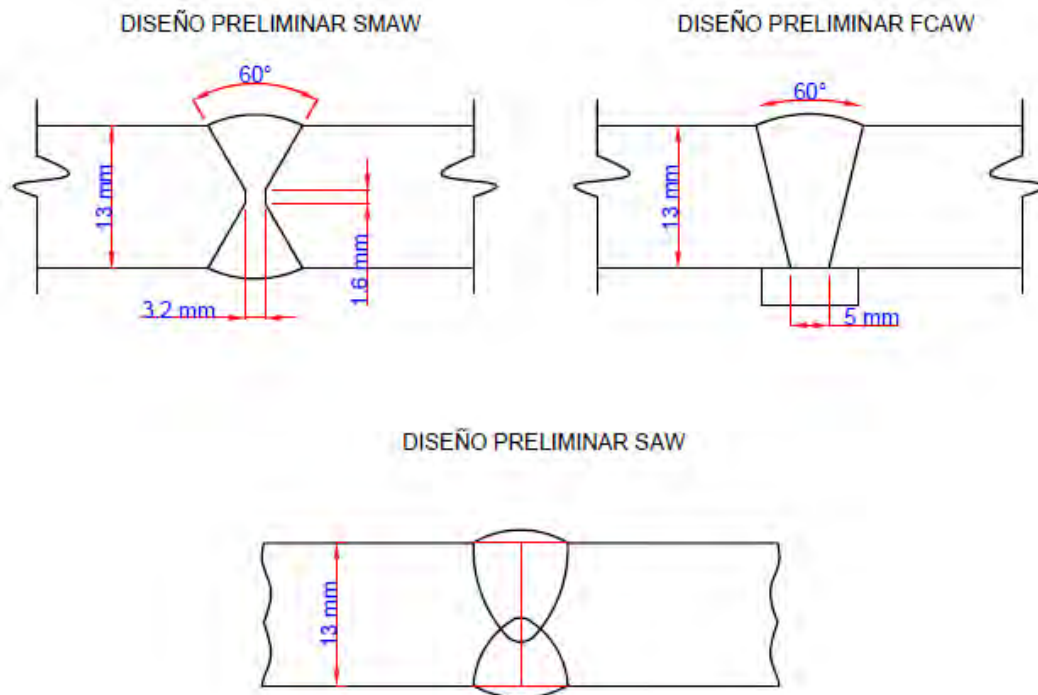


Figura 10 Diseños preliminares de juntas soldadas

Fuente: Elaboración propia

Se calcula el área de la junta para todos los casos y con la longitud total de cordón previamente hallado obtenemos el material a depositar. La tasa de deposición se determina según el proceso, con lo cual se tienen las horas efectivas de arco que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 Horas efectivas de arco: SMAW, FCAW(S) y SAW

Fuente: Elaboración propia

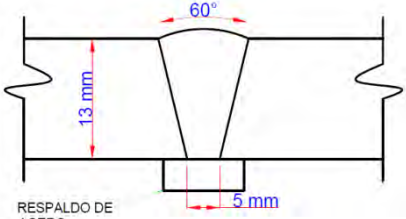

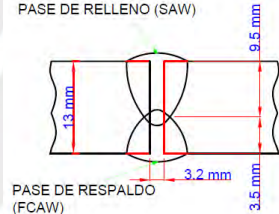
Parámetros	SMAW	FCAW (S)	SAW
Area de la junta (cm ²)	0.79	1.52	0.50
Material a Depositar (kg.)	23.82	45.84	15.08
Tasa de deposición (kg/h)	1.00	3.80	13.50
Horas efectivas de arco (h)	23.82	12.06	1.12

El proceso SMAW requeriría excesivas horas de soldadura y mano de obra especializado por ser un proceso manual, por lo tanto se descarta este proceso. Si bien es cierto que el proceso SAW es el que requiere menos horas efectivas, se debe realizar un análisis económico de ambas opciones. Para ello, se selecciona el diseño de junta y material de aporte para hacer un análisis económico. Las fichas de los materiales de aporte seleccionados están en los anexos 1 y 2.

Para la fabricación con el proceso SAW se requieren de dos procedimientos, debido a que la soldadura entre el cuerpo cilíndrico y el último fondo no permite el acceso por la parte interior de la máquina SAW. Este segundo procedimiento requerirá de un pase de respaldo con FCAW. En la tabla 3 se tiene las consideraciones para cada proceso.

Tabla 3 Consideraciones Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Alternativa 1	Alternativa 2
<p>Tipo de junta y área de junta para t=13mm</p>	 <p style="text-align: center;">A= 1.52 cm²</p>	<p>Se necesitan dos diseños de junta:</p> <p>1) Doble pase con SAW:</p>  <p>Solo se considera área de la sobremonta: A= 0.50 cm²</p> <p>2) Pase de respaldo con FCAW y de relleno con SAW:</p>  <p>Sobremonta y separación entre planchas: A= 0.90 cm²</p>
<p>Consumible (gas de aporte/fundente)</p>	<p>No aplica</p>	<p>El fundente se consume en igual proporción al alambre; sin embargo, se considera el uso de una solución para la recuperación de fundente. Por tanto, se asume un consumo mínimo debido a mermas (5%). No aplica el gas de aporte para el pase con FCAW.</p>

<p>Material de Aporte</p>	<p>Según AWS A5.29, se seleccionó: INNERSHIELD® NR® -211-MP con 2.8 mm de diámetro.</p>	<p>1) Según AWS A5.23 : LINCOWELD® LA-84 con 3.2 mm de diámetro.</p> <p>2) Según AWS A5.29: INNERSHIELD® NR® -211-MP con 2.4 mm de diámetro para pase de raíz. Según AWS A5.23 : LINCOWELD® LA-84 con 4 mm de diámetro para pase de relleno.</p>
<p>Parametros eléctricos:</p>	<p>I=325A V=23V</p>	<p>1) Pase backing: I=475A y V=34V Segundo pase: I=500A y V=36V</p> <p>2) Pase backing: I=300A y V=25V Segundo pase: I=500A y V=33V</p>
<p>Tasa de deposición</p>	<p>Según electrodo (2.8 mm): 4.5 kg/h</p>	<p>1) Según recomendación se tiene la misma tasa de deposición para ambos pases: 12 Kg/h</p> <p>2) Según recomendación la tasa de deposición para pase backing: 4.6 Kg/h.</p> <p>Según recomendación la tasa de deposición para segundo pase: 12 Kg/h</p>

Eficiencia de deposición	78 - 80 % (FCAW(S))	90 – 100 % (SAW) 78 - 80 % (FCAW(S))
--------------------------	---------------------	---

Según los cambios considerados se actualiza la información de las horas efectivas empleadas en la tabla 4. Considerar que para la alternativa 2 se usará un diseño de junta adicional para la unión de la envolvente con el último fondo, en este diseño se

Tabla 4 Horas efectivas de arco Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Parámetros	ALTERNATIVA 1				ALTERNATIVA 2
	SAW	SAW+FCAW(S)		TOTAL	FCAW (S)
		SAW	FCAW		
Area de la junta (cm2)	0.50	0.54	0.36	-	1.52
Longitud de cordón	31.84	6.82	6.82	-	38.66
Material a Depositar (kg.)	12.42	2.88	1.90	17.21	45.84
Tasa de deposición (kg/h)	12	12	4.6	-	4.5
Horas efectivas de arco (h)	1.03	0.24	0.41	1.69	10.19

usaran los procesos SAW y FCAW por lo que se analizaran sus parámetros por separado.

Primero se analiza el costo de material para ambas alternativas, para esto usaremos la eficiencia de los procesos para calcular el material que debemos adquirir para realizar las soldaduras. Por último, se usará una estimación del precio de los consumibles para calcular el costo total en este rubro, los cuales se muestran en la tabla 5.

Tabla 5 Costo Material Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Material de aporte	Parámetros	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2	
		SAW	SAW+FCAW(S)		TOTAL	
			SAW	FCAW		
	Material a Depositar (kg.)	12.42	2.88	1.90	17.21	45.84
	Eficiencia (%)	0.95	0.95	0.85	-	0.85
	Material a Adquir (kg.)	13.07	3.04	2.24	18.35	53.92
	Precio consumible (US\$/kg)	4.00	4.00	3.50	-	3.50
	Costo de Material (\$)	52.28	12.15	7.83	72.27	188.73

Para el costo de mano de obra se usarán las horas efectivas de arco halladas previamente en la tabla 4, luego las horas efectivas se pueden calcular con el factor de operación. Debemos establecer que este factor de operación solo considera el tipo de soldadura, posición de soldeo, utillajes empleados y condiciones operatorias. Por último, se halla el coste total en este rubro con un estimado del salario de soldador y se presenta en la tabla 6.

