

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Calificación del proceso de Soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding)

según el código ASME sección IX con simulaciones térmicas

Carlos Andrés Romero Calderón

Edison Bonifaz, P.hD., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de

Ingeniero Mecánico

Quito, julio de 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Calificación del proceso de Soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding) según el código

ASME sección IX con simulaciones térmicas

Carlos Andrés Romero Calderón

Edison Bonifaz, PhD.

Director de Tesis y

Miembro del Comité de Tesis

Alfredo Valarezo, PhD.

Miembro del Comité de Tesis

Lorena Bejarano, MS.

Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdova, PhD.

Decana de la Escuela de Ingeniería

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, julio de 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Carlos Andrés Romero Calderón

C. I.: 1718681289

Fecha: Quito, julio de 2014

DEDICATORIA

A mis Padres, y demás personas que me ayudaron en el transcurso de la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores que me ayudaron en el transcurso de mis estudios en la Universidad San Francisco de Quito por sus enseñanzas.

RESUMEN

La presente tesis consiste en la calificación del proceso de soldadura GMAW según las especificaciones del código ASME sección IX.

En primer lugar, se analiza que parámetros de soldadura del código ASME sección VIII y sección IX guardan relación con simulaciones matemáticas de un proceso de soldadura de fusión. Se encuentra que las historias y ciclos térmicos que se obtienen de un análisis térmico transitorio son muy importantes para la realización de una calificación más precisa.

Con esta información, se realiza la calificación del proceso de soldadura “Gas Metal Arc Welding” (GMAW), siguiendo los pasos sugeridos y obligatorios que el código ASME sección IX menciona, con el objetivo de usar el proceso de soldadura en la construcción de tanques que trabajan bajo altas presiones y bajo condiciones ambientales extremas.

El trabajo desarrollado en la presente tesis, muestra la secuencia que se debe seguir para calificar un procedimiento de soldadura, con la ayuda de software y modelos matemáticos que permiten obtener datos iniciales más precisos y que facilitan establecer condiciones para cualquier proceso que sea analizado.

ABSTRACT

The present research is about a welding process qualification for Gas Metal Arc Welding according to ASME code specifications section IX.

First, welding parameters of ASME Code Section VIII and Section IX are related to mathematical simulations of a fusion welding process. It is found that thermal cycling and histories obtained from transient thermal analysis are very important for a better development of a welding qualification.

With this information, the qualification of the welding process "Gas Metal Arc Welding" (GMAW) is performed by following the suggested and obligatory steps by ASME Code Section IX in order to use the welding process in the construction high pressure vessels under extreme environmental conditions.

This project shows the sequence to be followed to qualify a welding procedure with the assistance of software and mathematical models to obtain accurate data and facilitate an initial set of welding parameters for any process that is used.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	7
Abstract	8
INTRODUCCIÓN	16
Información preliminar del proyecto	16
Planteamiento del Proyecto y Justificación	17
Objetivos del Proyecto	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos	18
Conceptos Generales	19
Soldadura de Fusión	19
Código ASME	20
Parámetros de Soldadura	21
Welding Procedure Specification (WPS)	23
Procedure Qualification Record (PQR)	24
Welding Performance Qualification (WPQ)	30
Pruebas Destructivas	32
Prueba de Tensión	34
Prueba de Doblado	34
Inspección Visual	35
Descripción de la calificación y especificación del proceso de soldadura GMAW	35
El método de elementos finitos en el análisis del proceso de soldadura	38
ANÁLISIS TÉRMICO	40
Modelo Térmico	40
Primera Simulación	41
Segunda Simulación	47
DESARROLLO DE LA CALIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW (Gas Metal Arc Welding)	56
Preparación de la Probeta de Soldadura	56
Calificación del proceso de soldadura mediante ensayos no destructivos	68
Inspección Visual del cordón de soldadura	68
Ensayo de la Prueba de Doblado	72
Ensayo de la Prueba de Tensión	78
Certificación del Proceso de Soldadura.....	84
Cálculos de presión Interna	88
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	99
CONCLUSIONES	101
REFERENCIAS	103

ANEXO A: Especificaciones de la máquina de soldadura FRONIUS TransSteel 3500/5000 MIG/MAG welding system	105
ANEXO B: Especificaciones del material base utilizado para realizar las probetas de soldadura.....	108
ANEXO C: Resultados emitidos por la Escuela Politécnica Nacional para el ensayo de tensión.....	110
ANEXO D: Hoja de datos del alambre utilizado como material de aporte en el proceso de soldadura.....	112
ANEXO E: Listado de todas las variables para el proceso de soldadura GMAW.....	114
ANEXO F: Dimensiones de una probeta para un ensayo de doblado.....	117
ANEXO G: Dimensiones de una probeta para un ensayo de tensión	119
ANEXO H: Criterio de Aceptación para un ensayo de tracción y de doblado.....	121
ANEXO I: Propiedades del material base utilizado en el procedimiento de soldadura	124
ANEXO J: Resultados de los ensayos de tracción de las probetas sin soldadura	129

TABLAS

Tabla.1.1. Listado de Parámetros para realizar un proceso de calificación para el procedimiento GMAW

Tabla.2.1. Variables para simulación

Tabla.2.2. Condiciones del modelo analizado_1

Tabla.2.3. Condiciones del modelo analizado_2

Tabla.3.1. Datos iniciales asignados en la máquina de soldadura

Tabla.3.2. Datos obtenidos del resultado de la prueba de tensión

Tabla.3.3. Propiedades mecánicas del material base utilizado en el procedimiento de calificación de soldadura.

Tabla.3.4. Datos obtenidos del resultado de la prueba de tensión de las probetas sin soldadura

Tabla.A.1. Especificaciones Puente_1

Tabla.A.2. Especificaciones Puente_2

Tabla.B.1. Datos Generales del Material Base

Tabla.B.2. Especificación de la composición química del material base

Tabla.B.3. Especificación de los ensayos realizados al material base

Tabla.D.1. Datos Generales del Material de Aporte

Tabla.D.2. Especificación de la Composición química del material de aporte

Tabla.D.3. Especificación de las propiedades mecánicas del material de aporte

FIGURAS

Fig.1.1. Formato Sugerido por el código ASME sección IX para un WPS_1

Fig.1.2. Formato Sugerido por el código ASME sección IX para un WPS_2

Fig.1.3. Formato Sugerido por el código ASME sección IX para un PQR_1

Fig.1.4. Formato Sugerido por el código ASME sección IX para un PQR_2

Fig.1.5. Formato Sugerido por el código ASME sección IX para un WPQ [2]

Fig.1.6. Detalle del número de pruebas que deben ser realizadas en una calificación de soldadura

Fig.1.7. Detalle del orden del cortado de las probetas para ensayos destructivos

Fig.2.1. Geometría de la probeta de soldadura en COMSOL y condiciones de contorno para el análisis de temperatura en estado estacionario

Fig.2.2. Discretización con un tamaño normal de la geometría analizada con un “Physics-controlled mesh”

Fig.2.3. Distribución de la temperatura en el tiempo igual a 0 (estado estacionario) con una generación de calor en todo el cordón de soldadura por igual

Fig.2.4. Vista lateral izquierda de la distribución de temperatura en estado estacionario.

Fig.2.5. Gráfica de la temperatura (K) vs distancia (mm) de la probeta de soldadura

Fig.2.6. Geometría de la probeta de soldadura en COMSOL y condiciones de contorno para el análisis de temperatura en estado transitorio

Fig.2.7. Discretización de tamaño fino de la geometría analizada con un “Physics-controlled mesh”

Fig.2.8. Distribución de la temperatura en el segundo igual a 30 de una generación de calor que comenzó en el punto 1

Fig.2.9. Vista frontal de la probeta de soldadura en estado transitorio

Fig.2.10. Gráfica de la temperatura (K) vs distancia (mm) de la probeta de soldadura

Fig.2.11. Probeta de soldadura en donde se muestra el punto de análisis del estado transitorio estudiado

Fig.2.12. Gráfica de la temperatura (°C) vs tiempo (s) de la probeta de soldadura

Fig.2.13. Diagrama TTT de un acero hipoeutectoide de 0.18 a 0.23 % C

Fig.3.1. Dimensiones que debe tener una probeta de soldadura

Fig.3.2. Probeta armada para realizar el cordón de soldadura

Fig.3.3. Pase de Raíz, vista superior

Fig.3.4. Pase de Raíz, vista inferior

Fig.3.5. Pase de Relleno 1

Fig.3.6. Pase de Relleno con un movimiento en sig-sag 2 y 3

Fig.3.7. Pase de Relleno con un movimiento lineal 4 y 5

Fig.3.8. Cordón de soldadura finalizado

Fig.3.9. Dimensiones de una probeta para un ensayo de doblado

Fig.3.10. Dimensiones de una probeta para un ensayo de tensión

Fig.3.11. Probetas cortadas para las pruebas de doblado y de tensión

Fig.3.12 Medidas de un jig para las pruebas de doblado_1

Fig.3.13. Medidas de un jig para las pruebas de doblado_2

Fig.3.14. Desarrollo de la prueba de doblado

Fig.3.15. Probetas dobladas

Fig.3.16. Probeta con una pequeña discontinuidad

Fig.3.17. Probetas para las pruebas de tensión

Fig.3.18. Probeta sujeta en la máquina para realizar ensayos de tensión

Fig.3.19. Probetas post-prueba de tensión

Fig.3.20. Probetas sin soldadura para ensayos de tracción

Fig.3.21. Probetas sujetadas en la máquina de ensayos de tracción de probetas sin soldadura

Fig.3.22. Fórmula para cálculo de presión interna_1

Fig.2.23. Fórmula para cálculo de presión interna_2

Fig.3.24. Gráfica de los parámetros para los cálculos

Fig.3.25. Listado de las eficiencias para un cálculo de presión interna

Fig.3.26. Listado de los materiales y sus respectivos esfuerzos

Fig.A.1. Soldadora FRONIUS Trans Steel 3500/5000 MIG/MAG welding system

Fig.H.1. Criterio de aceptación para un ensayo de tracción

Fig.H.2. Criterio de aceptación para un ensayo de doblado

NOMENCLATURA

ASME (American Society of Mechanical Engineers)

GMAW (Gas Metal Arc Welding)

AWS (American Welding Society)

AW (Arc Welding)

RW (Resistance Welding)

OFW (Oxyfuel Welding)

WPS (Welding Procedure Specification)

PQR (Procedure Qualification Record)

WPQ (Welding Performance Qualification)

INTRODUCCIÓN

Información Preliminar del Proyecto

La soldadura es uno de los procesos más utilizados para la manufactura en muchas partes del mundo como un método para la construcción de distintos equipos y estructuras. Una de éstas es la soldadura por fusión, la cual se ha utilizado a menudo en varias industrias de diferente índole para la producción y ensamblaje de elementos y productos que son utilizados en gran cantidad por muchas industrias.

Una de las industrias más grandes y comerciales del mundo es la Petrolera, la cual utiliza este proceso para la construcción de equipos e instrumentos que se usan diariamente y que están expuestos a distintos ambientes extremos. Para garantizar la calidad de la soldadura, es importante que la soldadura sea muy precisa y cumpla con los requisitos de construcción en lo que se refiere a resistencia mecánica. Esto se logra mediante el control del proceso, siguiendo códigos establecidos de calificación y construcción.

Uno de los principales usos de la soldadura en la industria petrolera es en la construcción de tanques que trabajan con altas presiones. Este estudio, el diseño de tanques, es analizado por el código ASME en varias secciones, dando especificaciones de construcción que comienzan con las calificaciones de las soldaduras.

En este proyecto se realiza una simulación con parámetros de soldadura usados en procedimientos anteriormente realizados bajo el código ASME sección IX para obtener

resultados y gráficas que permiten analizar las distribuciones térmicas y los resultados que ésta provocaría en el material de acero. Posteriormente, se utiliza los parámetros en el proceso de calificación de un procedimiento de soldadura bajo condiciones y especificaciones que el código ASME establece para este tipo de procedimientos y su uso en la industria. El proceso de soldadura que se usa para todo el análisis de este proyecto es Gas Metal Arc Welding (GMAW), el cual es muy utilizado en la construcción de equipos para diferentes industrias.

Planteamiento del Proyecto y Justificación

Desde hace mucho tiempo la industria petrolera ha tenido un gran auge alrededor del mundo por la importancia del producto y la utilización de éste en grandes cantidades por varias industrias. Por consiguiente, el análisis del cómo se realizan los tanques que permiten obtener el producto de las petroleras y como éstos deben ser fabricados para que sean eficientes y seguros, es importante y ayuda a entender de mejor manera el uso de los procesos de soldadura en el proceso de construcción que en las Industrias se da todos los días.

Entonces, el análisis se escoge para la soldadura GMAW ya que es muy utilizada en la industria así como también la facilidad del trabajar con el material que utiliza este proceso para realizar pruebas experimentales.

Objetivos del Proyecto

Objetivo General

Realizar el procedimiento de calificación del proceso de soldadura GMAW siguiendo todos los pasos establecidos en el código ASME sección IX, y sección VIII con inspecciones visuales y ensayos destructivos como el de doblado, y el de tracción bajo parámetros de soldadura utilizados en las simulaciones con el método de los elementos finitos. Además, realizar un análisis para el cálculo de presión interna, la cual es experimentada por tanques utilizados en la industria petrolera en condiciones extremas ambientales y de resistencia.

Objetivos Específicos

- ❖ Analizar el código ASME sección IX para comprender los pasos que se deben seguir en la realización de una calificación de soldadura y el análisis que se debe realizar para el cálculo de la presión interna que ésta resistiría.
- ❖ Con los parámetros utilizados en procesos de calificación de soldadura anteriores, realizar simulaciones con el método de los elementos finitos mediante el software COMSOL Multiphysics, y así poder usarlos en la

realización de un cordón de soldadura para obtener resultados más precisos y de mejor calidad.

- ❖ Observar las gráficas de temperatura que genera la simulación de un arco eléctrico de la soldadura estudiada (GMAW), verificando como la línea de soldadura analizada se mueve respecto a una distancia determinada y al tiempo.
- ❖ Realizar una muestra de soldadura con el proceso GMAW siguiendo los pasos antes leídos en el código ASME sección IX para su posterior calificación con varias pruebas mecánicas destructivas para verificar la calidad del cordón de soldadura.
- ❖ Realizar los cálculos necesarios leídos en el código ASME sección VIII División 1 para verificar que presión máxima resistiría esta soldadura con el espesor del material usado.

Conceptos Generales

Soldadura de Fusión

Existen muchos tipos de soldadura catalogados por la AWS que son utilizados en varias industrias alrededor del mundo para diferentes tipos de procesos de construcción. Todos estos procesos de soldadura podrían ser separados en dos grandes grupos, la soldadura por fusión y la soldadura de estado sólido. “Las principales aplicaciones de la soldadura son:

construcción de edificaciones y puentes, tubería, tanques de presión, construcción de barcos, aeronaves, automóviles, etc“. [1].

La soldadura por fusión es un proceso que utiliza calor para fundir los materiales base que serán unidos, en el cual se puede o no utilizar material de aporte dependiendo del tipo de proceso de soldadura que se esté utilizando para proveer diferentes tipos de características según se requiera en los equipos que se esté construyendo. Este proceso de soldadura puede ser clasificado en varios grupos; Soldadura por arco eléctrico (AW), soldadura por resistencia eléctrica (RW), soldadura con gas oxicorte (OFW), etc. [1]

En esta tesis se estudia y analiza la soldadura GMAW con aplicación en la construcción de tanques que trabajan bajo presión. Por lo tanto, se hace un cordón de soldadura siguiendo los pasos y el procedimiento necesario para una posterior calificación según el código ASME Sección IX. Esta sección específica menciona los estándares de calificación para procedimiento de soldadura, “brazing“, soldadores, y operadores de soldadura [2]. Además, la sección VIII División 1 señala los requerimientos mandatorios y no mandatorios para el diseño, fabricación, inspección, prueba, marcaje y reporte, sobre presión, y certificación de tanques que trabajan bajo presión interna o externa que excede 15psi. [3]

Código ASME

El código ASME es “el líder internacional en desarrollar códigos y estándares asociados a la ciencia y práctica de la ingeniería mecánica“[4] para diferentes tipos de prácticas como en la construcción de tanques de presión. En la sección IX del código se especifica como calificar un procedimiento de soldadura, soldador, operador de soldadura, etc,

en donde se menciona los pasos que se deben seguir para obtener cordones de calidad que puedan ser utilizados en la construcción de tanques de presión y sean aceptados por inspectores ASME. Además, en la sección VIII División 1 se puede encontrar requerimientos de diseño y construcción para este tipo de tanques y así lograr un producto que cumpla con los objetivos para los cuales se construyó.

La calificación de un procedimiento de soldadura se realiza mediante varios análisis y pasos que permiten obtener resultados aceptables y que se pueden utilizar en un proceso de construcción común de una industria petrolera.