Tabla 6 Costo Mano de obra Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Mano de obra	Parámetros	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2	
		SAW	SAW+FCAW(\$)		TOTAL	
			SAW	FCAW		FCAW (\$)
	Horas efectivas de arco (h)	1.03	0.24	0.41	1.69	10.19
	Factor de Operación (%)	0.80	0.80	0.70	-	0.70
	Horas reales de arco (h)	1.29	0.30	0.59	2.18	14.55
	Salario soldador(US\$/h)	8.50	8.50	7.50	-	7.50
	Costo de Mano de Obra (\$)	10.99	2.55	4.43	17.98	109.13

Para el costo de las operaciones adicionales consideramos la suma del costo de seteo y costo de preparación. El costo de seteo se halla con el tiempo estimado de seteo y el salario por hora del operador que lo realizará según cada proceso, al ser el mismo soldador el que efectúa el seteo consideramos el mismo salario del soldador. Para el costo de preparación primero hallamos el tiempo de preparación con la longitud del cordón y el ratio recomendado de preparación, luego consideramos el salario de un ayudante para la preparación. Estos datos se detallan en la tabla 7. Fuente:

Tabla 7 Costo de Operaciones adicionales Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Operaciones adicionales	Parámetros	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2
		SAW	FCAW	TOTAL	FCAW
	Tiempo de seteo (h)	1.50	0.50	-	0.50
	Salario de operador de seteo (US\$/h)	8.50	7.50	-	7.50
	Costo de seteo (\$)	12.75	3.75	16.50	3.75
	Longitud del cordón (m)	38.66		-	38.66
	Ratio de preparación (h/m)	0.25		-	0.20
	Tiempo de preparación (h)	9.67		-	7.73
	Salario de ayudante para preparación (US\$/h)	5.00		-	5.00
	Costo de preparación (\$)	48.33		48.33	38.66
	Costo de Operaciones adicionales (\$)	-		64.83	42.41

Para el costo de los consumibles en cada proceso primero debemos considerar el flujo recomendado según el proceso y las horas efectivas de arco para hallar su consumo, con esto y con el precio por consumible hallamos el costo de este rubro. Estos datos se detallan en la tabla 8, como vemos en esta tabla para el proceso FCAW no se considera flujo de gas porque es autoprotegido y en el proceso SAW el consumible considerado es el fundente. Se considera el uso de soluciones en recuperación de fundente para minimizar al máximo los costos de consumibles adicionales al material de aporte.

Tabla 8 Costo de Consumibles Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Consumible (gas/fundente)	Parámetros	ALTERNATIVA 1			TOTAL	ALTERNATIVA 2 FCAW (\$)
		SAW	SAW+FCAW(S)			
			SAW	FCAW		
	Flujo de fundente (kg/h)	0.68	0.68	0.00	-	0.00
	Horas efectivas de arco (h)	1.03	0.24	0.00	-	0.00
	Consumo de fundente (kg)	0.70	0.16	0.00	-	0.00
	Precio del fundente (US\$/kg)	7.30	7.30	0.00	-	0.00
	Costo de Consumible (\$)	5.14	1.19	0.00	6.33	0.00

En la tabla 9 se consideran todos los costos parciales y los tiempos necesarios de soldadura para la comparación, se debe considerar que se excluyen los costos de depreciación de la máquina y el consumo eléctrico. La empresa cuenta con equipos auxiliares como viradores y columnas de soldadura, por lo cual no se considera una inversión inicial en este aspecto. Con una estimación inicial de cantidad de tanques a producir obtenemos el tiempo total y costo total para las alternativas 1 y 2.

Tabla 9 Costo Total Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Costos	Cantidad de Tanques	ALTERNATIVA 1 (UNITARIO)	ALTERNATIVA 2 (UNITARIO)	ALTERNATIVA 1 (TOTAL)	ALTERNATIVA 2 (TOTAL)
Horas efectivas de arco (h)	15	1.69	10.19	25.33	152.78
Tiempo de seteo (h)	15	2.00	0.50	2.00	0.50
Tiempo de preparación (h)	15	9.67	7.73	144.98	115.98
Tiempo Total (h)				172.31	269.26
Costo de Material (\$)	15	72.27	109.13	1084.00	1636.97
Costo de Mano de Obra (\$)	15	17.98	109.13	269.71	1636.97
Costo de Operaciones adicionales (\$)	15	64.83	42.41	972.38	636.15
Costo de Consumible (\$)	15	6.33	0.00	94.95	0.00
Costo Total (\$)				2421.04	3910.10

Además se elaboró una comparación de tiempo y costos para diferentes cantidades de tanques a soldar, con lo cual obtenemos las siguientes gráficas.

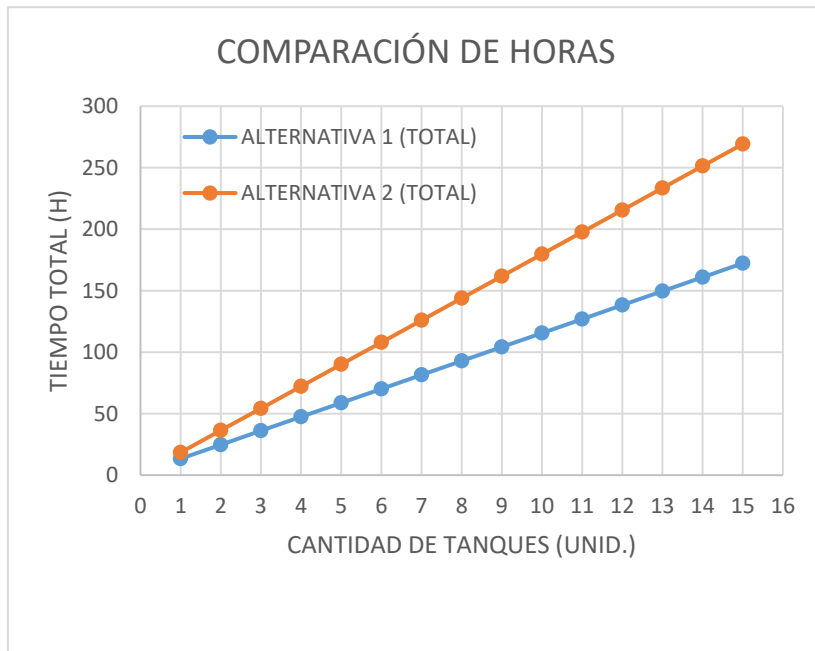


Figura 11 Comparación de Horas: Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

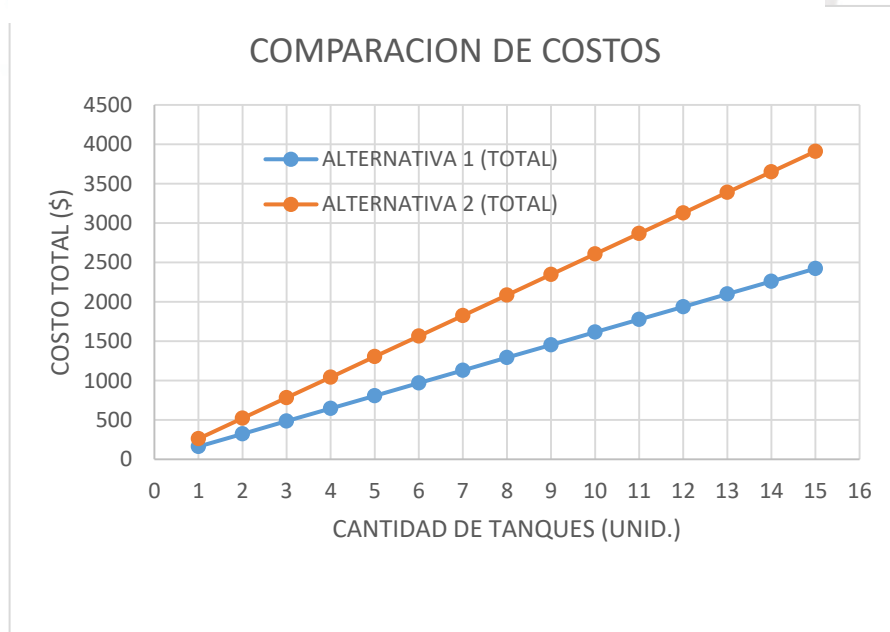


Figura 12 Comparación de Costos: Alternativa 1 y Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Con el análisis realizado se selecciona la alternativa 1 por un ahorro significativa en tiempo y costo al producir mayor cantidad de tanques de almacenamiento. Esta alternativa contempla dos procedimientos de soldadura: para proceso SAW y FCAW/SAW.



Capítulo 4: Procedimiento de Soldadura

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo 2, donde se explica las normativas y reglamentos aplicables, para este tipo de proyecto la norma ASME VIII hace referencia el uso de la norma ASME IX para la calificación de los procedimientos de soldadura y calificación de soldadores y operadores.

El propósito de un procedimiento de soldadura o WPS (Welding Procedure Specification) es garantizar y determinar que la unión soldada propuesta para la construcción sea capaz de proveer las propiedades mecánicas requeridas en servicio, para ello, se establecen una serie de ensayos de calificación de acuerdo a una determinada norma o código. Los parámetros y resultados deben quedar registrados en un registro de calificación de procedimiento de soldadura o PQR (Procedure Qualification Register).

Es importante establecer las variables esenciales, no esenciales y complementarias, definidas por el código o norma aplicable y los criterios de aceptación para cada tipo de ensayo determinado por ella. Cualquier cambio o modificación en las variables esenciales implicará una recalificación del procedimiento de soldadura, pues un cambio afectará las condiciones mecánicas y defectología de la unión soldada, mientras que los cambios en variables no esenciales, no requerirán de una nueva calificación del procedimiento pero si registrarlos. Las variables esenciales las define la norma según el proceso.

4.1 Variables esenciales

Es importante definir las variables esenciales establecidas según la norma ASME IX, las cuales están descritas en la tabla 10 para el proceso SAW y en la tabla 11 para el proceso FCAW.

Tabla 11 Variables de la especificación de procedimiento de soldadura para FCAW

Fuente: sección IX (ASME , 2015)

VARIABLES DE LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) - Soldes con Alambre Tubular (GMAW y FCAW)					
Párrafo	Resumen de variables	Esencial	Suplementario- Esencial	No esencial	
QW-402 Juntas	.1	⊕ Diseño de ranura			X
	.4	- Soporte			X
	.10	⊕ Espaciamiento de raíz			X
	.11	± Retenedores			X
QW-403 Metal Base	.5	⊕ Número de Grupo		X	
	.6	∓ Límites		X	
	.8	⊕ ∓ Límites	X		
	.9	∓ Pase > 1/2 in. (13 mm)	X		
	.10	∓ Límites (S. dir. Arc)	X		
	.11	⊕ P-No. Calificado	X		
QW-404 Material de Aporte	.4	⊕ F-Número	X		
	.5	⊕ A-Número	X		
	.6	⊕ Diámetro			X
	.12	⊕ Clasificación		X	
	.23	⊕ Forma del metal depositado	X		
	.24	± ó ⊕ Suplementario	X		
	.27	⊕ Elementos de aleación	X		
	.30	⊕ r	X		
	.32	∓ Límites (S. dir. Arc)	X		
QW-405 Posiciones	.1	⊕ Posición			X
	.3	⊕ ↑ ↓ Soldadura Vertical			X
QW-406 Precalentamiento	.1	Disminución > 100°F (55°C)	X		
	.2	⊕ Mantenimiento de Precalentamiento			X
	.3	Incremento > 100°F (55°C) (IP)		X	
QW-407 Tratamiento térmica	.1	⊕ Tratamiento térmico	X		
	.2	⊕ Tratamiento térmico (T & T rango)		X	
QW-408 Gas	.1	± Gas de arrastre ⊕ Composición			X
	.2	⊕ Sólo, combinación, ó %	X		
	.3	⊕ Ratio de flujo			X
	.5	± ó ⊕ Flujo de respaldo			X
	.9	Gas de respaldo ó ⊕ composición	X		
QW-409 Características Eléctricas	.10	- Gas de arrastre ⊕ Composición	X		
	.1	> Aporte térmico		X	
	.2	⊕ Modo de transferencia	X		
	.4	⊕ Polaridad		X	
QW-410 Técnica	.8	⊕ I & E rango			X
	.1	⊕ Cadena/Entrelazado			X
	.3	⊕ Orificio, copa ó tamaño de boquilla			X
	.5	⊕ Método de limpieza			X
	.6	⊕ Método de arranque			X
	.7	⊕ Oscilación			X
	.8	⊕ Distancia tubo de trabajo			X
	.9	⊕ Pases múltiples a simples/lado		X	X
	.10	⊕ Simple a Múltiples electrodos		X	X
	.15	⊕ Espaciamiento de electrodo			X
	.25	⊕ Manual ó Automático			X
	.26	± Granallado			X
	.64	Uso de procesos térmicos	X		

Legenda:
 + Adición
 - Supresión
 ↑ Cuesta arriba
 ↓ Cuesta abajo
 > Incremento/mayor a
 < Disminución/menor a
 ← Directo
 → Revis
 ⊕ Cambio

Por lo tanto en los siguientes puntos, se abarcará los temas diseño de junta, material base, material de aporte, posiciones, precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura.

4.2 Material Base

El material a emplear en el proyecto son planchas de acero SA612 roladas, las cuales tienen un espesor de 13 mm. En este sentido, las planchas deben cumplir la norma ASTM A612 o ASME SA-612 ya que estas normas son equivalentes.

Este acero es muy utilizado en la construcción de recipientes a presión y de acuerdo a su composición química es un acero no aleado.

La norma ASTM A612 abarca planchas de acero al carbono-manganeso-silicio de hasta 1 pulgada usadas para recipientes a presión soldados que trabajarán a moderadas y bajas temperaturas.

4.2.1 Tratamiento térmico:

Las planchas adquiridas son previamente roladas y deben ser solicitadas con un tratamiento térmico de normalizado y/o de alivio de tensiones.

4.2.2 Composición química:

La norma indica que el acero debe cumplir con los requerimientos de la Tabla 12 a menos que sea un acero al carbono desoxidado al vacío, pero este no es el caso.

Tabla 12 Requerimientos químicos ASTM A612/A12M-12

Fuente: Norma A612 (ASTM, 2019)

ELEMENTOS	COMPOSICIÓN (%)
Carbono, máx	0.29
Manganeso	0.92-1.62
Fósforo, máx	0.025
Azufre, máx	0.025
Silicio	0.13-0.55
Cobre, máx ^A	0.38
Níquel, máx ^A	0.28
Cromo, máx ^A	0.29
Molibdeno, máx ^A	0.09
Vanadio, máx ^A	0.09

A: Cuando el análisis muestra que la cantidad de un elemento es 0.02% o menor, el valor se puede

Según el contenido de carbono descrito en la tabla anterior se trata de un acero de medio carbono.

4.2.3 Propiedades Mecánicas

Las probetas de tracción extraídas de las planchas deben cumplir con los requisitos indicados en la Tabla 13.

Tabla 13 Requerimientos de tracción

Fuente: (ASTM, 2019)

	ESPESOR
	Mayor a 0.5 hasta 1 in. [Mayor a 12.5 hasta 25 mm]
Resistencia a la tracción, ksi [Mpa]	81-101 [560-695]
Límite elástico, mín, ksi [Mpa]	50[345]
Alargamiento en 8 in. [200 mm], min%	16
Alargamiento en 2 in. [50 mm], min%	22

A: Determinado por el método de compensación del 0.2% o el método de extensión bajo carga del 0.5%

B: Ver especificación A20/A20M para ajustes de alargamiento

Adicionalmente según ASME Sección II PARTE D tabla 1A (figura 9) nos brinda una clasificación del material como:

- Composición nominal: Acero al carbono
- Forma del producto: Plancha
- Especificación: SA-612
- Designación según UNS : K02900
- Tamaño/espesor: entre ½ pulgada y 1 pulgada de espesor
- P-Nº: 10 C
- Grupo Nº: 1

4.3 Posición de soldeo

Para el primer procedimiento el proceso de soldadura es SAW, la fabricación se realizará en posición plana mediante la rotación del tanque con la ayuda de viradores. Las dimensiones del tanque (6 m de largo y 2 m de diámetro) son tales que cada unión, ya sea circunferencial o longitudinal, según la tabla 14, podría considerarse como una unión en posición plana, por lo tanto se calificará el proceso mediante la unión de dos planchas en posición 1G.

Tabla 14 Calificación de unión soldada de plancha a tope - Limite de posición y diámetro

Fuente: sección IX (ASME, 2015)

Posición	A tope		Filete
	Plancha y Tuberías mayor a 24 in. (610 mm) O.D.	Tubería ≤ 24 in. (610 mm) O.D.	Plancha y Tuberías
1G	F	F [Note (2)]	F
2G	F,H	F,H [Note (2)]	F,H
3G	F,V	F [Note (2)]	F,H,V
4G	F,O	F [Note (2)]	F,H,O
3G y 4G	F,V,O	F [Note (2)]	Todas
2G, 3G, y 4G	Todas	F,H [Note (2)]	Todas
Posición Especial (SP)	SP,F	SP,F	SP,F

Notas:

(1) Posiciones de soldeo:

F: Plano

H:Horizontal

V: Vertical

O: Sobrecabeza

(2) Tuberías de 2 1/8" (73mm) O.D. y mayores.

Para el segundo procedimiento se usan los procesos SAW y FCAW, al ser este último un proceso semiautomático requerirá que el soldador efectúe el procedimiento alrededor del cilindro, por lo que se debe calificar en todas las posiciones. Se calificará mediante la unión de dos tuberías en posición 6G, la cual según la tabla 15 califica todas las posiciones por lo que incluye la posición 1G necesaria para SAW.

Tabla 15 Calificación de unión soldada de tubo a tope - Limite de posición y diámetro

Fuente: sección IX (ASME, 2015)

Posición	A tope		Filete
	Plancha y Tubería mayor a 24 in. (610 mm) O.D.	Tubería < 24 in. (610 mm) O.D.	Plancha y Tubería
1G	F	F	F
2G	F,H	F,H	F,H
5G	F,V,O	F,V,O	F,V,O
6G	All	All	All
2G y 5G	All	All	All
Posición Especial (SP)	SP,F	SP,F	SP,F

Notas:

(1) Posiciones de soldeo:

F: Plano

H: Horizontal

V: Vertical

O: Sobrecabeza

(2) Tuberías de 2 1/8" O.D. y mayores.

El tubo para el cupón de prueba será 6" Sch120, cuyo diámetro exterior es 168.3 mm, que según la tabla 16 califica desde un diámetro exterior de 73 mm.

Tabla 16 Diámetro exterior calificado según diámetro de cupón de prueba

Fuente: sección IX (ASME, 2015)

Diámetro exterior de cupón de prueba, in. (mm)	Diámetro exterior calificado	
	Mín.	Máx.
Menor que 1 (25)	Tamaño soldado	Ilimitado
Entre 1 (25) y 2 7/8 (73)	1 (25)	Ilimitado
Mayor a 2 7/8 (73)	2 7/8 (73)	Ilimitado

4.4 Diseño de junta

Se toma en consideración las recomendaciones antes mencionados según el Welding Handbook: Procesos de soldadura. Se empleará una unión de dos pases para la fabricación de la envolvente (debido a que se tiene acceso por ambos lados de la soldadura); para el segundo procedimiento se usará un pase de respaldo con proceso FCAW y un paso de relleno con SAW.

Por tanto se emplearán los diseños de unión recomendados en la figura 13 y figura 14

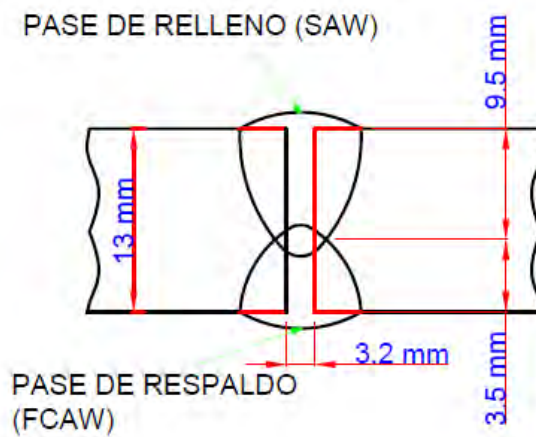


Figura 13 Diseño de unión para SAW y FCAW

Fuente: Adaptación (AWS, 1991)

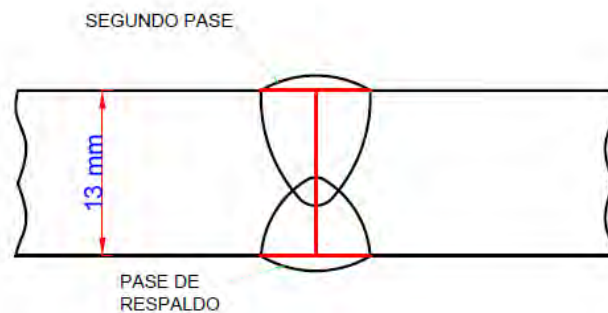


Figura 14 Diseño de unión para doble pase SAW

Fuente: Adaptación (AWS, 1991)

4.5 Material de Aporte

La selección del material de aporte se realizó tomando en cuenta:

- Proceso de soldadura a usar.
- Identificación del metal base.
- Posición en la cual debe efectuarse la soldadura.
- Espesor y forma del metal base.
- Diseño de la junta.
- Especificaciones y condiciones de servicio.
- Eficiencia y rapidez requerida en la operación.