Parámetros de Soldadura

En primer lugar se describe los parámetros que se toman en cuenta en un proceso de soldadura, los cuales se clasifican en esenciales, no esenciales, y esenciales suplementarios.

- Los parámetros esenciales son aquellas que si cambian se considera que afectarán las propiedades mecánicas de la soldadura y se debe recalificar el WPS. [2]
- Los parámetros no esenciales son aquellas que si cambian no se considera que afectarán las propiedades mecánicas de la soldadura y no es necesaria una recalificación de WPS. [2]
- Por último, las variables esenciales suplementarias son adicionales a las esenciales dependiendo de cada proceso de soldadura. [2]

En la Tabla.1.1 se puede observar el listado de todas estas variables para el proceso de soldadura GMAW (Ver Anexo E), el cual es el que se analiza en esta tesis. [2].

	Parámetros	Esenciales	Esenciales Suplementarias	No Esenciales
Junta	Diseño de Ranura			X
	Refuerzo			X
	Espacio del pase de Raíz			X
	Retenedor			X
Metal Base	Número de Grupo		X	
	Límites para T		X	
	Calificación T	X		
	Pase $t > 1/2$ in. (13 mm)	X		
	Límites para T (S. cir. Arc.)	X		
	Número P	X		
Material de Relleno	Número F	X		
	Número A	X		
	Diámetro			X
	Clasificación		X	
	Forma del material de relleno	X		
	ó Suplementario	X		
	Elementos de aleación	X		
	T	X		
	Límites para t	X		
	Clasificación			X
Posición	Posición			X
	Posición		X	
	↑ ↓ Avance de Soldadura			X
Prealentamiento	Decrecimiento $> 100^{\circ}\text{F}$ (55°C)	X		
	Prealentamiento			X
	Crecimiento $> 100^{\circ}\text{F}$ (55°C)		X	
PWHT	PWHT	X		
	PWHT (T & T_ alcance)		X	
	Límites para T	X		
Gas	Composición			X
	Mezcla	X		

	Taza de Flujo			X
	ó Flujo de soporte			X
	Refuerzo o Composición	X		
	Gas Protector	X		
Características Eléctricas	Calor inicial		X	
	Modo de transferencia	X		
	Corriente y Polaridad		X	X
	Alcance de I & E			X
Técnica	Armadura			X
	Tamaño de la Boquilla			X
	Método de limpieza			X
	Método de refuerzo			X
	Oscilación			X
	Distancia del trabajo de alambre			X
	Múltiple a Único pase		X	X
	Único a Múltiple uso de electrodos		X	X
	Espacio para el electrodo			X
	Manual o Automática			X
	Peening			X
Uso de un proceso térmico	X			

Tabla.1.1. Listado de Parámetros para realizar un proceso de calificación para el procedimiento GMAW

Welding Procedure Specification (WPS)

En primer lugar, se realiza un WPS, el cual es el documento que provee instrucciones para que un operador pueda realizar soldaduras de acuerdo a los requerimientos que el código ASME exige para la construcción de tanques de presión [2]. Además, especifica las condiciones bajo las cuales la soldadura debe ser hecha. Por lo tanto, la soldadura depende del

proceso en el cual se vaya a utilizar, del material base, material de aporte, precalentamiento, tratamiento térmico posterior a la soldadura, entre otros aspectos.

El propósito del WPS es determinar si la soldadura propuesta para una construcción es capaz de proveer las propiedades de resistencia necesarias y características mecánicas requeridas para las aplicaciones posteriores del Tanque. Además, el WPS describe todas las variables esenciales, no esenciales, y cuando es requerido, las variables esenciales suplementarias para cada proceso de soldadura. [2]

Procedure Qualification Record (PQR)

En segundo término, para la calificación de un procedimiento de soldadura, se realiza un PQR, el cual es un documento que registra las variables esenciales, información específica, y los ensayos destructivos realizados a la probeta de soldadura. Las variables que debe tener un PQR son las esenciales, y cuando es requerido, las variables esenciales suplementarias. [2]

El WPS es referencia para el PQR, así mismo el PQR sirve para apoyar al WPS. [2]. Los formatos sugeridos para un WPS y un PQR en donde se puede observar cada una de las variables necesarias para una correcta calificación se observan en la Fig.1.1, Fig.1.2, Fig.1.3 y Fig.1.4

En los formatos que se utilicen para realizar un WPS y un PQR se pone varios parámetros obligatoriamente ya que son los que permiten realizar o no una soldadura aceptable, y los que permiten mejorar la soldadura realizando cambios numéricos en éstos. [2].

Los parámetros son:

- Diseño de la junta
- Espacio de raíz
- Uso de refuerzo
- Material
- Propiedades del metal base
- Propiedades del material de aporte
- Posición de soldadura
- Tratamientos térmicos post-soldadura
- Composición del gas
- Pre calentamiento
- Características eléctricas
- Técnica utilizada

Y en el caso del PQR, también se añade todas las pruebas destructivas que se realicen. Es decir, los resultados de las pruebas de doblado, y los resultados de las pruebas de tracción.

Welding Performance Qualification (WPQ)

Para la calificación de un soldador se realiza un WPQ (Fig.1.5), el cual es el documento que determina la habilidad del soldador para depositar material metálico y tiene como propósito calificar la destreza mecánica de operación del equipo de soldadura para hacer cordones aceptables. [2]

Esta calificación es limitada a las variables esenciales para cada proceso de soldadura. Los parámetros que un WPQ contiene para un proceso GMAW son:

- Proceso de Soldadura
- Tipo de soldadura
- Uso de refuerzo
- Propiedades del metal base
- Propiedades del material de aporte
- Posición de calificación
- Resultados de pruebas destructivas

El formato sugerido por el código ASME sección IX para un WPQ se puede observar en la Fig.1.5.

Pruebas Destructivas

Las pruebas que se hacen para completar el documento PQR y poder calificar el procedimiento de soldadura son varias y existe un número mínimo de pruebas que se realiza dependiendo del espesor del material base que se utilice para la calificación.

Según el código ASME sección IX, para el espesor que se utiliza (16 mm), se realiza 6 pruebas destructivas. [2]. Cuatro de estas pruebas son de doblado y dos de tensión como se especifica en la Fig.1.6.

Table QW-451.1
Groove-Weld Tension Tests and Transverse-Bend Tests

Thickness T of Test Coupon, Welded, in. (mm)	Range of Thickness T of Base Metal Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]		Maximum Thickness t of Deposited Weld Metal, Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]	Type and Number of Tests Required (Tension and Guided-Bend Tests) [Note (2)]			
	Min.	Max.		Tension, QW-150	Side Bend, QW-160	Face Bend, QW-160	Root Bend, QW-160
Less than $\frac{3}{16}$ (1.5)	T	$2T$	$2t$	2	—	2	2
$\frac{3}{16}$ to $\frac{3}{8}$ (1.5 to 10), incl.	$\frac{3}{16}$ (1.5)	$2T$	$2t$	2	[Note (5)]	2	2
Over $\frac{3}{8}$ (10), but less than $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{3}{16}$ (5)	$2T$	$2t$	2	[Note (5)]	2	2
$\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38)	$\frac{3}{16}$ (5)	$2T$	$2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	—	—
$\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38)	$\frac{3}{16}$ (5)	$2T$	$2T$ when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	—	—
$1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl.	$\frac{3}{16}$ (5)	8 (200) [Note (3)]	$2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	—	—
$1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl.	$\frac{3}{16}$ (5)	8 (200) [Note (3)]	8 (200) [Note (3)] when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	—	—
Over 6 (150) [Note (6)]	$\frac{3}{16}$ (5)	$1.33T$	$2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	—	—
Over 6 (150) [Note (6)]	$\frac{3}{16}$ (5)	$1.33T$	$1.33T$ when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	—	—

NOTES:

- (1) The following variables further restrict the limits shown in this table when they are referenced in QW-250 for the process under consideration: QW-403.9, QW-403.10, QW-404.32, and QW-407.4. Also, QW-202.2, QW-202.3, and QW-202.4 provide exemptions that supersede the limits of this table.
- (2) For combination of welding procedures, see QW-200.4.
- (3) For the SMAW, SAW, GMAW, PAW, and GTAW welding processes only; otherwise per Note (1) or $2T$, or $2t$, whichever is applicable.
| (4) see QW-151.1, QW-151.2, and QW-151.3 for details on multiple specimens when coupon thicknesses are over 1 in. (25 mm). |
| (5) Four side-bend tests may be substituted for the required face- and root-bend tests, when thickness T is $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) and over. |
| (6) For test coupons over 6 in. (150 mm) thick the full thickness of the test coupon shall be welded. |

Fig.1.6. Detalle del número de pruebas que deben ser realizadas en una calificación de soldadura [2]

Además de saber cuántas y cuáles pruebas se realizan en una calificación de soldadura, es necesario conocer el orden en que se cortan cada una de las probetas para su respectivo ensayo posterior, es decir, que ensayo se debe realizar a cada probeta obtenida de las placas unidas con el proceso de soldadura GMAW. En la Fig.1.7. se observa para qué ensayo se utiliza cada una de las probetas cortadas descartando la primera y última probeta.

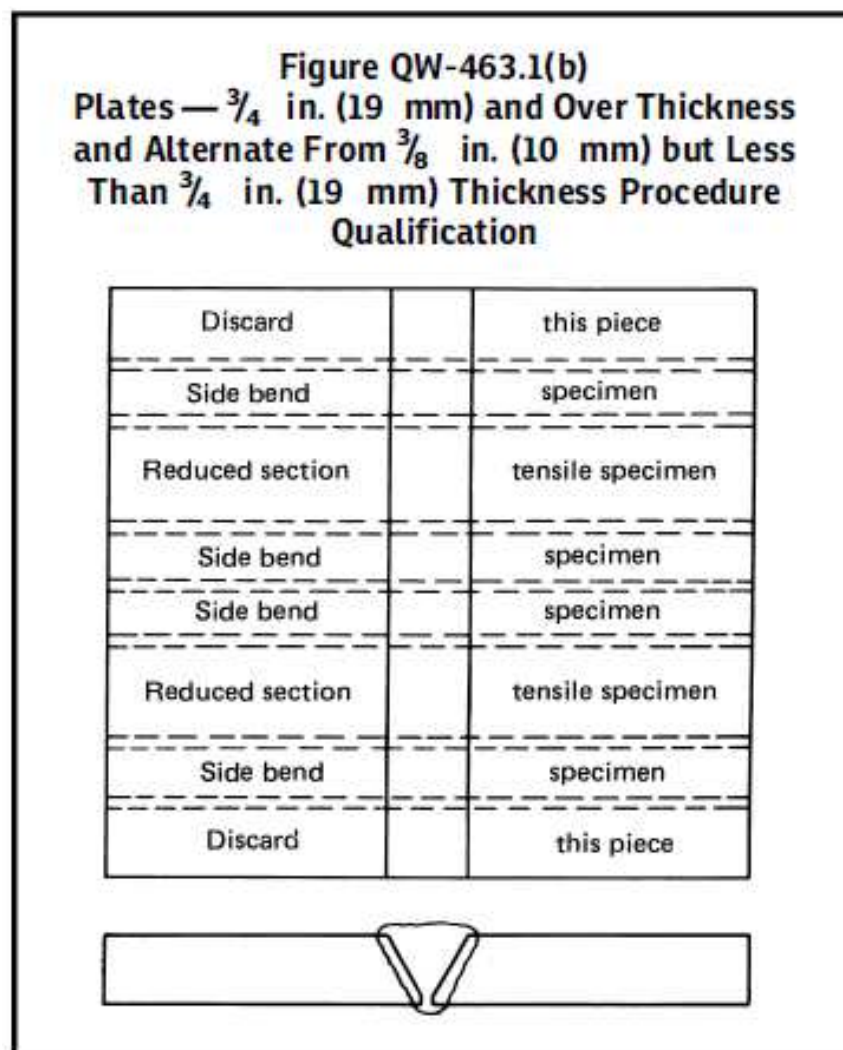


Fig.1.7. Detalle del orden de cortado de las probetas para ensayos destructivos [2]

Prueba de Tensión

Una de las pruebas que se realiza es la de tensión, que tiene como propósito determinar la resistencia a la tracción de la probeta de soldadura y verificar si es mayor o igual a la resistencia mínima a la tracción del material base para que la probeta sea aprobada, caso contrario ésta será rechazada. [2]. (Ver Anexo H).

Prueba de Doblado

Otra de las pruebas que se realiza es la de “Guided Bend Test“, las cuales son hechas con respecto al lado lateral de cada probeta de soldadura. Este ensayo ayuda a determinar el grado de ductilidad y homogeneidad de la junta de soldadura.

En este tipo de ensayos se verifica la existencia o no de discontinuidades en el cordón de soldadura o en la zona afectada por el calor. Esta prueba es aceptada si no existen discontinuidades o, si existen, no excedan los 3 mm en total en cualquier dirección en la superficie convexa después del doblado. [2] (Ver Anexo H). La discontinuidad es cuando no existe homogeneidad en el material expuesto.

Para el análisis de la aceptación de esta prueba de doblado, según el código ASME sección IX, no se toma en cuenta las discontinuidades en las esquinas de la probeta durante la

prueba al menos que exista evidencia que es por resultado de falta de fusión, inclusiones de burbujas u otras discontinuidades internas. [2].

Inspección Visual

La inspección visual se realiza al término del proceso de soldadura, es decir, a lo que se termina de realizar y limpiar el cordón de soldadura para examinar la calidad de la junta mediante la observación de la existencia de grietas, si ésta tiene una completa penetración, y una completa fusión de los materiales utilizados en el proceso de soldadura.

Descripción de la calificación y especificación del proceso de soldadura GMAW

1. En primer lugar, se establece todos los parámetros y variables de soldadura que son utilizados en el proceso de calificación de soldadura para que el soldador tenga claro la calibración que debe hacer en la máquina de soldadura y así ésta pueda funcionar correctamente en dicho proceso. Los parámetros que se tiene en cuenta para poder comenzar con el procedimiento son:
 - Voltaje
 - Amperaje
 - Velocidad de avance
 - Tipo de corriente

- Polaridad
 - Velocidad de salida del alambre (material de aporte)
2. Una vez analizados los parámetros de soldadura, se escoge los materiales que se van a utilizar en la calificación, es decir el material base y el material de aporte que se utiliza. Los materiales que se usan en este procedimiento de calificación son materiales que están en las listas que el código ASME tiene en sus respectivas secciones, porque todo el análisis que ASME realiza para sus procedimientos y cálculos, los hace de acuerdo a esos materiales. Además, éstos deben tener características mecánicas que puedan ser utilizadas en las aplicaciones deseadas.
 3. Después, se llena un WPS (Welding Procedure Specification) con todos los parámetros de soldadura, propiedades y características de los materiales a usarse, y la técnica con la que se procede a realizar el cordón de soldadura.
 4. Posteriormente se procede a preparar la probeta de soldadura según lo especifica el código ASME sección IX para este tipo de soldadura. Es decir, la preparación del bisel y el espacio de raíz con la ayuda de diferentes instrumentos y máquinas como galgas de bisel, maquinaria CNC, esmeriladoras, amoladoras, etc.
 5. Luego se procede con la soldadura comenzando con el pase de raíz, el cual realiza la función de penetración en la probeta para conseguir la base del cordón. Este primer

pase utiliza distintos parámetros de soldadura respecto a los demás pases debido a su función en la elaboración del cordón de soldadura.

6. En seguida, se termina el cordón de soldadura mediante varios pases de relleno según el espesor del material base que se esté utilizando, es decir, mientras mayor el espesor es, más pases de soldadura se necesita para lograr resultados aceptables. Además, se limpia la escoria y demás restos que se queden al término de cada pase de soldadura.
7. Después se realiza una inspección visual del cordón de soldadura observando si no existe porosidades, discontinuidades, mordeduras, y demás fallas que se podrían producir en un proceso como éste.
8. Luego de terminar el cordón de soldadura y analizarlo visualmente, se realiza el corte de varias probetas con medidas establecidas por el código ASME sección IX para cada tipo de ensayo destructivo para poder calificar el proceso como aprobado o no dependiendo de sus resultados.
9. Entonces, luego de preparar cada probeta para los ensayos destructivos, los cuales se hacen con la ayuda de diferentes máquinas exclusivas para ensayos de tracción y de doblado, se analiza los resultados de éstos para poder aceptarlos o no, según los criterios de aceptación anteriormente mencionados que se enuncian en el código ASME sección IX. (Ver Anexo H).

10. Por último, con todos los parámetros, materiales, y ensayos destructivos realizados en la calificación de este proceso de soldadura, se procede a aprobar el WPS, y completar la documentación de certificación del procedimiento de soldadura con el PQR, y WPQ, los cuales permiten aprobarlo y utilizarlo en la industria y construcción según sea necesario.

El método de los elementos finitos en el análisis del proceso de soldadura

El método de elementos finitos es una estrategia numérica alternativa muy popular para la simulación de gradientes de temperaturas, estructuras, fluidos, etc. Este método se basa en considerar al cuerpo o estructura dividida en elementos discretos, con determinadas condiciones de vínculo entre sí, generándose un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente y proporcionando el estado de tensiones, deformaciones, temperaturas, flujos, etc. [5]

Es por esta razón que para nuestro análisis es una herramienta muy práctica debido a que no se dispone de instrumentos capaces de realizar los cálculos deseados de forma práctica, ya que con el método de elementos finitos se puede simular el problema térmico y tener resultados aproximados a lo que ocurriría en la realidad. [5]

El método de los elementos finitos es una técnica computarizada que sirve para resolver con aproximaciones problemas de ingeniería. Los problemas de elementos finitos contienen variables dependientes que deben satisfacer cualquier ecuación diferencial dentro de un dominio conocido y, además, existen condiciones de borde de las variables del dominio. [6].

El proceso de conversión de la estructura en elementos finitos se denomina discretización. Un sistema de ecuaciones algebraicas son las que ayudan a resolver los problemas de elementos finitos según sea planteado, ya que éste puede ser estructural, de desplazamiento, térmico, velocidad de fluido, etc. [6].

A los elementos finitos se les considera como subdominios, es decir, es la discretización de un dominio. Por otro lado, un concepto importante en el análisis de elementos finitos es el de mallado, la cual es una estructura formada por un conjunto de la discretización del dominio; y la interconexión de puntos de los elementos finitos se les denomina nodos los cuales determinan los grados de libertad rotacionales y de traslación, además, es de donde el análisis se basa, es decir, en los nodos se dan los fenómenos de deflexión, esfuerzo, térmico, etc. [6].

La estructura formada por la discretización se resuelve con el planteamiento de un sistema de ecuaciones lineales las cuales son resueltas con la ayuda de un software adecuado debido a la naturaleza repetitiva de las operaciones matemáticas. En conclusión, la aplicación del método de los elementos finitos se basa en plantear una matriz de rigidez que relaciona las fuerzas con las deformaciones para cada elemento y con su posterior unión mediante nodos. [6].

ANÁLISIS TÉRMICO

El análisis térmico es muy importante para poder determinar el cambio que sucede en un determinado cuerpo a estudiar, en cuanto se refiere a las condiciones físicas y químicas que dependen principalmente de la temperatura y flujo de calor para sus posibles cambios. Es por eso, que este estudio se toma en cuenta en este proyecto ya que los procesos de soldadura son dependientes de la temperatura y, con la ayuda de simulaciones, se realiza un análisis más minucioso de como la temperatura actúa en un proceso de soldadura y cómo éste afecta la estructura del material usado.

Modelo Térmico

La ecuación gobernante para este modelo térmico de un proceso de soldadura es la ecuación de calor general la cual describe a la temperatura en cualquier posición, y el tiempo respecto al movimiento de una fuente de calor. [7]. La ecuación es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde $k_x, k_y, y k_z$ son las conductividades térmicas en cada dirección x, y, z. El símbolo ρ es la densidad, C es el calor específico del material. Para la simulación del problema de soldadura se utiliza el módulo de transferencia de calor del software COMSOL. Para este problema, en primer lugar, se lista todos los parámetros necesarios para poder

simular un análisis de transferencia de calor. Estos parámetros son dados según las propiedades del material base que se utiliza para todo el proceso del proyecto, el cual es acero 516-70 (Ver Anexo B), las cuales se puede observar en Tabla.2.1.

Variables	Conductividad Térmica	Capacidad de calor	Densidad	Esfuerzo
Valor	44.5[W/(m*K)]	475[J/(kg*K)]	7850[kg/m ³]	485e9[Pa]

Tabla.2.1. Variables para simulación

Se realiza dos simulaciones para poder verificar que, con los datos utilizados inicialmente, los cuales son los parámetros de soldadura, y propiedades de los materiales utilizados, se logra un flujo de calor en toda la probeta de soldadura con características que permitan confirmar que dichos parámetros son aceptables para un procedimiento de soldadura como el que se analiza en esta tesis y, así obtener resultados que sean aprobados para un procedimiento GMAW y usarlo en las distintas industrias.

Primera Simulación

1. En primer lugar, se hace un análisis de transferencia de calor en estado estacionario, el cual simula una distribución que no cambia en el tiempo con la generación de calor única en todo el cordón de soldadura.
2. Luego se procede a realizar la geometría que representa la probeta de soldadura que se utiliza en la calificación del proceso (Fig.2.1). Estas medidas son de 6 pulg x 14 pulg para cada placa de la probeta de soldadura.

3. Posteriormente se define el material colocando las propiedades del material base mencionado en la Tabla.2.1, el cual es utilizado en todo el estudio a realizarse en esta tesis.
4. Después se establece las propiedades físicas del modelo, es decir, condiciones de borde, temperaturas, flujos de calor, etc, como se puede observar en la Tabla.2.2, los cuales describen claramente el problema a resolver.

Variables	Corriente (A)	Voltaje Inicial	Temperatura 1	Potencia (W)/Area (cm ²)
Valor	181 A	29.1 V	293.15 K	5267.1 W/cm ²

Tabla.2.2. Condiciones del modelo analizado

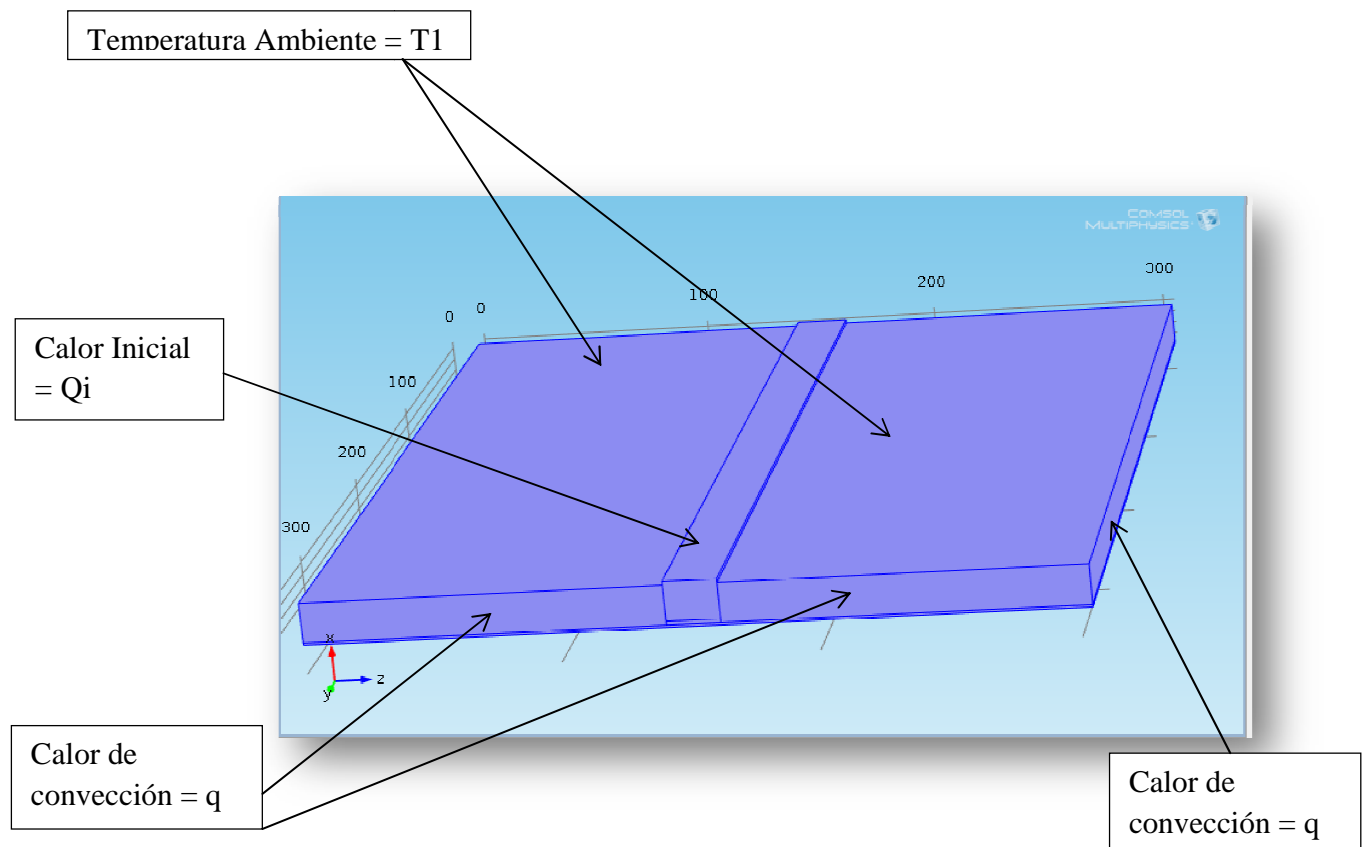


Fig.2.1. Geometría de la probeta de soldadura en COMSOL y condiciones de contorno para el análisis de temperatura en estado estacionario

- El valor inicial de corriente y voltaje son los que se utiliza normalmente en un proceso de soldadura de fusión.
 - La temperatura T1 que se utiliza es la de ambiente para todo el material base.
 - La potencia, que es el calor que genera la soldadura Q_i , está dada por la multiplicación de la corriente y voltaje. Esta potencia se genera en cada cm^2 del cordón de soldadura simulado, que en total daría una potencia de 175000 W en los 33 cm^2 como parámetro inicial de la simulación.
 - El calor de convección $q = hc (T-T_s)$, donde el coeficiente de calor por convección está dado por la biblioteca de datos de los materiales utilizados en la simulación.
5. Entonces, luego de poner todos los datos necesarios para la simulación, se realiza la discretización de la geometría con la aplicación MESH (Fig.2.2) para obtener resultados y hacer los estudios respectivos.

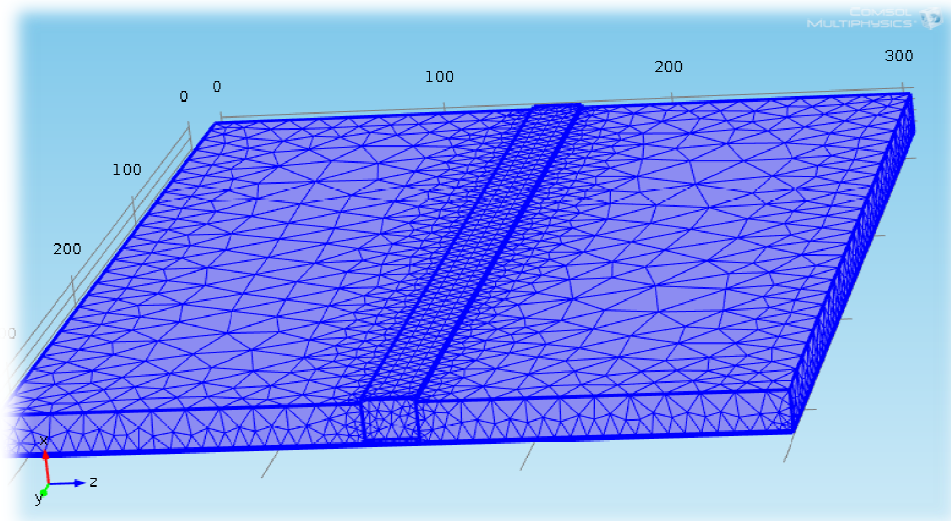


Fig.2.2. Discretización con un tamaño normal de la geometría analizada con un “Physics-controlled mesh”

- Enseguida, se corre el problema para obtener los resultados. Por lo tanto, como se puede observar en la Fig.2.3, se genera una distribución de temperatura en el material base de acero.

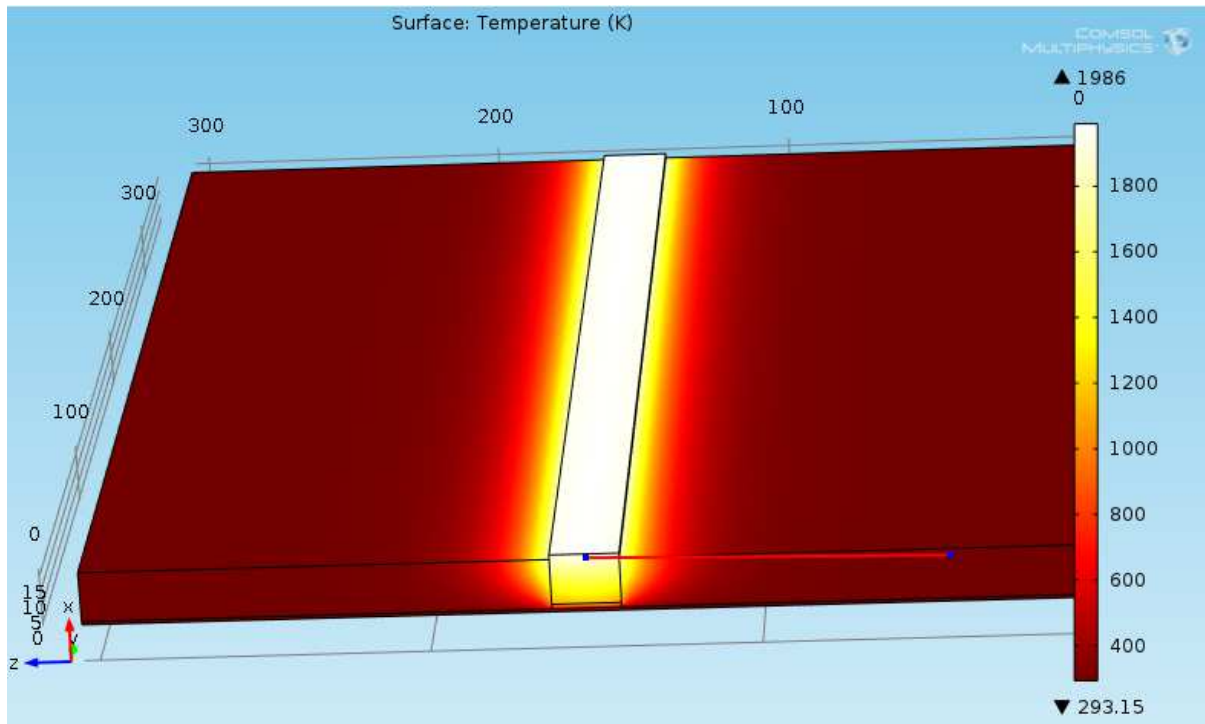


Fig.2.3. Distribución de la temperatura en el tiempo igual a 0 (estado estacionario) con una generación de calor en todo el cordón de soldadura por igual

- Por consiguiente, para verificar que la temperatura disminuye mientras se aleja del centro del cordón de soldadura, se procede a obtener una gráfica de temperatura vs distancia entre puntos específicos como se puede ver en las Fig.2.4 y Fig.2.5.

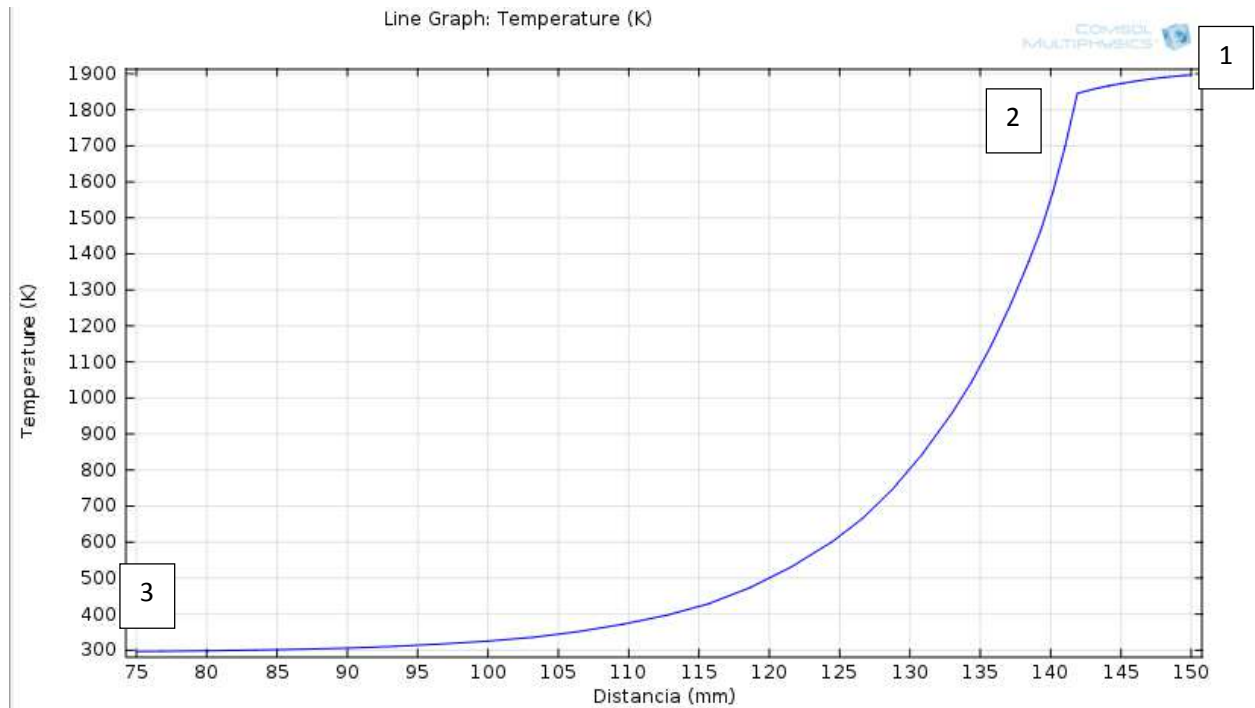


Fig.2.5. Gráfica de la temperatura (K) vs distancia (mm) de la probeta de soldadura

En la gráfica de Temperatura (K) vs Distancia (mm) mostrada se observa como la temperatura disminuye con respecto al avance en distancia, es decir, mientras más alejado un punto está del centro de la probeta (generación de calor), éste tiene una temperatura menor hasta llegar a la temperatura ambiente. El punto 2 es donde el material base se une con el cordón de soldadura, es decir, donde la temperatura ambiente del material base se mezcla con la temperatura generada por el calor inicial de la simulación. Es por eso que se da la deflexión en el punto 2 como se puede observar en la Fig.2.5.