4.5.1 Material de Aporte para proceso SAW

Se buscó recomendaciones en el capítulo de soldadura por arco sumergido del *Welding Handbook-Welding Processes*, en donde se indica que para aceros de baja aleación se use la norma ANSI/AWS A5.23, en la tabla 17 se puede ver la designación general de fundente y alambre para esta norma.

Tabla 17 Fundente y alambre recomendados para proceso SAW

Fuente Adaptación (AWS, 1991)

Fundente/Alambre ANSI/AWS A5.23
F7XX-EXXX-X
F8XX-EXXX-X
F9XX-EXXX-X
F10XX-EXXX-X
F11XX-EXXX-X
F12XX-EXXX-X

La empresa Lincoln Electric cuenta con una combinación fundente y alambre denominado LINCOLNWELD® LA-84, este material cumple con los requisitos de resistencia mecánica puesto que cuenta con una resistencia a la tracción de 710 MPa como resultado típico, mientras que el metal base posee una resistencia a la tracción máxima de 695 MPa.

La ficha técnica recomienda esta combinación de fundente y alambre para aplicaciones en recipientes a presión fabricados con P355 GH, cuya norma equivalente es A612 la cual se usará en el presente proyecto. Los datos de la ficha técnicas se encuentran en el Anexo 2.

4.5.2 Material de Aporte para proceso FCAW

Se buscó recomendaciones en el capítulo de soldadura por alambre tubular del *Welding Handbook-Welding Processes*, en donde se indica que para aceros de baja aleación se use la norma ANSI/AWS A5.20, en la tabla 18 se puede ver la designación general de alambres autoprotegidos para esta norma.

Tabla 18 Fundente y alambre recomendados para proceso FCAW

Fuente Adaptación (AWS, 1991)

Alambres Autoprotegidos ANSI/AWS A5.20
EXXT-3
EXXT-4
EXXT-6
EXXT-7
EXXT-8
EXXT-10
EXXT-11
EXXT-13
EXXT-14

La empresa Lincoln Electric cuenta con un alambre denominado INNERSHIELD® NR® -311-MP, este material cumple con los requisitos de resistencia mecánica puesto que cuenta con una resistencia a la tracción de 700 MPa como resultado típico, mientras que el material base posee una resistencia a la tracción máxima de 695 MPa.

En el primer procedimiento se usará un consumible LINCOLNWELD® LA-84 de diámetro de 3.2 mm para usarlo tanto en el pase de raíz como en pases de relleno y acabado.

En el segundo procedimiento se usará un consumible INNERSHIELD® NR® -311-MP de diámetro 2.4 mm para usarlo en el pase de raíz y un consumible LINCOLNWELD® LA-84 de 4 mm para usarlo en el pase de relleno.

Sobre los parámetros de operación tenemos el siguiente resumen en la tabla 19.

Tabla 19 Resumen de parámetros eléctricos para procedimientos de soldadura

Fuente Adaptación (AWS, 1991)

	Pase	Proceso	Voltaje (V)	Corriente (A)	Polaridad
Primer procedimiento	de raíz	SAW	34	475	DCEP
	de relleno	SAW	36	500	DCEP
Segundo procedimiento	de raíz	FCAW	25	300	DCEN
	de relleno	SAW	33	500	DCEP

4.6 Temperatura mínima permisible

Según el punto UW-30 de la norma ASME sección VIII – DIVISIÓN, cuando la temperatura del metal base esta entre 0 ° C y -20 ° C se debe calentar a temperatura al menos tibia a la mano (aproximadamente más de 15 ° C) antes de comenzar la soldadura, en nuestro caso no será necesario porque la fabricación se realizará dentro de un taller.

4.7 Temperatura de precalentamiento

En las recomendaciones de temperatura de precalentamiento del *Welding Handbook Welding Processes* se hace referencia a la norma ANSI/AWS D1.1-90.

En el Anexo H de esta norma se encuentra la selección de método (H5), para empezar se calcula el carbono equivalente con la Ecuación 1

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \dots (1)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 1, considerando los valores máximos se tiene:

$$CE = 0.789$$

Con el valor hallado de CE y el porcentaje de carbono (0.29 %) se ingresa en la Figura 15 y se obtiene que el material base se encuentre en la Zona III de soldabilidad.

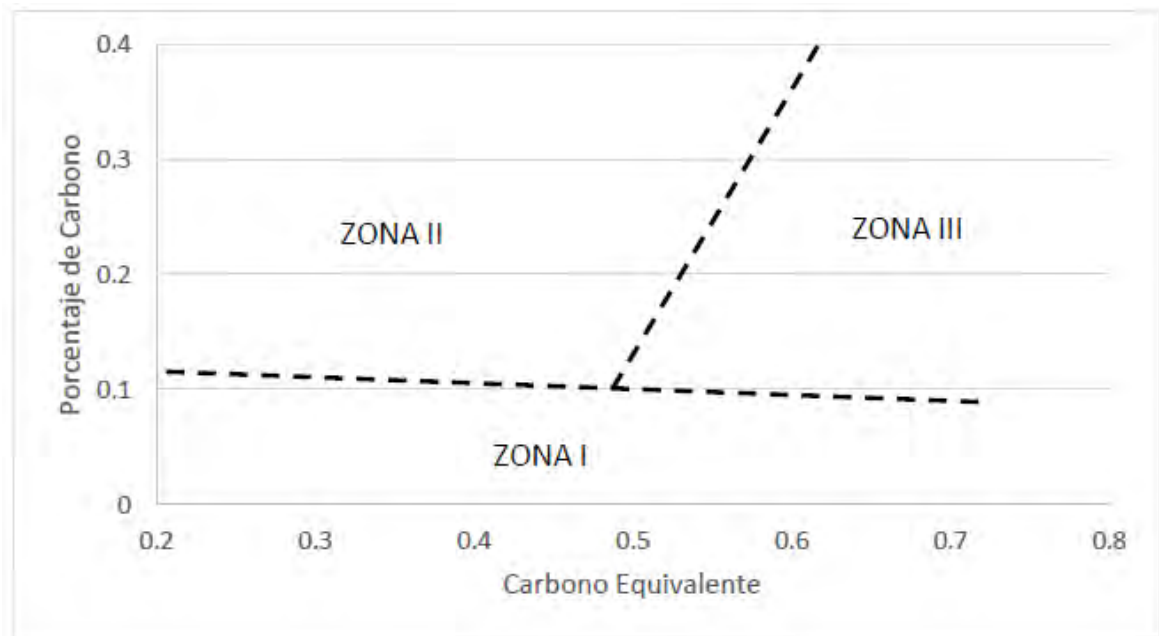


Figura 15 Gráfica porcentaje de carbono vs Carbono equivalente

Fuente: Elaboración propia

Según la norma AWS-D1.1 Anexo H se debe emplear el método de control de hidrogeno para calcular la temperatura de precalentamiento.

El método de control de hidrógeno indica que se debe calcular el valor del parámetro de composición (PCM) de acuerdo con la Ecuación 2. Luego se debe calcular el índice de Suseptibilidad de acuerdo a la Ecuación 3, donde H es el nivel de hidrógeno difundido en el metal soldado (mL/100g de metal depositado).

Para el proceso SAW con fundente seco que se usa en este procedimiento se clasifica el nivel de hidrógeno como H2, cuyo nivel de hidrógeno difundido es 10 mL/100g

$$PCM = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \dots (2)$$

$$\text{Índice de Susceptibilidad} = 12 PCM + \log H \dots (3)$$

Efectuando se tendrá un PCM de 0,35 y un índice de susceptibilidad de 6.28.

Con el valor de H2 y PCM igual a 0.35 se ingresa en la tabla 20, el grupo de Índice de susceptibilidad será F (5,1 – 5,5).

Tabla 20 Grupos de índice de susceptibilidad según nivel de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia

Nivel de hidrógeno	Grupos de índice de susceptibilidad					
	PCM					
	< 0,18	< 0,23	< 0,28	< 0,33	< 0,38	
H1	A	B	C	D	E	
H2	B	C	D	E	F	
H3	C	D	E	F	G	
Donde A, B, C, D, E, F, G representan rangos de grupos de índices de susceptibilidad						
A= 3,0	B= 3,1 – 3,5	C= 3,6 – 4,0	D= 4,1 – 4,5	E= 4,6 – 5,0	F= 5,1 – 5,5	G= 5,6 – 7,0

Luego se halla la temperatura de precalentamiento y de interpase recurriendo a la tabla 21, donde se necesita dos nuevos datos de entrada: espesor de material base (13 mm) y el nivel de embridamiento, el cual consideraremos como medio. Por lo tanto, la temperatura de precalentamiento y de interpase será 145 °C. Se considerará como temperatura máxima de precalentamiento y de interpase 260°C, según recomendación del *Welding Handbook-Welding Processes*.