Por lo tanto, estas figuras permiten concluir que en un proceso en estado estacionario con una generación de calor inicial que fue provocado y transmitida debido a los parámetros

de soldadura y propiedades de materiales usados en un principio, la temperatura fluye como se espera y se los puede utilizar en un proceso de soldadura práctico para realizar un proceso de calificación del mismo.

Por otra parte, se realiza un problema en estado transitorio para poder comprobar con otras gráficas y figuras si este fenómeno ocurre del mismo modo, y si éste produce propiedades adecuadas para su uso en la industria.

Segunda Simulación

1. Se realiza otra simulación con distintos parámetros iniciales, se utiliza el mismo módulo de transferencia de calor pero con estado transitorio y sólo con la geometría de la mitad del total de la probeta de soldadura para poder observar de mejor manera los resultados de la transferencia de calor en el centro del cordón de soldadura.
2. Entonces, se utiliza los mismos datos del material base de la Tabla.2.1 anteriormente marcada y se genera la geometría (Fig.2.6) para ésta simulación.
3. Luego se establece las nuevas condiciones de contorno para este modelo como se puede observar en la Tabla.2.3 para obtener los resultados.

Variabes	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Velocidad de traslación (m/s)	Potencia (W)/ Area (cm²)	Temperatura 1 (K)
Valor	126	18.3	0.008 m/s	2300 W/cm ²	293 (K)

Tabla.2.3. Condiciones del modelo analizado

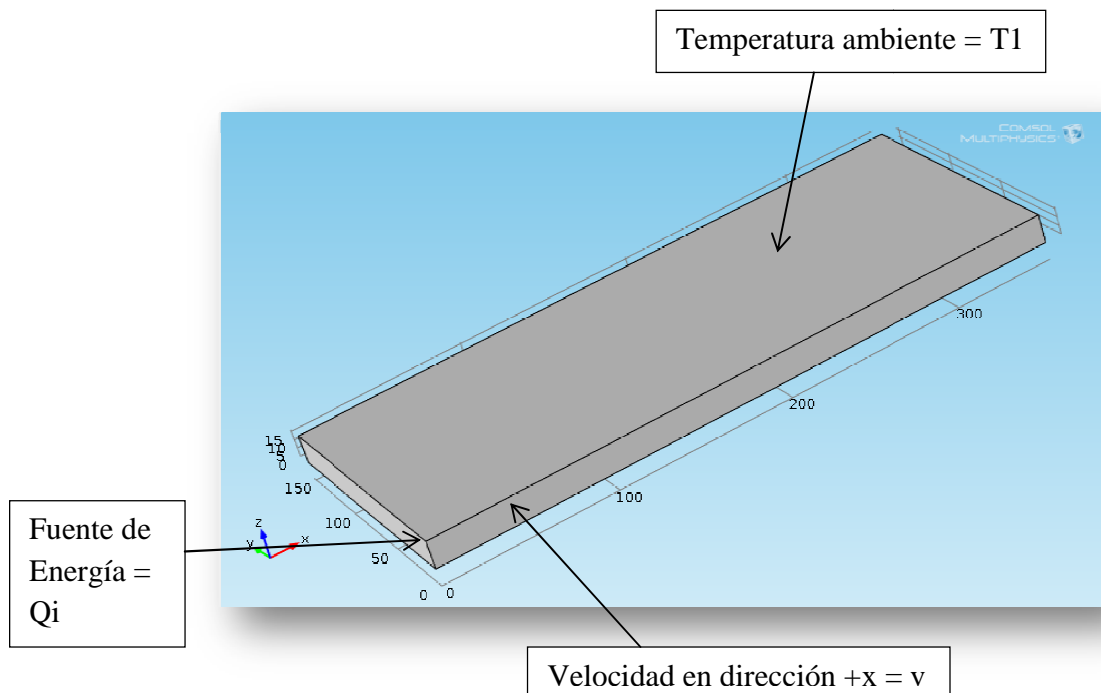


Fig.2.6. Geometría de la probeta de soldadura en COMSOL y condiciones de contorno para el análisis de temperatura en estado transitorio

- La velocidad v es la de avance del calor inicial dado por la potencia usada en el proceso de realización del cordón de soldadura el cual va en la dirección x positivo.
- La potencia, es decir el calor Q_i puntual, está dada por la máquina soldadora utilizada en el proceso de soldadura. Este valor es la multiplicación del voltaje y amperaje en un pase de raíz de un proceso de soldadura GMAW, el cual se aplica en cada cm^2 en la simulación y se mueve lo largo de toda la probeta de soldadura con la velocidad de avance v antes descrita. Es decir, después de un tiempo ese mismo valor se aplica al siguiente cm^2 con la misma potencia y sucesivamente hasta que el calor complete su recorrido en la probeta.
- La temperatura T_1 es la de ambiente.

- El estado transitorio tiene como punto de inicio $t = 0$ s, con un pase cada 0.01 s hasta el tiempo final $t = 8$ segundos.
4. Entonces, luego de poner todos los datos necesarios para la simulación, se realiza la discretización de la geometría con la aplicación MESH (Fig.2.7) y así poder obtener resultados y hacer los análisis respectivos.

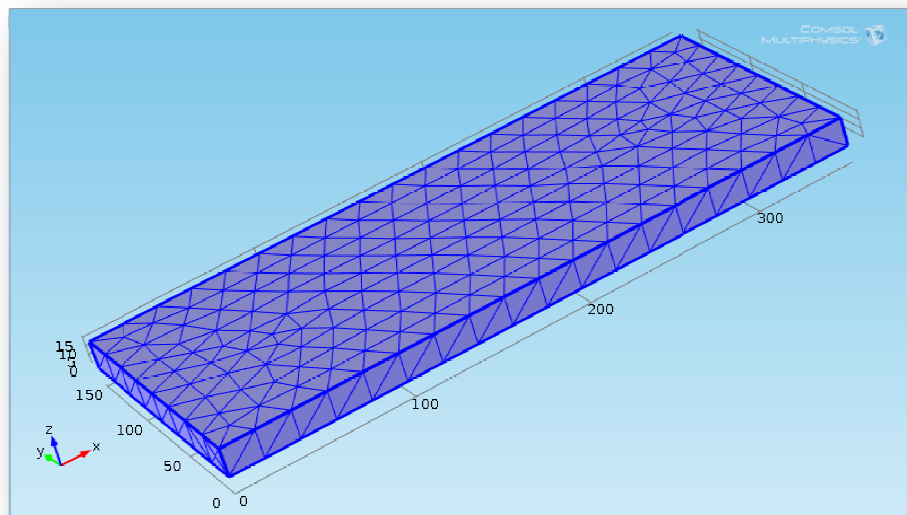


Fig.2.7. Discretización de tamaño fino de la geometría analizada con un “Physics-controlled mesh”

5. Enseguida se corre el problema. Por lo tanto, como se puede observar en la Fig.2.8, se genera una distribución de temperatura en el material base de acero y se toma los resultados en el instante $t = 3$ s.

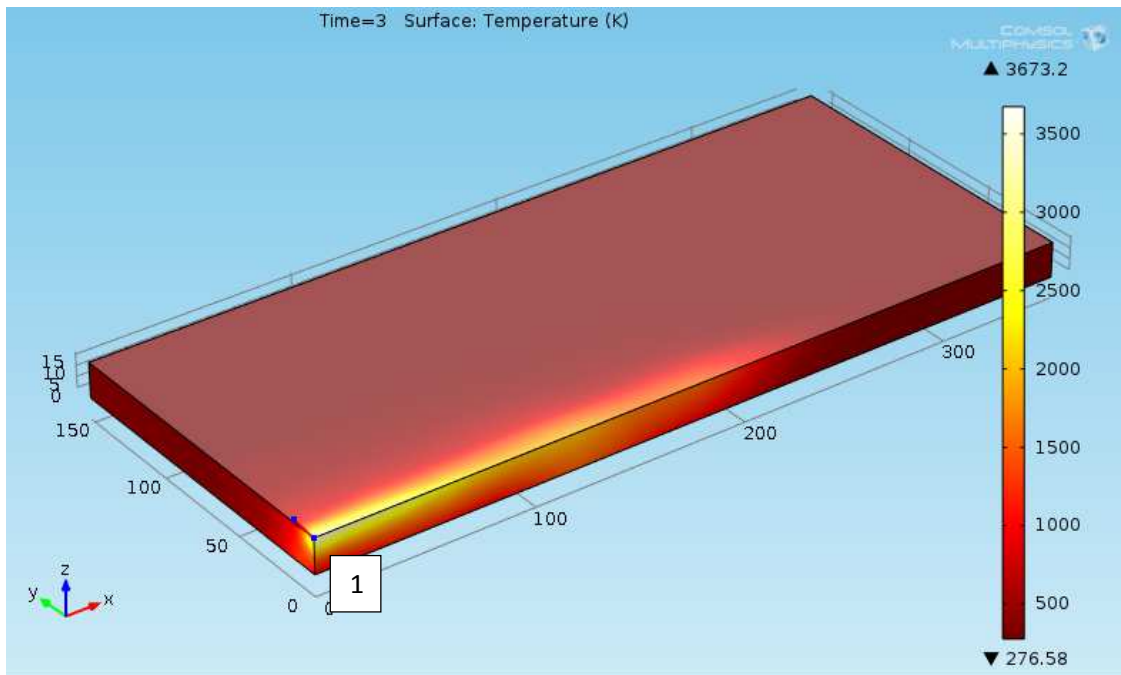


Fig.2.8. Distribución de la temperatura en el segundo igual a 3 s de una generación de calor que comenzó en el punto 1

6. Entonces, para verificar que la temperatura se traslada desde un punto a otro perpendicularmente al pase del arco eléctrico en un instante en particular, se produce a generar una gráfica de temperatura vs distancia entre dos puntos específicos como se puede observar en las Fig.2.9 y Fig.2.10 y, además, se puede observar cómo, mientras más alejado de la generación del calor esté un punto, su temperatura es menor.

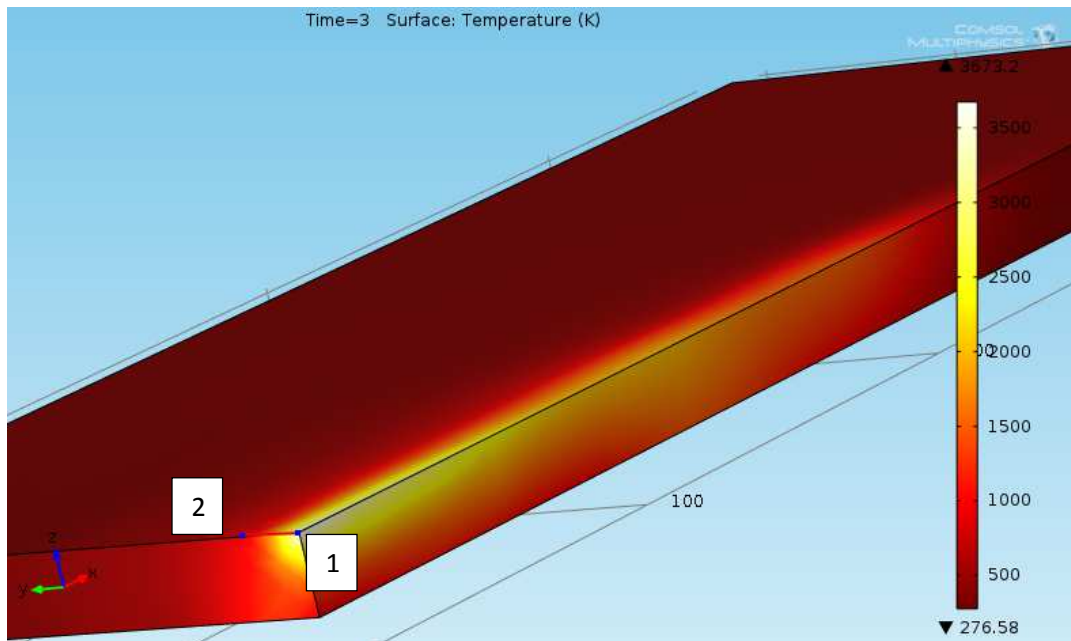


Fig.2.9. Vista frontal de la probeta de soldadura en estado transitorio

Como se puede observar en la Fig.2.9, las temperaturas que alcanza esta simulación son mayores a las que alcanza la primera simulación. En esta simulación se puede ver que la máxima temperatura es alrededor de 3673.2 K e igual comienza en una temperatura ambiente. El valor de la temperatura de ebullición de un acero es alrededor de 3273 K, pero para que el acero pase a la fase gaseosa, además de alcanzar la temperatura de ebullición, se debe seguir añadiendo energía durante un tiempo prolongado para vaporizar el acero. [8].

Otro aspecto que hay que considerar en la simulación, es que el software COMSOL no considera cambios de fase ni propiedades dependientes de la temperatura para los análisis térmicos que éste realice.

Por lo tanto, al demorarse alrededor de 1 s el tiempo de añadir energía y alrededor de 5 segundos desde que la temperatura supera el punto de ebullición hasta que, la temperatura del acero, disminuye hasta el punto de ebullición, como se puede observar en la Fig.2.10, se concluye que el acero no llega a evaporarse y este problema en estado transitorio da una simulación más real de lo que sucedería en un proceso de soldadura.

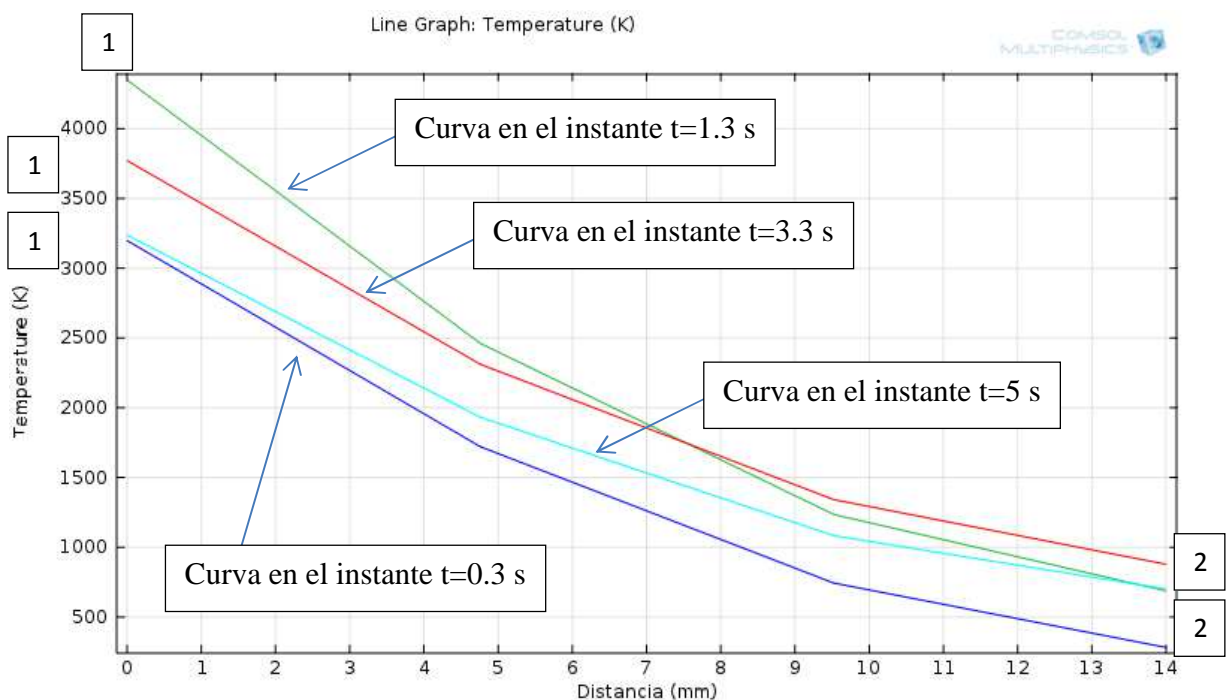


Fig.2.10. Gráfica de la temperatura (K) vs distancia (mm) de la probeta de soldadura

Como se observa en la gráfica de temperatura vs distancia, con las curvas que se generan en diferentes instantes de tiempo, se verifica que la temperatura cambia en el tiempo en un mismo punto como se espera que un proceso de soldadura actúe en la práctica.

Además, se realiza la gráfica de temperatura vs tiempo durante un intervalo de tiempo, el cual comienza en el instante $t = 0$ s hasta el instante $t = 8$ s, en un punto con coordenadas -8

mm en el eje z y 50 mm en el eje x como se puede observar en la Fig.2.11 para obtener la curva de temperatura vs tiempo como se puede observar en la Fig.2.12.

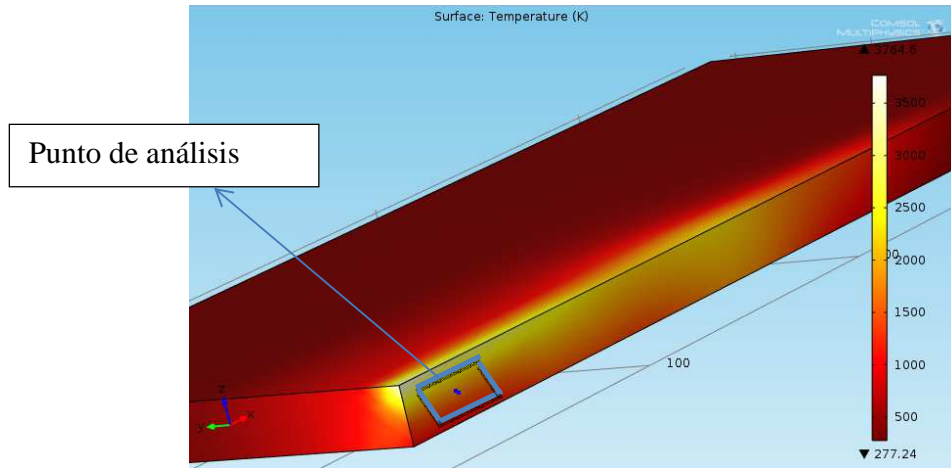


Fig.2.11. Probeta de soldadura en donde se muestra el punto de análisis del estado transitorio estudiado

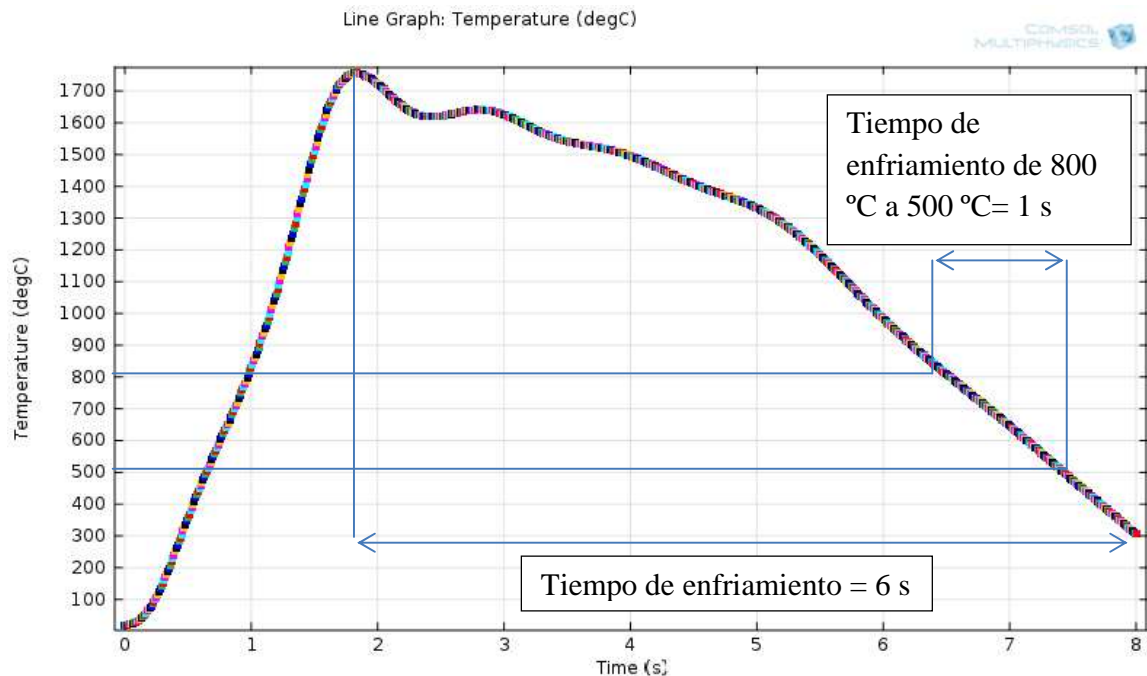


Fig.2.12. Gráfica de la temperatura (°C) vs tiempo (s) de la probeta de soldadura

Como se puede observar en la Fig.2.12, la curva de la temperatura respecto al tiempo, actúa como se espera en un proceso de soldadura. Es decir, en un punto analizado, la temperatura alcanza un valor máxima y ésta empieza a disminuir en el transcurso del tiempo.

El acero que se utiliza en el proceso de calificación de soldadura es un acero hipoeutectoide con el 0,16% de carbono, por lo tanto se usa un diagrama de temperatura, tiempo, y transformación de este acero como referencia para los análisis estructurales que generaría este procedimiento.

Por consiguiente, se analiza como la curva generada en la gráfica de Temperatura vs Tiempo actúa en un diagrama de TTT de un acero hipoeutectoide (Fig.2.13) para verificar que propiedades podría generar el proceso de soldadura hecho en el material base utilizado. [9].

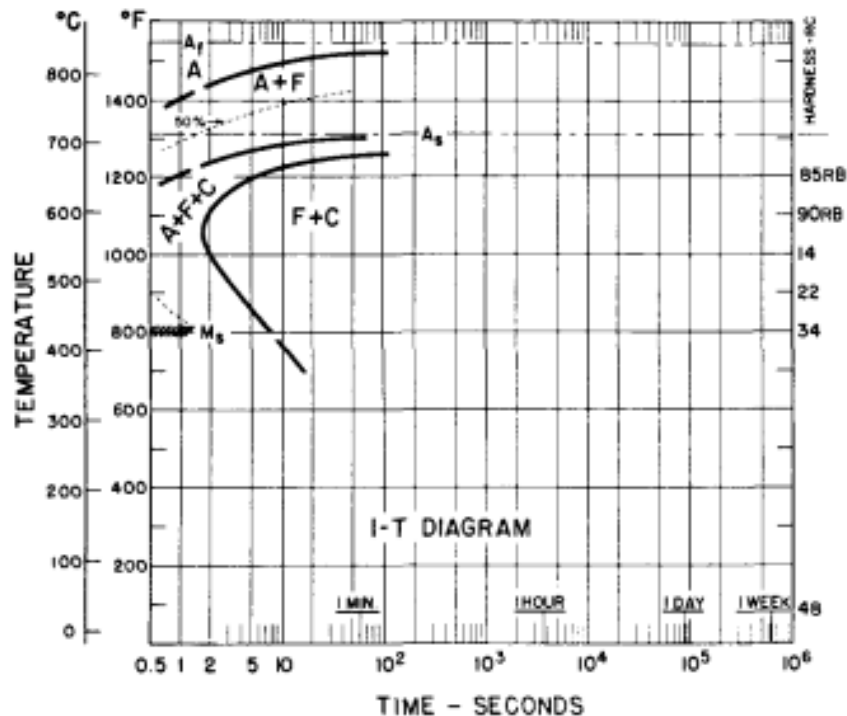


Fig.2.13. Diagrama TTT de un acero hipoeutectoide de 0.18 a 0.23 % C

Al comparar las Fig. 2.12 y 2.13, se observa que el tiempo de enfriamiento de la curva de temperatura respecto al tiempo simulada, es alrededor de 6 s, y alrededor de 1 s entre las temperaturas de 800 °C y 500 °C. Por lo tanto, sobreponiendo esos tiempos en el diagrama TTT de un acero hipoeutectoide, se verifica que en ese tiempo de enfriamiento, el acero se transforma en perlita, y después en bainita generando estructuras con propiedades iguales o mejores de dureza y resistencia a las que el acero usado como el material base tiene.

Por consiguiente, los parámetros utilizados en las simulaciones del proceso de soldadura GMAW, permiten conseguir transferencias de calor adecuadas para este tipo de procesos. Además, el proceso de soldadura realizado ayuda a generar estructuras con mejores características de dureza y resistencia en el material base utilizado en la calificación de la soldadura.

Las propiedades mecánicas generadas en este proceso, son muy importantes en un uso industrial, ya que los equipos industriales requieren una alta resistencia ante muchos esfuerzos que experimentan en la práctica. Es por eso que el análisis de la estructura que genera este proceso de soldadura es significativo.

En conclusión, los parámetros de soldadura usados en las simulaciones, dan resultados favorables para utilizarlos en el proceso de calificación de soldadura GMAW, que a continuación se realizará como siguiente paso de la tesis.

DESARROLLO DE LA CALIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA

GMAW

En este capítulo se analiza y describe cada paso que se debe realizar para poder conseguir un cordón de soldadura aceptable y de buena calidad, para de esa manera poder realizar ensayos que permitan ratificar la calidad del cordón de soldadura y del proceso GMAW.

Esto se hace con propósito de utilizarlo en la industria petrolera, más precisamente en la construcción de tanques y demás maquinaria e instrumentos que deben ser realizados con metales como el acero. Además, se hace cálculos de resistencia a la presión interna de estos cordones según el código ASME sección VIII División 1.

Preparación de la probeta de soldadura

1. Para comenzar a realizar el proceso de calificación, en primer lugar se prepara las placas metálicas bases, y guías que fueron cortadas en una máquina CNC. Se corta dos placas de 6 pulg x 14 pulg, lo cual cumple con el código ASME ya que en el código se especifica un mínimo de 6 pulg x 6 pulg como dimensiones de las placas metálicas para hacer una calificación de soldadura. Además, se corta dos bases y dos guías para poder preparar la probeta de soldadura adecuadamente y alcanzar el objetivo deseado.

2. Después, se prosigue a preparar la probeta de soldadura. Es decir, cumplir con los parámetros iniciales de preparación como el ángulo del filete, distancia para el pase de raíz, y unión de las bases y guías con las placas del metal base. El código ASME sección IX permite un ángulo máximo de 37.5° grados como se puede ver en la Fig.3.1, por lo tanto se hace un bisel de 30° en cada placa a unir para obtener un ángulo de 60° grados entre los dos filetes.

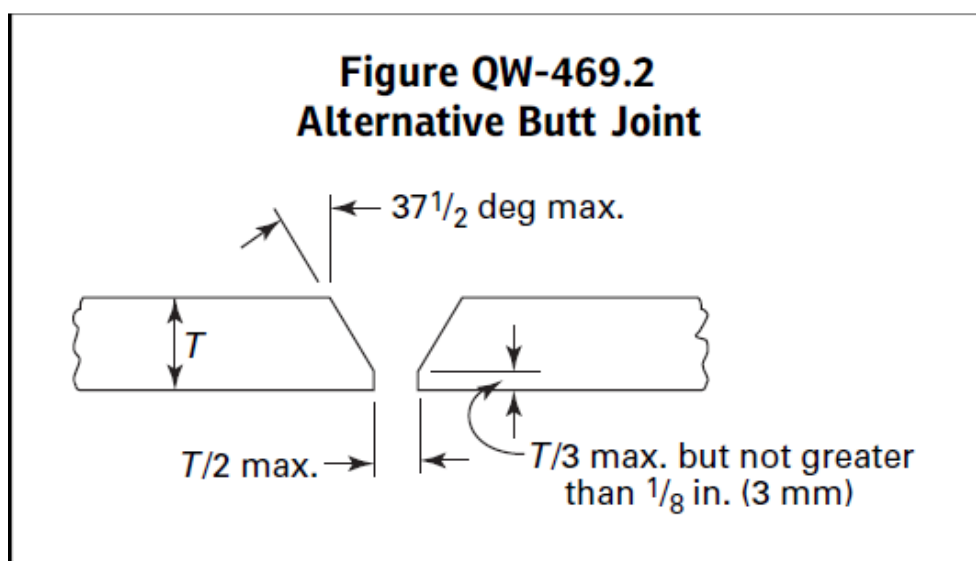


Fig.3.1. Dimensiones que debe tener una probeta de soldadura [2]

Para medir los 30 grados de bisel se utiliza una galga de pico de loro para verificar las medidas deseadas. Es muy importante utilizar las galgas mencionadas ya que si no se logra obtener los ángulos que se pide en el código ASME sección IX para probetas de calificación, es muy probable que ocurran defectos en el cordón de soldadura como la falta de fusión. Entonces, es un paso que se debe considerar muy importante en el desarrollo de la calificación y se debe utilizar el equipo necesario para conseguir buenos resultados finales.

3. Otro aspecto muy importante es el armado de la probeta de calificación ya que se debe hacer con medidas establecidas por el código, ya que éstas pueden cambiar mucho los resultados de calidad del cordón de soldadura y, además, permite prever defectos posteriores. Entonces, se procede a armar la probeta con las dos placas y sus demás piezas respetando el espacio para el pase de raíz, que en este proyecto, es igual a 1/8 pulg (3 mm) el cual cumple con lo establecido en el código ASME sección IX, ya que en éste se especifica que ese espacio de raíz puede ser, como máximo, el espesor del metal base dividido para 2 (Fig.3.1) que en este caso sería un valor máximo de 8 mm.

4. Por otro lado, el valor que se usa para el talón de las probetas es igual a 2 mm, y el valor máximo permitido por el código es igual al espesor dividido para 3 pero no mayor a 3 mm (Fig.3.2). Entonces se cumple con las medidas principales que una probeta debe tener para obtener un cordón aceptable y sin defectos como se puede observar en la Fig.3.2.



Fig.3.2. Probeta armada para realizar el cordón de soldadura

5. Ya preparada la probeta de soldadura, se calibra la máquina de soldadura para el procesos GMAW. Es decir se pone el voltaje, amperaje, velocidad del alambre, tipo de corriente, y polaridad. Además, se verifica el porcentaje de mezcla de gases en el panel de control de la máquina soldadora y el material de aporte que se va a utilizar, que en este caso es un alambre que se alimenta continuamente en la realización de cada pase de soldadura.

Estos datos difieren según el pase de soldadura que se realiza, es decir si es un pase de raíz o un pase de relleno. En la Tabla.3.1 se ve todos los parámetros que se utilizaron para los distintos pases de soldadura que se hacen.

Pase de soldadura	Corriente	Amperaje (A)	Vel. Alambre (m/min)	Polaridad	Voltaje (V)	Mezcla de Gas
1 (pase de raíz)	DC	126	7.1	Inversa	18.3	75%Ar+25%CO2
2-6 (pases relleno)	DC	181	14.1	Inversa	29.1	75%Ar+25%CO2

Tabla.3.1. Datos iniciales asignados en la máquina de soldadura

- El tipo de alambre que se utiliza como material de aporte es un ER70S-6 de 0.9 mm de diámetro, del cual se puede observar la ficha técnica en el Anexo D.
- El material para el metal base que se utiliza fue un acero SA-516 grado 70 de espesor 5/8 pulg (16 mm), del cual se puede observar la ficha técnica en el Anexo B.
- Para este proceso de soldadura se utiliza la posición 1G, es decir en una posición horizontal para realizar una soldadura plana.

6. Después de obtener todos los parámetros necesarios para comenzar con un proceso de soldadura, se procede a llenar el WPS en donde debe constar todos los parámetros mencionados para que el soldador tenga una guía y pueda proseguir con la soldadura. En las siguientes páginas se puede observar el WPS para este proceso de soldadura GMAW.

7. A continuación, después de especificar y poner los datos iniciales para realizar una soldadura, se procede a comenzar con la soldadura. Para realizar el pase de raíz, se realiza un pase con un movimiento lineal. (Fig.3.3 y Fig.3.4)



Fig.3.3. Pase de raíz, vista superior



Fig.3.4. Pase de raíz, vista inferior

8. Al terminar el pase de raíz, se limpia la escoria con la ayuda de una amoladora para evitar que se queden residuos en el cordón, los cuales podrías provocar defectos posteriores.
9. Posteriormente se utiliza los parámetros para un pase de relleno para completar el proceso de soldadura. Entonces se realiza varios pases hasta alcanzar rellenar todo el bisel y no sobrepasar las medidas aceptables que un cordón de soldadura debe tener para que no existan defectos y pase una inspección visual. En las figuras a

continuación se puede observar cómo se fue rellenando todo el bisel y como se logra un cordón de soldadura aceptable visualmente para poder proseguir con los ensayos destructivos. (Fig.3.5, Fig.3.6, y Fig.3.7)



Fig.3.5 Pase de relleno 1



Fig.3.6. Pase de relleno con movimiento en sig-sag 2 y 3



Fig.3.7. Pase de relleno con un movimiento lineal 4 y 5

Certificación del proceso de soldadura mediante ensayos destructivos

Inspección Visual del cordón de soldadura

1. En primer lugar, se observa detalladamente el cordón realizado verificando si existen o no defectos de soldadura como porosidades, discontinuidades, mordeduras, demasiado material de soldadura o falta de material de soldadura, etc.