Tabla 21 Índice de susceptibilidad de embridamiento

Fuente: (AWS, 1991)

		Índice de susceptibilidad al agrietamiento						
Nivel de restricción	Espesor (mm)	A	B	C	D	E	F	G
		3,0	3,1-3,5	3,6-4,0	4,1-4,5	4,6-5,0	5,1-5,5	5,6-7,0
Bajo	< 9.5	<20°C	<20°C	<20°C	<20°C	60°C	140°C	150°C
	9.5 - 19.05	<20°C	<20°C	20°C	60°C	100°C	140°C	150°C
	> 19.05 -38.1	<20°C	<20°C	20°C	80°C	110°C	140°C	150°C
	38.1-76.2	20°C	20°C	40°C	95°C	120°C	140°C	150°C
	>76.2	20°C	20°C	40°C	95°C	120°C	140°C	150°C
Medio	< 9.5	<20°C	<20°C	<20°C	<20°C	70°C	140°C	160°C
	9.5 - 19.05	<20°C	<20°C	20°C	80°C	115°C	145°C	160°C
Nivel de embridamiento: es el grado de fijación que tiene una junta soldada y que impide su movimiento durante la soldadura. Nivel de embridamiento bajo: Uniones soldadas con razonable libertad de movimiento. Nivel de embridamiento medio: Uniones soldadas con reducida libertad de movimiento (uniones fijas a otras estructuras) Nivel de embridamiento alto: Uniones soldadas sin libertad de movimiento (ejemplo: uniones de gran espesor o								

4.8 Tratamiento térmico post-soldadura

Según el artículo UW-40 de la norma ASME VIII: “La operación del tratamiento térmico posterior a la soldadura se realizará de acuerdo con los requisitos establecidos en la parte aplicable en la Subsección C utilizando uno de los siguientes procedimientos. En los procedimientos que siguen, la banda de remojo se define como el volumen de metal requerido para cumplir o exceder las temperaturas mínimas de PWHT enumeradas en las Tablas UCS-56-1 a UCS-56-11.

La tabla que corresponde usar se decide según el material base que le corresponde el Grupo N° 1 y P-N°. 10 C.

Tabla 22 Requerimientos de tratamientos post- soldadura para aceros al carbono de baja aleación
Fuente: Adaptación (ASME, 2015)

Tratamiento Térmico Postsoldadura para acero al carbono y de baja aleación- P-No. 10C		
Material	Temperatura de Mantenimiento Mínima (°C)	Mínimo tiempo de mantenimiento a temperatura normal para espesor nominal
P-No. 10C Gr. No. 1	540	1 hr mínimo, más 15 min/in para espesores mayores a 1"

Además se indica los casos para los que el tratamiento posterior a la soldadura no es necesario, uno de ellos es el siguiente:

- (1) Para soldaduras de ranura de no más de 1/2 pulg. (13 mm) de tamaño y soldaduras de filete con garganta de no más de 1/2 pulg. (13 mm) que sujetan conexiones de boquilla, que tienen un diámetro interior acabado no mayor de 2 pulg. (50 mm) siempre que las conexiones no formen ligamentos que requieran un aumento en el grosor de la carcasa o la cabeza y se precaliente a una temperatura mínima de 95 °C.

Por lo tanto, se concluye que no es necesario realizar ningún tratamiento posterior a la soldadura, debido a que se realizará un precalentamiento de 145°C. Es por ello que el tratamiento térmico no será considerado dentro del procedimiento. En la figura 16 y 17 se presentan los WPS.

QW-482 - ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)			
Nombre de la compañía: <u>Recipientes San Miguel</u>		Por: <u>Diego André Rios Cerdán</u>	
Especificación de Procedimiento No. <u>204</u>		Fecha: <u>20 / 09 / 2020</u>	PQR de soporte: _____
Revisión No. <u>02</u>		Fecha: <u>20 / 09 / 2020</u>	
Proceso(s) de soldadura: SAW		Tipo: MECANIZADO	
JUNTA (QW-402) Diseño de junta: <u>A TOPE</u> Respaldo: (Si) _____ (No) <u>X</u> Material de respaldo: (Tipo): <u>Cordon de soldadura posterior</u> <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Refractario <input type="checkbox"/> No metálico <input type="checkbox"/> Otro Esquema, dibujo de fabricación, símbolos de soldadura o descripción escrita debe mostrar el arreglo general de las partes ha ser soldadas. Donde sea aplicable, la apertura de raíz y los detalles de la soldadura debe ser especificada.			
METAL BASE (QW-403)			
N° P: <u>-</u> Grupo N°: <u>-</u> al N° P: <u>-</u> Grupo N°: <u>-</u>		O	
Especificación de tipo y grado: _____		SA612	
A la especificación de tipo y grado: _____		SA612	
O		Análisis químico y propiedades mecánicas: _____	
Hasta el análisis químico y propiedades mecánicas: _____		_____	
Rango de espesores			
Metal base:	Ranura: <u>5.0 mm hasta 26.0mm</u>	Filete: _____	_____
Diam. Tubo:	Ranura: _____	Filete: _____	_____
Otro _____			
METAL DE APORTE (QW-404)			
Especificación N° (SFA)	-	A5.23	
AWS No (Clase)	-	F9P4EF3-F3	
N° F	-	6	
N° A	-	1	
Tamaño del electrodo	-	3.2 mm	
Metal depositado _____			
Rango de espesores			
Ranura	-	Hasta 13 mm	
Filete	--	--	
Nombre comercial	-	LINCOLNWELD LA-84-FLUX 839	
Inserto consumible	--	--	

Figura 16 WPS N°204

POSICIONES (QW-405)				TRATAMIENTO DE POST-CALENTAMIENTO					
Posición(es) de ranura		<i>Plana</i>		Rango de temperatura:		--			
Progresión: Asc:		--		Desc.:		--			
Posición de filete		-----		GAS (QW-408)					
PRECALENTAMIENTO (QW-406)				Composición Porcentual					
Temp. Pre calentamiento		Mín: 145 °C		Gas(es)		Mezcla		Flujo	
Temp. Interpase		Mín: 145 °C		Protección		--		--	
Mantenimiento pre calentamiento:		--		Arrastre		--		--	
				Respaldo		--		--	
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)									
Corriente AC o DC				<i>DC</i>		Polaridad			<i>DCEP</i>
Rango de amperaje				475-500		Rango de voltaje			34-36
Tamaño y tipo de electrodo de tungsteno				--		(Tungsteno puro, 2% toriado, etc)			
Modo de transferencia en GMAW				--		(Arco spray, corto circuito, etc)			
Velocidad de alimentación de alambre				--					
TÉCNICA									
Pase ancho o angosto				<i>El requerido</i>					
Orificio o tamaño de protección gaseosa				--					
Limpieza inicial y entrepasadas (escobillado, esmerilado, etc)				<i>Disco abrasivo – escobilla</i>					
Método de resanado de raíz				<i>Esmerilado</i>					
Oscilación				--					
Distancia de boquilla a pieza de trabajo				-					
Pase múltiple o simple				<i>El requerido</i>					
Electrodo simple o múltiple				<i>Simple</i>					
Velocidad de avance (rango)				<i>Ver tabla</i>					
Martilleo				--					
Otro				--					
Pase N°	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de avance (cm/min)	Otros	
		Clase	Diam	Polaridad	Amperaje				
1	SAW	F9P4EF3-F3	3.2 mm	DCEP	475	34	51	--	
2	SAW	F9P4EF3-F3	3.2 mm	DCEP	500	35	54	--	
--									
--									
--									
--									
--									

POSICIONES (QW-405)				TRATAMIENTO DE POST-CALENTAMIENTO						
Posición(es) de ranura		Todas		Rango de temperatura:		--				
Progresión: Asc:		--		Desc.:		--				
Posición de filete				GAS (QW-408)						
PRECALENTAMIENTO (QW-406)				Composición Porcentual						
Temp. Pre calentamiento		Min:		145 °C		Gas(es)	Mezcla	Flujo		
Temp. Interpase		Min:		145 °C		Protección	--	--		
Mantenimiento pre calentamiento:		--		Arrastre	--	--	--	--		
Respaldo	--	--	--	--	--	--	--	--		
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)										
Corriente AC o DC				DC		Polaridad			DCEN / DCEP	
Rango de amperaje				300-500		Rango de voltaje			25-33	
Tamaño y tipo de electrodo de tungsteno				--		(Tungsteno puro, 2% toriado, etc)			--	
Modo de transferencia en FCAW				--		Spray			(Arco spray, corto circuito, etc)	
Velocidad de alimentación de alambre				--		--			--	
TÉCNICA										
Pase ancho o angosto				--		El requerido			--	
Orificio o tamaño de protección gaseosa				--		--			--	
Limpieza inicial y entrepasadas (escobillado, esmerilado, etc)				--		Disco abrasivo – escobilla			--	
Método de resanado de raíz				--		Esmerilado			--	
Oscilación				--		--			--	
Distancia de boquilla a pieza de trabajo				--		-			--	
Pase múltiple o simple				--		El requerido			--	
Electrodo simple o múltiple				--		Simple			--	
Velocidad de avance (rango)				--		Ver tabla			--	
Martilleo				--		--			--	
Otro				--		--			--	
Pase N°	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de avance (cm/min)	Otros		
		Clase	Diam	Polaridad	Amperaje					
1	FCAW	EZ1T-11	2.4 mm	DCEN	300	25	16	--		
2	SAW	F9P4EF3-F3	4 mm	DCEP	500	33	53	--		
--										
--										
--										
--										
--										

Figura 17 WPS N°205

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5: Calificación del procedimiento de soldadura

La calificación del procedimiento de soldadura se realizará según las recomendaciones de la norma ASME sección IX. Esta sección contiene requisitos para la calificación de soldadores, operadores de soldadura, operadores de soldadura fuerte y los procesos de unión de materiales que usan durante las operaciones de soldadura, soldadura fuerte y fusión para la construcción de componentes bajo ASME VIII Código de recipientes a presión, los códigos ASME B31 para tuberías de presión y otros códigos, estándares y especificaciones que hacen referencia a esta sección.