No se encuentra ningún tipo de defecto a largo del cordón de soldadura y se observa uniformidad como se ve en la Fig.3.8. Por lo tanto se prosigue a cortar las probetas y realizar las demás pruebas destructivas con la ayuda de máquinas especiales para cada ensayo.



Fig.3.8. Cordón de soldadura finalizado

2. Luego de haber hecho la soldadura y analizarla visualmente, se procede a analizar cuantos y cuales ensayos destructivos se debe realizar según el código ASME para calificar y analizar si se aprueba o no el proceso de soldadura que se hace. Entonces en

la Fig.1.6 se ve cuantos y cuales ensayos destructivos son necesarios para aprobar la soldadura.

3. Por consiguiente, según lo estudiado en la Fig.1.6, para el espesor de 5/8 pulg (16 mm) utilizado en el metal base de las probetas de soldadura, se debe realizar 2 pruebas de tensión, y 4 pruebas de pruebas de doblado con respecto al lado lateral de cada probeta. Entonces, se prosigue a cortar las probetas siguiendo el orden como se puede observar en la Fig.1.7, para que puedan ser utilizadas en los análisis.
 - El corte se realiza con la ayuda de una máquina CNC en la cual ya existe la programación para realizar estos cortes. Posteriormente al corte, se limpia y pule cada probeta con una amoladora y demás equipos para eliminar escorias y material afectado.
4. Por lo tanto se procede a realizar las probetas para las pruebas de doblado con medidas especificadas en el código ASME sección IX como se puede ver en la Fig.3.9, las cuales son mencionadas en el enunciado del código como se puede observar en el Anexo F.

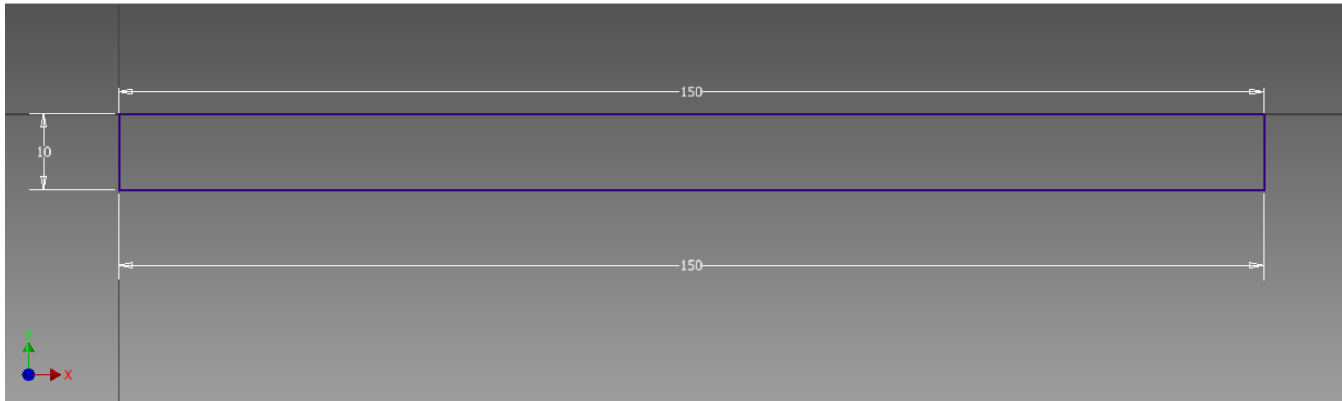


Fig.3.9. Dimensiones de una probeta para un ensayo de doblado

5. Después se realiza las probetas para las pruebas de tensión con medidas especificadas también por el código ASME sección IX como se puede ver en la Fig.3.10. Estas medidas también están en el enunciado del código ASME sección IX como se puede ver en el Anexo G.

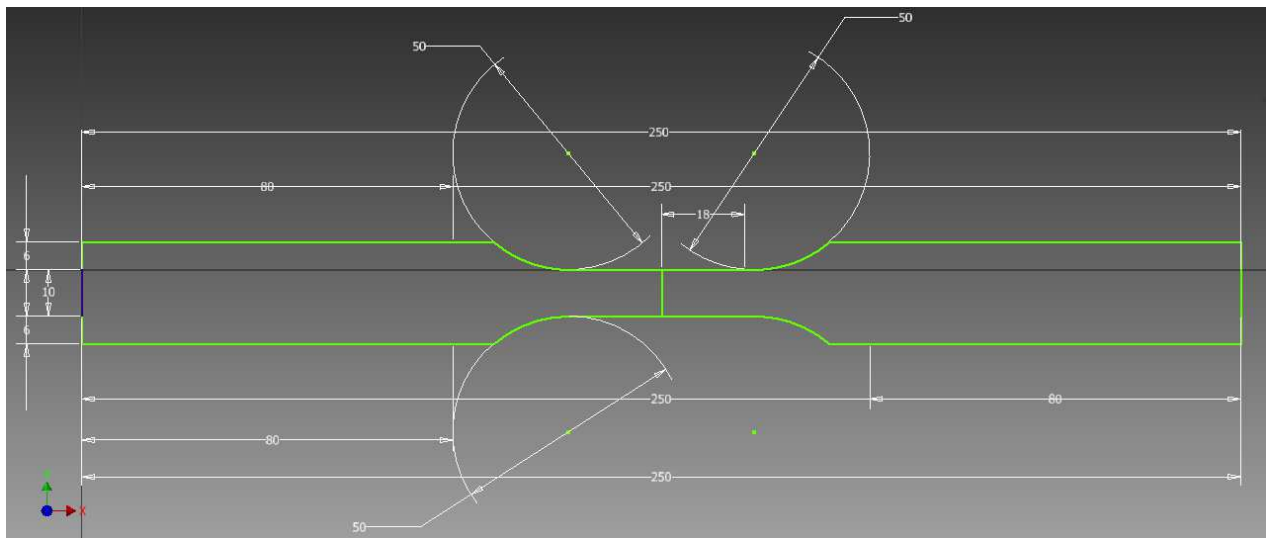


Fig.3.10. Dimensiones de una probeta para un ensayo de tensión

- Por lo tanto, se obtienen seis probetas para poder realizar cada ensayo destructivo necesario para la calificación del proceso de soldadura. En la Fig.3.11 se puede observar el resultado del corte y limpieza de las probetas.



Fig.3.11. Probetas cortadas para las pruebas de doblado y de tensión

Ensayo de la Prueba de Doblado

6. Para la prueba de doblado es necesario hacerla mediante un jig, el cual también está especificado por el código ASME sección IX, al igual que sus medidas que dependen del espesor del material base y el ancho de la probeta como se puede observar en las Fig.3.12 y Fig.3.13. El jig utilizado se realizó en la empresa B&T con la ayuda de una máquina CNC y un diseño hecho en un AutoCad. El jig consta de dos piezas, el yoke y la pieza para guiar la probeta.

Es muy importante conocer las dimensiones necesarias y obligatorias para que el jig utilizado sea aceptado y pueda ser utilizado en este tipo de ensayo destructivo, es por eso que en el mismo código ASME sección IX se lo describe. Por lo tanto es relevante conocer y saber cómo realizar un jig para una prueba de doblado para poder controlar el ensayo y poder aceptar o rechazar los resultados que éste dé.

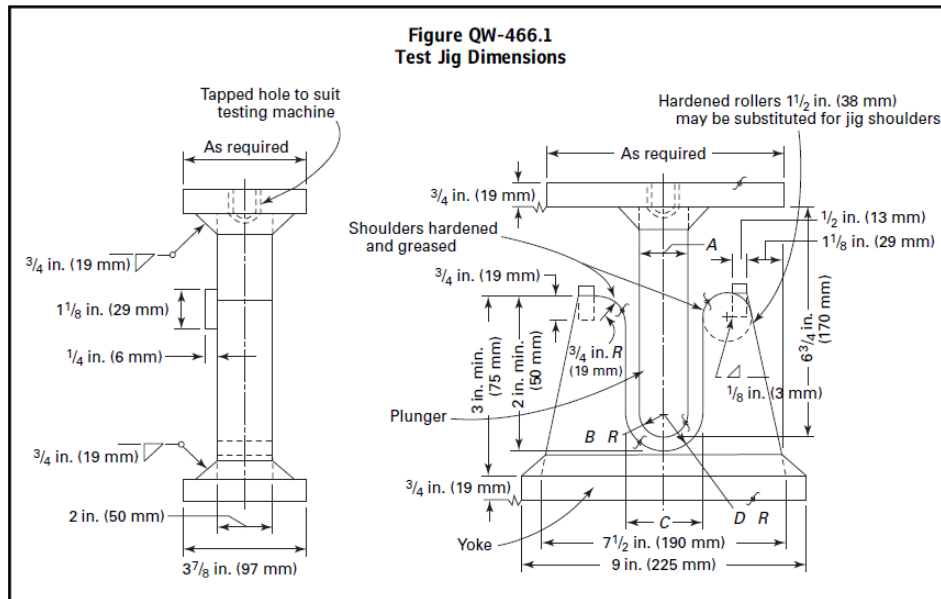


Fig.3.12. Medidas de un jig para las pruebas de doblado [2]

**Figure QW-466.1
Test Jig Dimensions (Cont'd)**

Table continued

SI Units					
Material	Thickness of Specimen, mm	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm
All others with greater than or equal to 20% elongation	10	40	20	63	32
	$t = 10$ or less	$4t$	$2t$	$6t + 3.2$	$3t + 1.6$
Materials with 3% to less than 20% elongation	$t =$ [see Note (1)]	$32\frac{7}{8}$ t max.	$16\frac{7}{16} t$ max.	$A + 2t + 1.6$ max.	$\frac{1}{2} C + 0.8$ max.

GENERAL NOTES:

- (a) For P-Numbers, see QW/QB-422; for F-Numbers, see QW-432.
- (b) For guided-bend jig configuration, see QW-466.2, QW-466.3, and QW-466.4.
- (c) The weld and heat-affected zone, in the case of a transverse weld bend specimen, shall be completely within the bend portion of the specimen after testing.
- (d) For materials with less than 3% elongation, a macro-etch specimen shall be used in lieu of bend test at each bend test location. Acceptance criteria shall be in accordance with QW-183(a).

NOTE:

(1) The dimensions of the test jig shall be such as to give the bend test specimen a calculated percent outer fiber elongation equal to at least that of the base material with the lower minimum elongation as specified in the base material specification.

$$\text{percent outer fiber elongation} = \frac{100t}{A + t}$$

The following equation is provided for convenience in calculating the bend specimen thickness:

$$\text{thickness of specimen}(t) = \frac{A \times \text{percent elongation}}{100 - (\text{percent elongation})}$$

Fig.3.13. Cálculos para obtener medidas del jig [2]

7. Para realizar esta prueba, se dobla el espécimen con el lado lateral paralela al plano de la base del jig. La probeta se fuerza hacia adentro del die del jig aplicando carga con la ayuda de una gata hasta que la probeta forme una curva igual a la que el jig tiene como se puede observar en la Fig.3.14. mostrada.





Fig.3.14. Desarrollo de la prueba de doblado

8. Esta prueba se hace para las cuatro probetas cortadas destinadas a los ensayos de doblado. Después de realizar las distintas pruebas, se hace un análisis visual de éstas para verificar si son aceptadas o rechazadas como se puede ver en la Fig.3.15. Para esto, lo que se observa es la existencia o no de discontinuidades en el lugar por donde el cordón de soldadura pasa o en la zona afectada por el calor.



Fig.3.15. Probetas dobladas

Discontinuidad

9. Como se puede observar en las probetas, en una de ellas se produjo una pequeña discontinuidad (Fig.3.15), lo que es una falta de cohesión o interrupción en la estructura física del material, es decir una pérdida de la homogeneidad del material. Según las especificaciones del código ASME sección IX en lo que se refiere al criterio de aceptación (Ver Anexo H), para una prueba de doblado, “Será aprobada la prueba si no hay discontinuidades o si hay, no superen los 3mm en total en cualquier dirección

en la superficie convexa en la soldadura o en la zona afectada por el calor después del doblado”. Por consiguiente, como se puede observar en la Fig.3.16, se mide la discontinuidad y se verifica que su tamaño es menor a 3mm. Entonces, la prueba es aprobada y se continúa con los demás ensayos (pruebas de tensión).

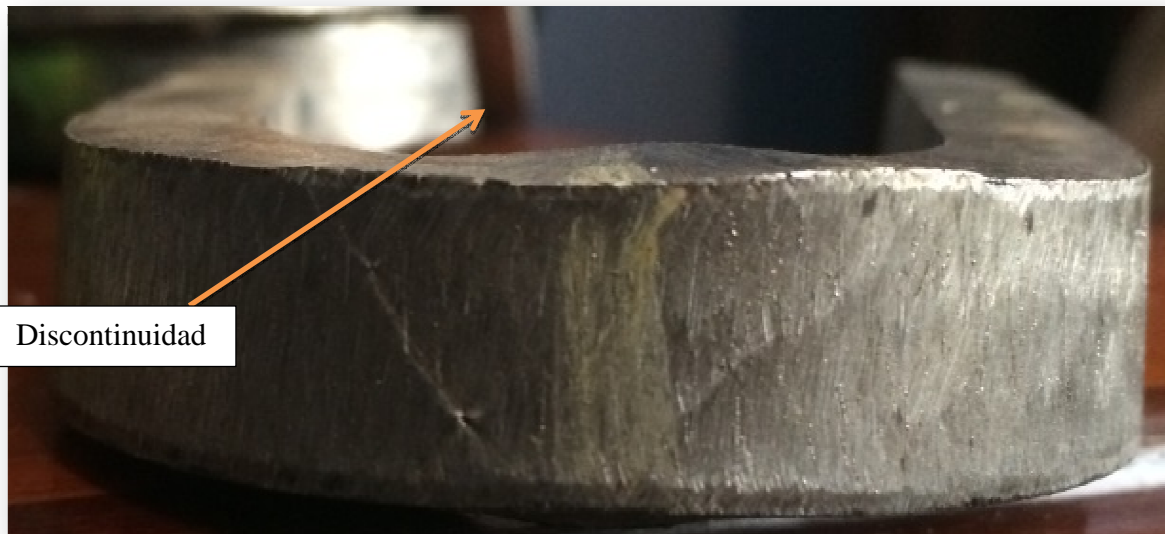


Fig.3.16. Probeta con una pequeña discontinuidad

Ensayo de la Prueba de Tensión

10. Posteriormente, se realiza la prueba de Tensión. Para realizar la prueba de tensión se corta las probetas según lo especificado por el código y se obtiene probetas como se puede observar en la Fig.3.17. Esta prueba se realizó en la Escuela Politécnica Nacional de Quito en el departamento de Ingeniería, laboratorio de esfuerzos y vibraciones.



Fig.3.17. Probetas para la prueba de tensión

- El equipo que se utiliza para realizar esta prueba es una “Tinius Olsen Testing Machine”, en la cual se puede aplicar fuerzas de 0 – 300.000 N. Esta máquina se utiliza en el laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional de forma educativa y profesional, ya que se usa para que los estudiantes realicen sus prácticas y para

pedidos de realización de ensayos de empresas y personas externas a la universidad.

11. Para realizar estas pruebas de tensión, se sujeta las probetas previamente cortadas en la máquina para ensayos de tensión como se puede observar en la Fig.3.18 para de esa manera aumentar la carga poco a poco hasta su rotura dando como resultado las probetas que se pueden observar en la Fig.3.19, y así poder obtener resultados de esfuerzos de tensión para cada probeta y analizarlos para aprobar o no estos ensayos de acuerdo al criterio de aceptación para una calificación de soldadura según el código ASME sección IX.



Fig.3.18. Probeta sujeta en la máquina para realizar ensayos de tensión



Fig.3.19. Probetas post-prueba de tensión

12. Los resultados que se obtienen se pueden observar en la Tabla.3.2 en donde se puede ver las resistencias a la tracción de cada probeta, y, así poder compararlas con la resistencia mínima a la tracción del material base.