El propósito de calificar la especificación del procedimiento es demostrar que el proceso de unión propuesto para la construcción es capaz de producir juntas que tengan las propiedades mecánicas requeridas para la aplicación prevista. La calificación de la especificación del procedimiento demuestra las propiedades mecánicas temáticas de la unión realizada mediante un proceso de unión, y no la habilidad de la persona que utiliza el proceso de unión.

El registro de calificación de procedimiento (PQR) documenta lo que ocurrió durante la producción de un cupón de prueba de calificación de procedimiento y los resultados de probar ese cupón. Como mínimo, el PQR documentará las variables esenciales de la prueba de calificación del procedimiento aplicadas durante la producción de la junta de prueba y los resultados de las pruebas requeridas. Cuando se requiera una prueba de resistencia para la calificación de la especificación del procedimiento, las variables esenciales suplementarias aplicables se registrarán para cada proceso. El PQR debe ser accesible para el inspector autorizado. Una o más especificaciones de procedimiento pueden ser soportadas por uno o más PQR (s), y un PQR puede ser usado para soportar una o más especificaciones de procedimiento (s).

5.1 Tipos y Número de probetas a ensayar

El tipo y el número de muestras de prueba que se someterán a prueba para calificar los procedimientos WPS No 204 y WPS No 205 de una unión soldada se indican en la tabla 23. Para el cupón de prueba del primer procedimiento se usará planchas con espesor completo (13 mm), para el segundo procedimiento se usará tubos 6" Sch120 (14.27 mm). Si alguna muestra de prueba requerida no cumple con los criterios de aceptación aplicables, el cupón de prueba se considerará como fallido

Tabla 23 Ensayos mecánicos para calificación de WPS

Fuente: Fuente: Adaptación (ASME, 2015)

Ensayos de tracción y doblado transversal para soldadura de ranura							
Espesor T del cupón de prueba, soldado (mm)	Rango de espesor de metal base calificado (mm)		Máximo espesor t de material de aporte depositado calificado	Tipo y número de ensayos requeridos			
	Mínimo	Máximo		Tracción	Doblado de Lado	Doblado de Cara	Doblado de raíz
Menos de 1.5	T	2T	2t	2	-	2	2
De 1.5 hasta 10	1.5	2T	2t	2	[Note (1)]	2	2
Mayor a 10 hasta 19	5	2T	2t	2	[Note (1)]	2	2

Nota:
(1) Las pruebas de doblado de lado pueden sustituirse por los ensayos de doblado de cara y raíz requeridos cuando el espesor es 10 mm ó mayor

Por lo tanto, para ambos espesores requieren la misma cantidad y tipo de ensayos:

- 2 ensayos de tracción
- 2 ensayos de doblado de cara
- 2 ensayos de doblado de raíz

5.2 Ensayo de tracción

Las probetas de sección reducida extraídas de la plancha rolada soldada deben cumplir con la figura 18, la cual fue adaptada según lo detallado en la norma ASME IX, en el cual se considera como plancha debido al gran diámetro del tanque y que para espesores de hasta 25 mm, inclusive, se utilizará una muestra de espesor completo para cada prueba de tracción.

La longitud de la sección reducida debe ser mayor al espesor más 16 mm. La longitud total debe ser de al menos 250 mm y ser suficiente para ser sujetado por las mordazas de la máquina de tracción. Las dimensiones de la probeta se indican en la siguiente figura 18.

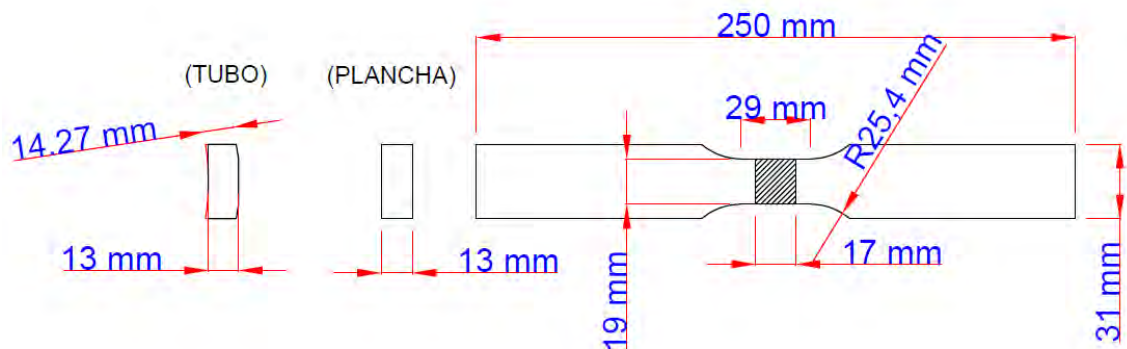


Figura 18 Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción

Fuente: Adaptación (ASME, 2015)

Tomemos en cuenta que las dimensiones de la probeta incluyen ambos procedimientos, siendo el espesor en lo que difieren. En el procedimiento WPS No 205, cuyo cupón será un tubo, se debe maquinarse la cantidad mínima necesaria para obtener caras planas paralelas sobre la sección reducida.

El procedimiento para el ensayo de tracción se realizará según lo que establece QW-152 en el Artículo I del ASME IX y los criterios de aceptación los describe QW-153 en el Artículo I del ASME IX, siendo el $\sigma_{\text{máx}}$ del material base de 695 MPa.

5.3 Ensayo de doblado guiado de cara y raíz

Las probetas para este ensayo se preparan por corte de la plancha de la Figura 15, las superficies de corte serán denominadas como lados de la probeta, las otras dos serán denominadas superficie de cara y la raíz. Según el inciso 7.1 se realizarán ensayos de cara y raíz transversal, en donde la soldadura es transversal al eje longitudinal de la probeta.

Para las dimensiones de la probeta se debe remitir a QW-462.3 (a). Para doblado de cara transversal se tiene la Figura 19, en donde se observan las dimensiones requeridas para los procesos del WPS No 204 y WPS No 205. Para este ensayo disminuye el espesor por el lado de la raíz hasta una dimensión que se obtiene de la Tabla 16, en ambos casos la dimensión será 10 mm.

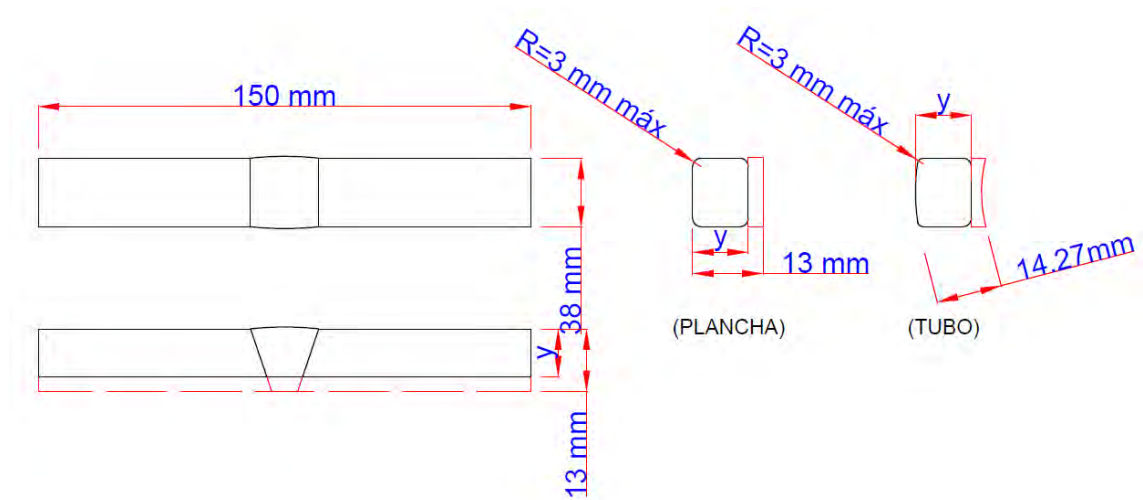


Figura 19 Esquema y dimensiones de probeta para doblado transversal

Fuente: Adaptación (ASME, 2015)

Para doblado de raíz transversal se tiene la Figura 20, en donde se observan las dimensiones requeridas. Para este ensayo disminuye el espesor por el lado de la cara hasta una dimensión que se obtiene de la Tabla 24.

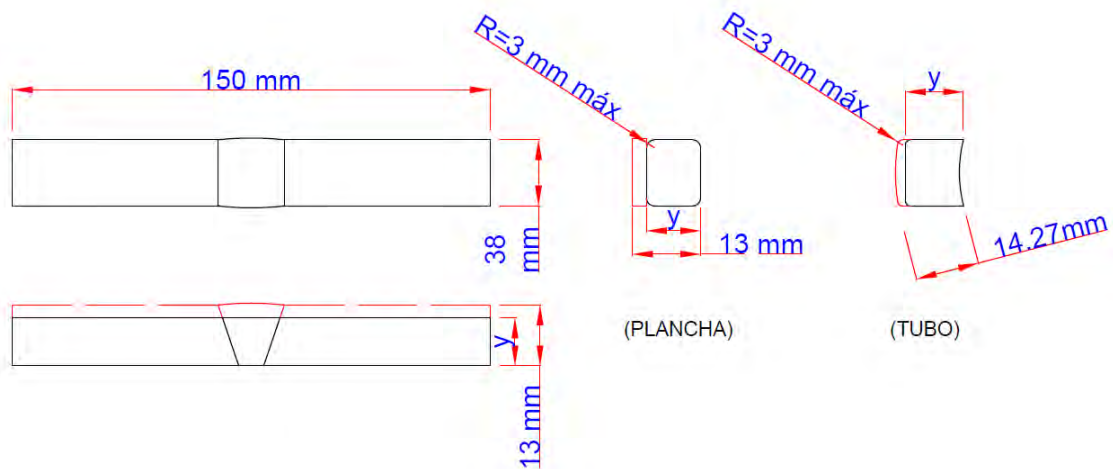


Figura 20 Esquema y dimensiones de probeta de doblado de cara y raíz

Fuente: Adaptación (ASME, 2015)

Tabla 24 Reducción de espesor de la probeta

Fuente: Adaptación (ASME, 2015)

Espesor T (mm)	y (mm)	
	P-No. 23, F-No. 23, F-No. 26, ó P-No. 35	Otros Metales
$1.5 < 3$	T	T
3-10	3	T
> 10	3	10

Según las propiedades del material y las dimensiones de la probeta, el radio del pin para el ensayo de doblado es 52 mm.

El procedimiento para el ensayo de doblado se realizará según lo que establece QW-162 en el Artículo I del ASME IX y los criterios de aceptación los describe QW-163 en el Artículo I del ASME IX.

5.4 Cupón de soldadura y localización de probetas

5.4.1 Cupón de WPS No 204

Basándonos en las recomendaciones del ASME sección IX, para planchas de un espesor menor a 19 mm (3/4") las probetas serán extraídas del cupón según se describe en la figura 21. Para el ancho del cupón consideramos los 250 mm de la probeta de tracción porque supera a los 150 mm de la probeta de doblado, se le añade 25 mm a cada extremo para poder maquinar y llegar a las dimensiones necesarias para las probetas, con lo que obtenemos 300 mm de ancho.

Para el largo del cupón consideramos los 38 mm de la probeta de doblado porque supera a los 31 mm de la probeta de tracción, luego consideramos a todas las probetas con esta dimensión y aumentamos 4 mm a ambos lados por las pérdidas al momento del corte con lo que obtenemos 332 mm de largo.

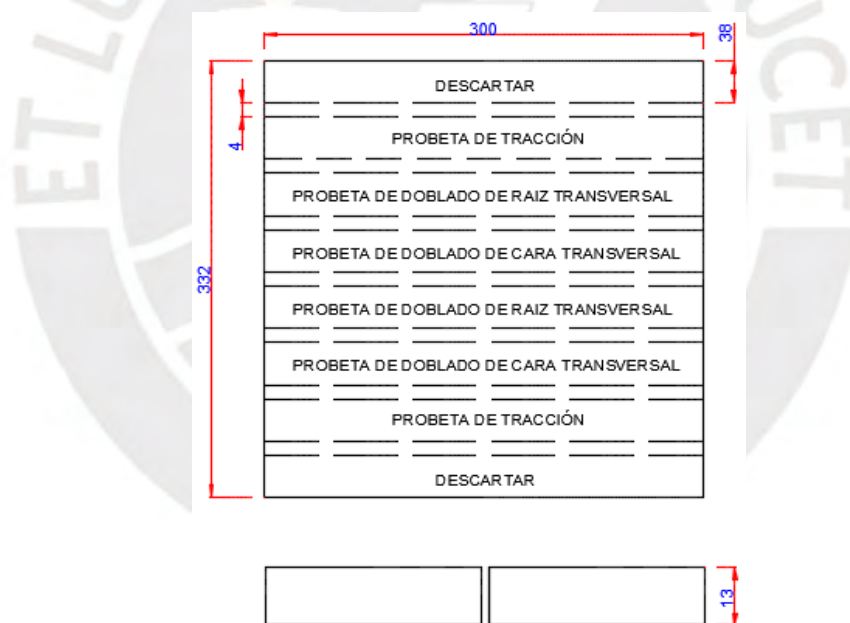


Figura 21 Cupón para calificación de soldadura-WPS N° 204

Fuente: Adaptación (ASME, 2015)

5.4.2 Cupón de WPS No 205

Para este cupón se determinó un tubo de 6" Sch120 con espesor de 14.27 mm, con lo cual califica al espesor de 13 mm que requerimos para el proyecto. Al igual que para el cupón de plancha el ancho se considera los 250 mm de la probeta de tracción, añadimos 25 mm a cada extremos con lo cual requeriremos unir dos tubos de 150 mm para la calificación. La distribución de las probetas para los ensayos se muestra en la figura 22.

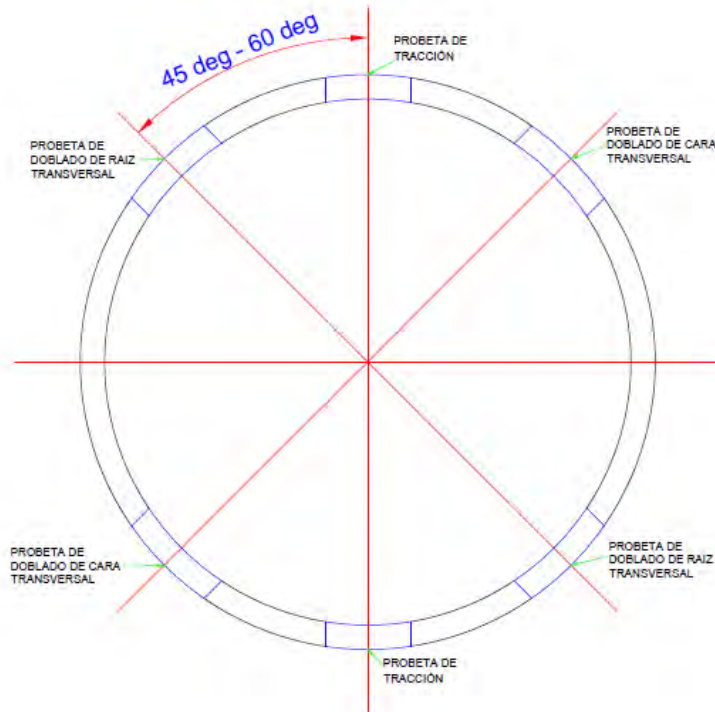


Figura 22 Cupón para calificación de soldadura-WPS N° 205

Fuente: Adaptación (ASME, 2015)



Capítulo 6: Calificación del operador

Para calificar al operador del proceso SAW para la fabricación se empleará el Artículo III de la norma ASME IX, este artículo enumera los procesos de soldadura por separado, con las variables esenciales que se aplican a las calificaciones de desempeño del soldador y del operador de soldadura.

Cada operador de soldadura que suelde según las reglas de este Código deberá haber aprobado los exámenes mecánicos y visuales prescritos en los puntos siguientes. Alternativamente, los operadores de soldadura pueden estar calificados por END volumétrica al hacer una soldadura de ranura usando SMAW, SAW, GTAW, PAW, EGW y GMAW (excepto el modo de cortocircuito para el examen radiográfico) o una combinación de estos procesos. En caso de END volumétrico, la longitud mínima de cupón a examinar debe ser de 6 pulg. (150 mm).

6.1 Tipo y Número de probetas para prueba mecánica

El tipo y la cantidad de especímenes de prueba requeridos para calificar a los operadores se indican en la tabla 25. Al igual que en la calificación del procedimiento, en el cupón de prueba del primer procedimiento se usará planchas con espesor completo (13 mm), para el segundo procedimiento se usará tubos 6" Sch120 (14.27 mm).

Tabla 25 Probetas para calificación de operador

Fuente: Adaptación sección IX (ASME, 2015)

Especímenes de Prueba				
Espesor del metal de soldadura (mm)	Inspección Visual por QW-302.4	Doblado de Lado	Doblado de Cara QW-462.3(a) ó QW-462.3 (b)	Doblado de raíz QW-462.3 (a) ó QW-462.3 (b)
Menos a 10	X	-	1	1
Desde 10 hasta 19	X	2 [Nota (1)]	[Nota(1)]	[Nota(1)]
Desde 19 a más	X	2	-	-

Notas:
(1) Un ensayo de doblado de cara y de raíz pueden ser reemplazados por 2 ensayos de doblado de lado y viceversa.

Por lo tanto, para el espesor igual a 13mm se debe realizar inspección visual y 2 ensayos de doblado de lado (estos pueden ser reemplazados por un ensayo de doblado de raíz y un ensayo de doblado de cara, y viceversa).

6.2 Ensayo de doblado guiado de cara y raíz

La preparación de la probeta, procedimiento y criterios de aceptación, al igual que para la calificación del procedimiento, se realizarán según lo establecido en 5.3.

6.3 Ensayos no destructivos

El procedimiento y criterios de aceptación para la inspección radiográfica, ultrasónica y visual se describen en el Artículo 2, Artículo 4 y Artículo 9 respectivamente del ASME sección V.

6.4 Cupón de soldadura y localización de probetas

6.4.1 Cupón de WPS No 204

Las probetas serán extraídas según recomendaciones del ASME sección IX para planchas de espesor menor a 19 mm (3/4"). En la figura 23 se observa la distribución de las probetas en el cupón de plancha, correspondiente al primer procedimiento.

Para el ancho del cupón consideramos 150 mm de la probeta de doblado al ser el único ensayo a realizar. Para el largo del cupón consideramos 38 mm de la probeta de doblado, 31 mm para las partes a descartar y aumentamos 4 mm a ambos lados por las pérdidas al momento del corte con lo que obtenemos 150 mm de largo, de esta forma cumplimos la distancia mínima de la probeta para alternar los ensayos mecánicos por ensayos no destructivos del cupón en caso se requiera.