Probeta	Ancho Promedio (mm)	Espesor Promedio (mm)	Carga Maxima Registrada (N)	Resistencia a la tracción (Mpa)
T1	16.95	15.98	146.346	540.3
T2	19.70	15.96	166.363	529.3

Tabla.3.2. Datos obtenidos del resultado de la prueba de tensión

13. Además, se compara estos resultados con los valores emitidos por el fabricante del material base utilizado con la ayuda del certificado dado por el mismo. En este

certificado se muestran los resultados de varios ensayos de tracción, los cuales se pueden observar en el Anexo B. Entonces, los valores de la Tabla.3.2. son valores coherentes a los valores de los ensayos de tracción realizados por el fabricante del material base (SA516-70), y están en el rango que el acero SA-516 Gr. 70 resiste como se puede observar en la Tabla.3.3. [10]

Propiedades Mecánicas del Acero A-516 Gr.70	
Esfuerzo de tensión, MPa (ksi)	485 - 620 (70 - 90)
Esfuerzo de fluencia, min MPa (ksi)	260 (38)

Tabla.3.3. Propiedades mecánicas del material base utilizado en el procedimiento de calificación de soldadura.

14. Por otro lado, se realiza un ensayo de tracción del material base sin ninguna soldadura con las mismas medidas que se utilizaron en los ensayos de tracción de las probetas de soldadura (Fig.3.11). Esto se realizó en la Universidad San Francisco de Quito en el Laboratorio de Mecánica de Materiales con la ayuda de una máquina “Tinius Olsen” en la cual se puede usar fuerzas de 0 – 300.000 N. Esto se realiza para corroborar la coherencia con los valores de esfuerzos máximos emitidos por el fabricante del material base utilizado (SA516-70) y con los valores de los ensayos de tracción realizados. De esta manera se puede concluir de mejor manera para aprobar o no los dos ensayos de tracción que el código ASME sección IX exige para calificar un procedimiento de soldadura.

15. Entonces se corta dos probetas más para los ensayos de tracción sin soldadura (Fig.3.20), y realizar los ensayos de tracción sujetando las probetas en la máquina como se puede observar en la Fig.3.21, para obtener resultados de esfuerzos últimos del material. En la Tabla.3.4. se observa los resultados de cada probeta analizada. (Ver Anexo J).



Fig.3.20. Probetas sin soldadura para ensayos de tracción



Fig.3.21. Probetas sujetadas en la máquina de ensayos de tracción de probetas sin soldadura

Probeta	Ancho Promedio (mm)	Espesor Promedio (mm)	Carga Máxima Registrada (N)	Resistencia a la tracción (Mpa)
S1	15,68	16,03	131.000	521,5
S2	16,15	15,70	133.000	524,5

Tabla.3.4. Datos obtenidos del resultado de la prueba de tensión de las probetas sin soldadura

16. Entonces, según las Tabla.3.2, Tabla.3.3, y Tabla.3.4 los valores de resistencia a la tracción de las probetas son mayores al del metal base, el cual tiene un valor igual a 485 MPa como resistencia mínima a la tracción según lo especificado por el código ASME. Por lo tanto, estos ensayos se aprueban según el criterio de aceptación del código ASME sección IX (Anexo H), el cuál especifica que para aprobar las probetas, su resistencia a esfuerzos debe ser mayor o igual al del metal base. (Anexo B y Anexo C).

Certificación del proceso de soldadura

Después de realizar todas las pruebas necesarias para la calificación de un proceso de soldadura y haberlas aprobado, se califica exitosamente al proceso y al soldador. Entonces, se prosigue a realizar y llenar el PQR y WPQ de este proceso GMAW, en donde se puede observar cada variable que se utiliza como parámetro para este proceso de soldadura. Estos documentos se pueden observar a continuación.

Cálculos de presión interna

Además de haber realizado paso a paso la calificación de soldadura y soldador, se realiza un cálculo para verificar cuanta presión máxima podría soportar esta junta de soldadura con el espesor utilizado en un eventual uso para la construcción de un tanque. Entonces, para hacer los cálculos se utiliza el procedimiento según el código ASME sección VIII División 1 para espesores bajo presión interna como se puede observar en los enunciados del código en las Fig.3.22 y Fig.3.23. Para esto, primero se define las variables que se van a utilizar.

(2) *Longitudinal Stress (Circumferential Joints).*²⁰
When the thickness does not exceed one-half of the inside radius, or P does not exceed $1.25SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad \text{or} \quad P = \frac{2SEt}{R - 0.4t} \quad (2)$$

Fig.3.22. Fórmula para cálculo de presión interna_1 [3]

UG-27 THICKNESS OF SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE (13)

(a) The minimum required thickness of shells under internal pressure shall not be less than that computed by the following formulas,¹⁸ except as permitted by Mandatory Appendix 1 or Mandatory Appendix 32. In addition, provision shall be made for any of the loadings listed in UG-22, when such loadings are expected. The provided thickness of the shells shall also meet the requirements of UG-16, except as permitted in Mandatory Appendix 32.

(b) The symbols defined below are used in the formulas of this paragraph.

E = joint efficiency for, or the efficiency of, appropriate joint in cylindrical or spherical shells, or the efficiency of ligaments between openings, whichever is less.

For welded vessels, use the efficiency specified in UW-12.

For ligaments between openings, use the efficiency calculated by the rules given in UG-53.

P = internal design pressure (see UG-21)

R = inside radius of the shell course under consideration,¹⁹

S = maximum allowable stress value (see UG-23 and the stress limitations specified in UG-24)

t = minimum required thickness of shell

(c) *Cylindrical Shells.* The minimum thickness or maximum allowable working pressure of cylindrical shells shall be the greater thickness or lesser pressure as given by (1) or (2) below.

(1) *Circumferential Stress (Longitudinal Joints).* When the thickness does not exceed one-half of the inside radius, or P does not exceed $0.385SE$, the following formulas shall apply:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad \text{or} \quad P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (1)$$

Fig.3.23. Fórmula para cálculo de presión interna_2 [3]

E = Eficiencia de la junta, ésta depende del ensayo no destructivo que se realizará después de la construcción del tanque, es decir si será en toda la junta o sólo se tomará una parte de ella. Los valores para cada caso se pueden observar en la Fig.3.25.

P = Presión interna, incógnita.

R = Radio interno del tanque, valor inicial de diseño.

S = Valor máximo permitido de esfuerzo del metal (Fig.3.26), ver Anexo I.

t = Espesor mínimo del metal, valor inicial de diseño.

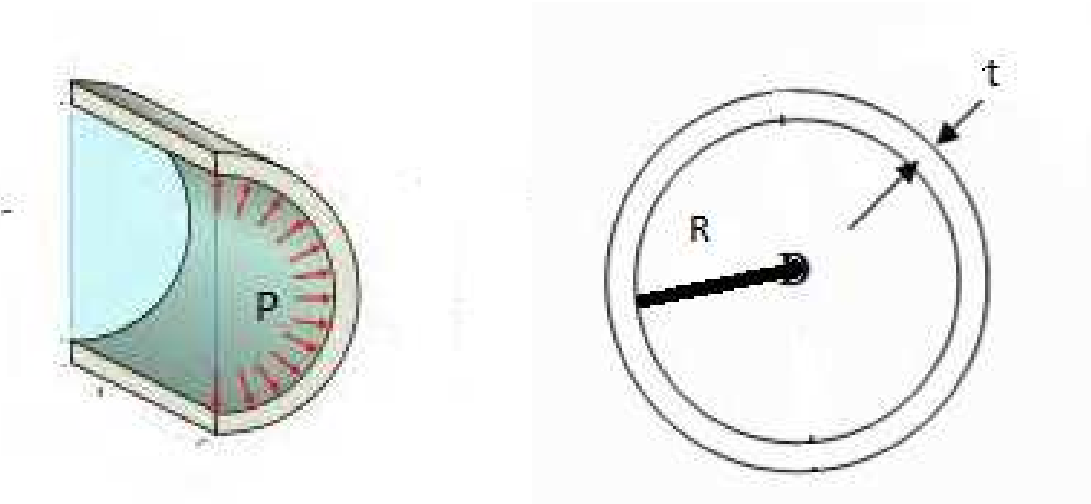


Fig.3.24. Gráfica de los parámetros para los cálculos

Table UW-12
Maximum Allowable Joint Efficiencies for Arc and Gas Welded Joints

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full [Note (1)]	(b) Spot [Note (2)]	(c) None
(1)	Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-35. Welds using metal backing strips which remain in place are excluded.	None	A, B, C & D	1.00	0.85	0.70
	other than those included under (1)	(b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-13(b)(4) and Figure UW-13.1, sketch (i)	A, B & C	0.90	0.80	0.65
(3)	Single-welded butt joint without use of backing strip	Circumferential butt joints only, not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) thick and not over 24 in. (600 mm) outside diameter	A, B & C	NA	NA	0.60
(4)	Double full fillet lap joint	(a) Longitudinal joints not over $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) thick (b) Circumferential joints not over $\frac{7}{8}$ in. (16 mm) thick	A B & C [Note (3)]	NA NA	NA NA	0.55 0.55
(5)	Single full fillet lap joints with plug welds conforming to UW-17	(a) Circumferential joints [Note (4)] for attachment of heads not over 24 in. (600 mm) outside diameter to shells not over $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) thick (b) Circumferential joints for the attachment to shells of jackets not over $\frac{7}{8}$ in. (16 mm) in nominal thickness where the distance from the center of the plug weld to the edge of the plate is not less than $1\frac{1}{2}$ times the diameter of the hole for the plug.	B C	NA NA	NA NA	0.50 0.50
(6)	Single full fillet lap joints without plug welds	(a) For the attachment of heads convex to pressure to shells not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) required thickness, only with use of fillet weld on inside of shell; or (b) for attachment of heads having pressure on either side, to shells not over 24 in. (600 mm) inside diameter and not over $\frac{3}{4}$ in. (6 mm) required thickness with fillet weld on outside of head flange only	A & B A & B	NA NA	NA NA	0.45 0.45
(7)	Corner joints, full penetration, partial penetration, and/or fillet welded	As limited by Figure UW-13.2 and Figure UW-16.1	C & D [Note (5)]	NA	NA	NA
(8)	Angle joints	Design per U-2(g) for Category B and C joints	B, C & D	NA	NA	NA

GENERAL NOTES:

- (a) The single factor shown for each combination of joint category and degree of radiographic examination replaces both the stress reduction factor and the joint efficiency factor considerations previously used in this Division.
- (b) $E = 1.0$ for butt joints in compression.

Fig.3.25. Listado de las eficiencias para un cálculo de presión interna [3]

Table QW/QB-422
Ferrous/Nonferrous P-Numbers
Grouping of Base Metals for Qualification (Cont'd)

Spec. No.	Type or Grade	UNS No.	Minimum Specified Tensile, ksi (MPa)	Welding		Brazing		ISO 15608 Group	Nominal Composition	Product Form
				P-No.	Group No.	P-No.	Group			
Ferrous (Cont'd)										
A514	Q	—	100 (690)	11B	9	102	3.1	1.3Ni-1.3Cr-0.5Mo-V	Plate > 2½ in. - 6 in. (64 mm - 152 mm), incl.	
A514	Q	—	110 (760)	11B	9	102	3.1	1.3Ni-1.3Cr-0.5Mo-V	Plate, 2½ in. (64 mm) max.	
A/SA-515	60	K02401	60 (415)	1	1	101	1.1	C	Plate ≤ 1 in. (25 mm)	
A/SA-515	60	—	60 (415)	1	1	101	1.1	C-Si	Plate > 1 in. (25 mm)	
A/SA-515	65	K02800	65 (450)	1	1	101	1.1	C-Si	Plate	
A/SA-515	70	K03101	70 (485)	1	2	101	1.1	C-Si	Plate	
A/SA-516	55	K01800	55 (380)	1	1	101	1.1	C-Si	Plate	
A/SA-516	60	K02100	60 (415)	1	1	101	1.1	C-Mn-Si	Plate	
A/SA-516	70	K02700	70 (485)	1	2	101	1.1	C-Mn-Si	Plate	
A/SA-517	F	K11576	115 (795)	11B	3	101	3.1	0.75Ni-0.5Cr-0.5Mo-V	Plate ≤ 2½ in. (64 mm)	
A/SA-517	B	K11630	115 (795)	11B	4	101	3.1	0.5Cr-0.2Mo-V	Plate ≤ 1¼ in. (32 mm)	
A/SA-517	A	K11856	115 (795)	11B	1	101	3.1	0.5Cr-0.25Mo-Si	Plate ≤ 1¼ in. (32 mm)	
A/SA-517	E	K21604	105 (725)	11B	2	102	3.1	1.75Cr-0.5Mo-Cu	Plate > 2½ in. - 6 in. (64 mm - 152 mm), incl.	
A/SA-517	E	K21604	115 (795)	11B	2	102	3.1	1.75Cr-0.5Mo-Cu	Plate ≤ 2½ in. (64 mm)	
A/SA-517	P	K21650	105 (725)	11B	8	102	3.1	1.25Ni-1Cr-0.5Mo	Plate > 2½ in. - 4 in. (64 mm - 102 mm), incl.	
A/SA-517	P	K21650	115 (795)	11B	8	102	3.1	1.25Ni-1Cr-0.5Mo	Plate ≤ 2½ in. (64 mm)	
A519	1018 HR	G10180	—	1	1	101	1.1	C	Tube	
A519	1018 CW	G10180	—	1	2	101	1.1	C	Tube	
A519	1020 HR	G10200	—	1	1	101	1.1	C	Tube	
A519	1020 CW	G10200	—	1	2	101	1.1	C	Tube	
A519	1022 HR	G10220	—	1	1	101	1.1	C	Tube	
A519	1022 CW	G10220	—	1	2	101	1.1	C	Tube	
A519	1025 HR	G10250	—	1	1	101	1.1	C	Tube	
A519	1025 CW	G10250	—	1	2	101	1.2	C	Tube	
A519	1026 HR	G10260	—	1	1	101	1.1	C	Tube	
A519	1026 CW	G10260	—	1	2	101	1.1	C	Tube	
A/SA-522	Type II	K71340	100 (690)	11A	1	101	9.3	8Ni	Forgings	

Fig.3.26. Listado de las materiales y sus respectivos esfuerzos [2]

1. En primer lugar se hace el cálculo para un esfuerzo circunferencial, lo que significa, para una junta longitudinal. Esta fórmula se puede usar si t no excede el valor de la mitad de R o si P no excede $0.385 * S * E$. [3]

$$P = \frac{S * E * t}{R + 0.6 * t}$$

[3]

Los valores usados para resolver esta ecuación son:

$S = 485 \text{ MPa}$ (Mínimo esfuerzo a la tracción)

$E = 1$ (eficiencia para una radiografía completa post-soldadura)

$t = 16 \text{ mm}$

$R = 1.5 \text{ m}$ (radio establecido según diseño hecho)

Entonces la fórmula queda igual a:

$$P = \frac{485000000 \text{ Pa} * 1 * 0.016 \text{ m}}{1.5 \text{ m} + (0.6 * 0.016 \text{ m})}$$

$$P = \frac{7760000 \text{ N/m}}{1.5096 \text{ m}}$$

$$P = 5140434.55 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 5.14 \text{ MPa}$$

$$P = 745.55 \text{ psi}$$

2. En segundo lugar se hace el cálculo para un esfuerzo longitudinal, lo que significa, para una junta circunferencial. Esta fórmula se puede usar si t no excede el valor de la mitad de R o si P no excede $0.385 * S * E$. [3]

$$P = \frac{2 * S * E * t}{R + 0.4 * t}$$

[3]

Los valores usados para resolver esta ecuación son:

S= 485 MPa (Mínimo esfuerzo a la tracción)

E=1 (eficiencia para una radiografía completa post-soldadura)

t= 16 mm

R= 1.5 m (radio establecido según diseño hecho)

Entonces la fórmula queda igual a:

$$P = \frac{2 * 485000000 \text{ Pa} * 1 * 0.016 \text{ m}}{1.5 \text{ m} + (0.4 * 0.016 \text{ m})}$$

$$P = \frac{15520000 \text{ N/m}}{1.5064 \text{ m}}$$

$$P = 10302708.44 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 10.30 \text{ MPa}$$

$$P = 1494.28 \text{ psi}$$

- Los valores obtenidos para los dos tipos de esfuerzos (circunferenciales y longitudinales), son valores máximos que soportarían cada una de las juntas y el material base según el valor mínimo de esfuerzo a la tracción usado. Estos valores provocarían una deformación permanente y ruptura en el material y/o junta de soldadura, lo cual no es lo que se esperaría de un tanque que sea utilizado en la industria petrolera.
 - Lo que se requiere en un procedimiento de construcción que se realiza en la industria petrolera para tanques que trabajan con presiones altas, es que el material no presente deformaciones plásticas ni rupturas, por lo tanto los valores de esfuerzos máximos que se deben tomar en cuenta para éstos cálculos son los que sólo provocarían deformaciones elásticas, es decir hasta el esfuerzo de fluencia.
 - Estos esfuerzos que se utilizan para realizar los cálculos de presión dependen de la temperatura de diseño a la que se quiera trabajar, y ésta cambia el valor de esfuerzo máximo permitido que se debe utilizar en el cálculo como se puede observar en el Anexo I en donde el valor de esfuerzo permitido varía según el valor de temperatura. Por ejemplo, para una temperatura de diseño de 100 °C, el valor del esfuerzo es igual a 20 ksi (138 MPa) según el código ASME sección II parte D, entonces los valores calculados serían diferentes.
3. Por lo tanto, se hace el cálculo para un esfuerzo circunferencial con una temperatura de diseño igual a 100 °C, lo que significa, para una junta longitudinal. [3]

$$P = \frac{S * E * t}{R + 0.6 * t}$$

[3]