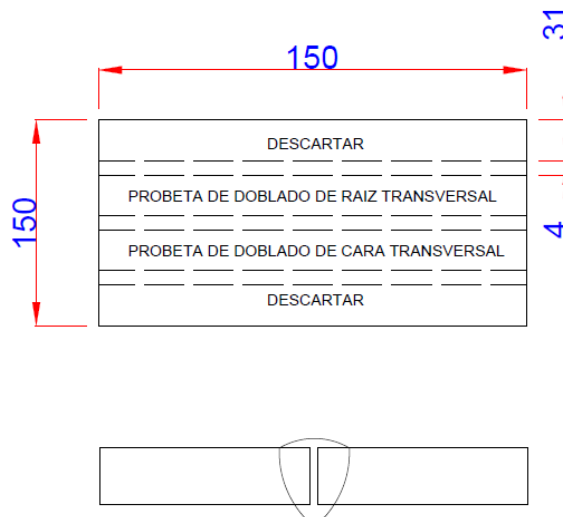


Figura 23 Cupón para calificación de operador-WPS N°204

Fuente: Adaptación sección IX (ASME, 2015)

6.4.2 Cupón de WPS No 205

Las probetas serán extraídas según recomendaciones del ASME sección IX para tubos de 6" Sch120 con espesor de 14.27 mm. En la figura 24 se observa la distribución de las probetas en el cupón de plancha, correspondiente al segundo procedimiento.

Para el largo del cupón consideramos 150 mm de la probeta de doblado y añadimos 25 mm a cada extremo con lo cual requerimos unir dos tubos de 100 mm, de esta forma cumplimos la distancia mínima de la probeta para alternar los ensayos mecánicos por ensayos no destructivos del cupón en caso se requiera.



Figura 24 Cupón para calificación de operador-WPS N°205

Fuente: Adaptación sección IX (ASME, 2015)



Conclusiones

- Según los gráficos de comparación de tiempo total y costo total respecto a la cantidad de tanques a fabricar, podemos concluir que a medida que siga aumentando la demanda de fabricación se tendrá un ahorro económico mayor al usar SAW respecto a FCAW, además podrá concluirse el trabajo en un menor tiempo. El fabricar menores cantidades de tanques no supondrá un ahorro significativo por lo que se debe monitorear clientes potenciales en la industria que requieran el cambio de combustibles tradicionales por GLP.
- Los cálculos para el análisis económico se realizaron con ratios históricos de trabajos similares de la empresa, por lo tanto se debe realizar un estudio de tiempos de proceso al realizar este proyecto, de esta forma se obtendrán ratios reales y se podrá estimar el ahorro real que supone el presente trabajo.
- Se seleccionó el material de aporte F9P4EF3-F3 para el proceso de soldadura SAW y el material de aporte EZ1T-11 para el proceso FCAW, estos cumplen con las especificaciones técnicas para el proyecto, así mismo se encuentran disponibles en el mercado local según el formato descrito en los Anexos 1 y 2.
- Los diseños de juntas seleccionados para ambos procedimientos cumplen con los requisitos establecidos, además es parte importante en la mejora continua del proceso de producción de los tanques porque se puede disminuir la cantidad de material aportado, con lo cual se puede reducir el tiempo de fabricación y costo de mano de obra.

Bibliografía

- ASME . (2015). *SECTION IX: Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*. New York.
- ASME. (2015). *SECCION VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels*. New York.
- ASME. (2015). *SECTION II: MATERIALS*. New York.
- ASTM. (2019). *ASTMA612/A12M-12. Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, High Strength, for Moderate and Lower Temperature Service1*.
- AWS. (1991). *Welding Processes*. Miami.
- Balcazar, R. (2011). *Reglamento de seguridad para instalaciones y transporte de GLP*. Recuperado el 23 de octubre de 2019, de OSINERG: http://www.osinerg.gob.pe/newweb/uploads/Publico/foro_regional_tumbes_2011/Curso%20GLP%202011-3.pdf
- CESOL. (2012). *Diseño de equipos a presión soldadas*. Madrid.
- CESOL. (2012). *Soldeo con Alambre Tubular*. Madrid.
- CESOL. (2012). *Soldeo Manual por Arco con Electrodo Revestido*. Madrid.
- CESOL. (2012). *Soldeo MIG-MAG*. Madrid.
- MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. (10 de enero de 1994). *Decreto Supremo N° 01-94-M*. Recuperado el 23 de octubre de 2019, de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/Reglamento%20para%20la%20Comercializaci%C3%B3n%20de%20Gas%20Licuado%20de%20Petr%C3%B3leo.pdf
- OSINERGMIN. (s.f.). *Reglamentos que norman las actividades del "GLP"*. Recuperado el 23 de octubre de 2019, de <http://www.osinerg.gob.pe/newweb/pages/GFH/1429.htm>
- UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. (2015). *Lineamientos para la gestión de gas licuado de petróleo*. Recuperado el 23 de octubre de 2019, de <http://www.regenciaquimica.ucr.ac.cr/sites/default/files/Instructivo%20de%20gesti%C3%B3n%20de%20GLP.pdf>

ANEXOS

Anexo 1: Ficha técnica material de aporte FCAW

Los materiales de aporte seleccionados se eligieron de la empresa LINCOLN. El material de aporte seleccionado es el siguiente: INNERSHIELD® NR® -311-MP. El aporte escogido tiene una clasificación AWS E71T-11.

MECHANICAL PROPERTIES⁽¹⁾

	Yield Strength ⁽²⁾ MPa (ksi)	Tensile Strength MPa (ksi)	Elongation %	Hardness Rockwell B
Requirements - AWS E71T-11	400 (58) min	480-655 (70-95)	20 min	-
Typical Results ⁽³⁾	435-475 (63-69)	605-645 (88-94)	22-25	89-92

DEPOSIT COMPOSITION⁽¹⁾

	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Al
Requirements - AWS E71T-11	0.30 max	1.75 max	0.60 max	0.03 max	0.03 max	1.8 max
Typical Results ⁽³⁾	0.23-0.26	0.57-0.66	0.17-0.26	≤0.01	≤0.01	1.3-1.6

TYPICAL OPERATING PROCEDURES

Diameter, Polarity	CTWD mm (in)	Wire Feed Speed m/min (in/min)	Voltage (volts)	Approx. Current (amps)	Melt-Off Rate kg/hr (lb/hr)	Deposition Rate kg/hr (lb/hr)	Efficiency (%)
0.068 in (1.7 mm), DC-	19-32 (3/4-1 1/4)	1.0 (40)	15-16	125	1.0 (2.1)	0.8 (1.7)	81
		1.9 (75)	18-19	190	1.8 (4.0)	1.5 (3.4)	85
		3.3 (130)	20-21	270	3.2 (7.0)	2.8 (6.1)	88
		4.4 (175)	23-24	300	4.3 (9.4)	3.8 (8.4)	89

Anexo 2: Ficha técnica material de aporte SAW

Los materiales de aporte seleccionados se eligieron de la empresa LINCOLN. El material de aporte seleccionado es el siguiente: LINCOLNWELD® LA-84. El aporte escogido tiene una clasificación AWS F9A0-EF3-F3 y 839/LNS164.

CLASSIFICATION

Flux 839 ISO 14174: SA FB 1 66 AC H5

Flux/Wire AWS A5.17/A5.23
 839/L60 F6A2-EL12
 839/LNS135 F6A4-EM12
 839/L-61 F7A5-EM12K / F6P6-EM12K
 839/L-50M F7A6-EH12K / F7P8-EH12K
 839/LNS140A F7A4-EA2-A2
 839/LNS164 F9A0-EF3-F3 / F9P4EF3-F3

CHEMICAL COMPOSITION [W%], TYPICAL, ALL WELD METAL

Wire grade	C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni
L-60	0.04	0.85	0.2	<0.01	<0.01		
LNS 135	0.05	1.2	0.2	<0.015	<0.01		
L-61	0.07	1.2	0.3	<0.015	<0.01		
L-50M	0.07	1.7	0.3	<0.015	<0.01		
LNS 140A	0.06	1.2	0.2	<0.015	<0.01	0.45	
LNS 164	0.07	1.7	0.3	<0.015	<0.01	0.45	0.80

MECHANICAL PROPERTIES, TYPICAL, ALL WELD METAL

Wire grade	Condition*	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Impact ISO-V(J)			
					-20°C	-40°C	-50°C	-60°C
L-60	AW	390	470	30	100			
LNS 135	AW	410	490		100	50		
L-61	AW	440	530	29	130	80		
	SR	400	510	31		115	65	
L-50M	AW	470	570	258		100		
	SR	415	520	29		140		110
LNS 140A	AW	460	560	26		80		
LNS 164	AW	650	710	20	50			
	SR	590	670	24	100	65		

AW : As welded - SR : Stress relieved

829 rev. C-EN19-19/06/15

839

EXAMPLES OF MATERIALS TO BE WELDED

Code	Type / Steel grades	Multirun									
		L-60	LNS 135	L-61	L-50M (LNS 133U)	LNS 140A (L-70)		LNS 164 (L-84)			
		AW	AW	AW	AW	SR	AW	SR	AW	SR	
Ship plates	A to D	✓	✓	✓	✓		✓				
	AH(32), DH(36), DH(40)	✓			✓	✓	✓	✓			
General structural steels											
EN 10025 part 2	S185, S235, S275	✓	✓	✓	✓	✓					
	S355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Cast steels											
EN 10213-2	GP240R	✓	✓	✓	✓	✓					
Pipe materials											
EN 10208-2	L210, L240, L290	✓	✓	✓	✓	✓					
	L360	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	L415				✓		✓	✓			
	L445, L480						✓	✓			
API 5LX	X42, X46	✓	✓	✓	✓	✓					
	X52	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	X56, X60				✓		✓	✓	✓	✓	
	X65, X70						✓	✓	✓	✓	
EN 10216-1/10217-1	P235, P275	✓	✓	✓	✓	✓					
	P355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Boiler & pressure vessel steels											
EN 10028-1	P235GH, P265GH, P295GH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	P355GH	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	