Los valores usados para resolver esta ecuación son:

S= 138 MPa (Esfuerzo máximo permitido)

E=1 (eficiencia para una radiografía completa post-soldadura)

t= 16 mm

R= 1.5 m (radio establecido según diseño hecho)

Entonces la fórmula queda igual a:

$$P = \frac{138000000 \text{ Pa} * 1 * 0.016 \text{ m}}{1.5 \text{ m} + (0.6 * 0.016 \text{ m})}$$

$$P = \frac{2192000 \text{ N/m}}{1.5096 \text{ m}}$$

$$P = 1452040.276 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 1.452 \text{ MPa}$$

$$P = 210.6 \text{ psi}$$

4. Después se hace el cálculo para un esfuerzo longitudinal también una temperatura de diseño igual a 100 °C, lo que significa, para una junta circunferencial. [3]

$$P = \frac{2 * S * E * t}{R + 0.4 * t}$$

[3]

Los valores usados para resolver esta ecuación son:

S= 138 MPa (Esfuerzo máximo permitido)

E=1 (eficiencia para una radiografía completa post-soldadura)

t= 16 mm

R= 1.5 m (radio establecido según diseño hecho)

Entonces la fórmula queda igual a:

$$P = \frac{2 * 138000000 \text{ Pa} * 1 * 0.016 \text{ m}}{1.5 \text{ m} + (0.4 * 0.016 \text{ m})}$$

$$P = \frac{4384000 \text{ N/m}}{1.5064 \text{ m}}$$

$$P = 2910249.602 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 2.910 \text{ MPa}$$

$$P = 422.095 \text{ psi}$$

5. Entonces, el valor que se toma en cuenta para los posteriores cálculos de un tanque que trabaja bajo altas presiones es el menor de los dos últimos valores calculados. El valor menor sería 210.6 psi. Cabe recalcar que el valor obtenido de presión depende de los valores iniciales de diseño que se den o que el cliente dé como condición, estos valores son el de radio del tanque, presión de diseño, temperatura de trabajo, tipo de material a utilizarse, y corrosión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la calificación del proceso de soldadura GMAW, fueron satisfactorios ya que se comprobó su validez para su uso en el proceso de construcción de tanques que trabajan con presiones altas y en un ambiente extremo. Los ensayos destructivos que se realizaron permitieron concluir que se usó parámetros de soldadura correctos para cualquier proceso de soldadura que utilice el procedimiento GMAW.

Los resultados de todo el proceso de calificación de soldadura tienen que ser documentados en formatos que el mismo código exige, es decir el WPS, WPQ, PQR, para que puedan ser revisados por un inspector autorizado por la ASME, para que éste certifique y verifique que se siguió los pasos establecidos en el código ASME adecuadamente comprobando cada parámetro utilizado y los resultados de los ensayos destructivos realizados.

Es responsabilidad de cada empresa que desee realizar tanques con certificación de la ASME proporcionar cada documento de cada proceso de soldadura que quiera utilizar en su compañía, es decir, se debe realizar procesos de calificación de soldadura como el mismo equipo que se realizó en esta tesis para cada soldador en cada uno de los procesos de soldadura respectivos.

Un proceso de calificación de soldadura tiene que ser tomado como un paso muy importante en la documentación y certificación de la calidad de un producto, como un tanque de presión, para cualquier empresa que utilice la soldadura como el proceso de unión de materiales metálicos. Por consiguiente, todo el análisis que se realice para poder realizar cordones de soldadura con buena calidad es indispensable para evitar posteriores defectos en

los cordones de soldadura, ya que, una vez realizado el tanque, a los cordones se les debe realizar ensayos no destructivos como los radiográficos para certificar la calidad del producto. Entonces si uno de estos ensayos no destructivos no son aceptados y aprobados por un inspector ASME, el cual es el autorizado para aprobar estos ensayos, se deberá repetir el cordón de soldadura hasta que éste pase dichos ensayos.

CONCLUSIONES

En conclusión, es indispensable analizar todos los pasos y procedimientos que se deben realizar en una calificación de un proceso de soldadura según el código ASME para obtener resultados que puedan ser utilizados en la práctica por las industrias que requieran estos procesos para la construcción de equipos e instrumentos.

Además, es muy importante realizar un análisis previo de todos los parámetros que se utilizarán en el proceso de soldadura con la ayuda de simulaciones para que, en la calificación del proceso, usar parámetros adecuados y obtener resultados favorables en los ensayos destructivos que permitirán aprobar el proceso de soldadura analizado.

Se llega a la conclusión que, además de los parámetros escogidos y analizados con la ayuda de simulación con el método de los elementos finitos, es indispensables realizar cada paso descrito en el código ASME sección IX adecuadamente para realizar una probeta de soldadura de calidad para evitar defectos en los resultados y así concluir que se obtuvo un proceso de soldadura aceptable para poder utilizarlo en la construcción de equipos que utilicen las exigencias del código ASME sección VIII División 1 para su adecuado y eficaz funcionamiento en la industria.

Además, tener en cuenta cada prueba destructiva que se debe realizar para poder calificar un proceso de soldadura, es decir el número mínimo de ensayos que se deben hacer para aprobar un proceso ya que así se garantizará la calidad del proceso porque, si sólo uno de estos ensayos son fallidos, el proceso no será aceptable y se tendrá que realizar nuevamente la

calificación con el debido cambio de los parámetros principales de soldadura y la mejora en la preparación de todo el proceso.

Por consiguiente, cada paso a seguir en una calificación de un proceso de soldadura que se utilizará en la construcción de equipos para su uso en la industria es muy importante desde su simulación, preparación, y soldadura del cordón para obtener excelentes resultados y garantizar la seguridad en la vida útil del equipo que utilizó dicho proceso de soldadura.

Por último, el análisis del cálculo de una presión interna para un tanque utilizado en las industrias, es importante como inicio de un cálculo completo de este tipo de tanques. Esto se debe a que, con el cálculo de presión interna inicial, se puede concluir de mejor manera como proseguir con los demás cálculos del producto y tener una mejor idea como utilizarlo en la práctica.

REFERENCIAS

- [1] Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Third Edition
- [2] American Society of Mechanical Engineers. *Código ASME para calificación de soldadura, Sección IX*. Edición 2013
- [3] American Society of Mechanical Engineers. *Código ASME para tanques de presión, Sección VIII*. Edición 2013
- [4] American Society of Mechanical Engineers - home page. Recuperado Febrero 10, 2014 de <<https://www.asme.org/>>
- [5] Zienkiewicz-Taylor. *El Método De Elementos Finitos*. Vol 1. Editorial Reverté SA. Barcelona. 1982
- [6] Hutton, David. *Fundamentals of finite element analysis*, Editorial McGraw-Hill. 1era edición, New York. 2004
- [7] Bonifaz, Edison. N.L. Richards. *Modeling Cast IN-738 superalloy gas tungsten arc weld*. Acta Materialia.
- [8] Schultz, Joe. *Steel Changing states*. Newton home page. Recuperado Julio 21, 2014 de <<http://www.newton.dep.anl.gov/askasci/chem99/chem99021.htm>>
- [9] Society of América. *Steel Casting HandBook*. 6ta edición. Recuperado Julio 18, de 2014 <<http://books.google.com.ec/books>>
- [10] Brown McFarlane. *ASME SA516 Grade 70 ans ASTM A516 Grade 70*. Recuperado Junio 28, 2014 de <<http://www.brownmac.com/products/pressure-vessel-steel-plate/asme-sa516-grade-70-and-astm-a516-grade-70-spanish.aspx>>
- [11] FRONIUS Perfect Welding. *TransSteel 3500/5000*. Recuperado Febrero 25, 2014 de <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-11A9F422-71C2013D/fronius_usa/Brochure_Tst_Robotic_and_Manual.pdf>
- [12] INDURA. *Indura 70S-6*. Recuperado Abril 29, 2014 de <http://www.indura.cl/_file/file_2733_70s-6%20alambre.pdf>

- [13] Tapia, Gustavo. *Implementación, programación y control de un brazo robótico para aplicaciones de soldadura por fusión*. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador
- [14] National Computational Infrastructure – home page. Recuperado Marzo 24 2014 de <<http://nf.nci.org.au/facilities/software/COMSOL/4.3/doc/pdf/mph/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf>>
- [15] COMSOL Multiphysics. Recuperado Marzo 15, 2014 de <<http://www.comsol.com/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>>
- [16] COMSOL Multiphysics. Recuperado Marzo 15, 2014 de <<http://www.comsol.com/model/download/142935/IntroductionToHeatTransferModule.pdf>>
- [17] Cortez, Oswaldo. Sotomayor, María. *Aplicación del Método de Elementos Finitos y Programas Computacionales en el Diseño Estructural para el galpón de un taller de la empresa Procopet S.A.* Recuperado Marzo 29, 2014 de <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/330/1/CD-0756.pdf>>
- [18] American Society of Mechanical Engineers. *Código ASME para materiales, Sección II parte D*. Edición 2013

ANEXO A: ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA DE SOLDADURA
FRONIUS TRANSSTEEL 3500/5000 MIG/MAG WELDING SYSTEM

A continuación los datos técnicos y los mandos de operación la máquina que se utilizó para realizar las probetas de soldadura. Estos datos fueron tomados de la página oficial de la marca que realiza esta máquina soldadora. [11]

Datos Técnicos

			TSt 3500
Mains voltage +/- 10 %			380 V / 400 V / 460 V
Welding current range			10 - 350 A
Welding current at:	10 min/40°C (104°F)	40%	Duty cycle 350 A
	10 min/40°C (104°F)	100%	Duty cycle 250 A
Open-circuit voltage			60 V
Working voltage			15.5 V
Degree of protection			IP 23
Dimensions L x W x H mm			747 x 300 x 497 mm
Weight			26.5 kg

Tabla.A.1. Especificaciones Puente_1

			TSt 5000
Mains voltage +/- 10 %			380 V / 400 V / 460 V
Welding current range			10 - 500 A
Welding current at:	10 min/40°C (104°F)	40%	500 – 350 A
	10 min/40°C (104°F)	100%	360 – 350 A
Open-circuit voltage			65 V
Working voltage			14.5 V
Degree of protection			IP 23
Dimensions L x W x H mm			747 x 300 x 497 mm
Weight			30.15 kg

Tabla.A.2. Especificaciones Puente_2

Mandos de Operación

En la Fig.A.1. se puede observar los diferentes mandos que la máquina soldadora tiene para su correcto funcionamiento.

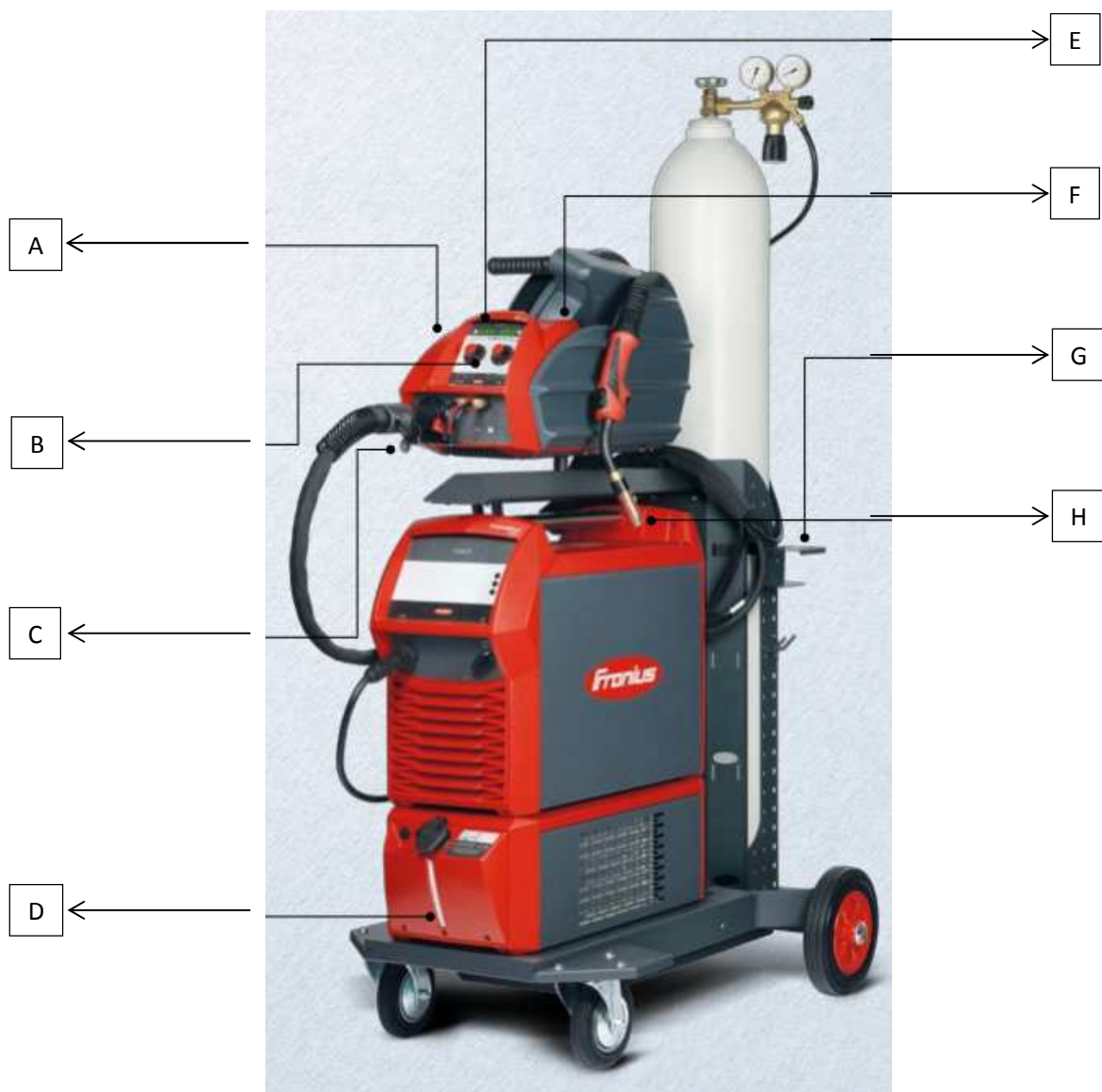


Fig.A.1. Soldadora FRONIUS Trans Steel 3500/5000 MIG/MAG welding system

- A: Empaque en donde el alambre (material de aporte) se guarda.
- B: Guías para ajuste individual.
- C: Conector para el sistema que utiliza la soldadora Fronius.
- D: Ventana de nivel de relleno.
- E: Panel de ajuste de diferentes parámetros como potencia, fuerza de arco, dinámica.
- F: Panel de visualización del avance del alambre.
- G: Porta herramientas.
- H: Boquilla por donde el material de aporte sale para realizar el proceso de soldadura.

ANEXO B: ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL BASE UTILIZADO PARA REALIZAR LAS PROBETAS DE SOLDADURA

A continuación las propiedades del material que se utilizó como material base para realizar la parte práctica del proyecto, el que fue la realización de las probetas de soldadura para su posterior calificación. Estos datos se obtuvieron del certificado del material entregado por su distribuidor.

Propiedades del material

Descripción	Plancha rolada en caliente
Grado del acero	70 (485)
Estándares	ASTM A 516/A516M

Tabla.B.1. Datos Generales del Material

Composición Química	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Ti	Al	As	N	Mo	V	Nb	Ca	B	Ceq	Pcm
	x100			x1000			x100			x1000							x100		
	16	106	22	5	12	1	1	1	13	28	2	7	2	58	26	-	-	34	-

Tabla.B.2. Especificación de la composición química del material

Resultados de pruebas	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Dirección	Temperatura de la prueba	0.2% Offset (Mpa)	Fuerza de tensión (Mpa)	Elongación
	16	40	T	20°	431	520	25%
	16	40	T	20°	427	515	25%
	16	40	T	20°	445	525	25%
	16	40	T	20°	452	530	25%

Tabla.B.3. Especificación de los ensayos realizados al material

ANEXO C: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TENSIÓN DE LA PROBETAS DE SOLDADURA

A continuación se muestra el informe de los ensayos de tracción realizados a dos de las 6 probetas que se realizaron con el proceso de soldadura GMAW como parte de la calificación del proceso mencionado para poder ser utilizado en un proceso de construcción práctico en la industria petrolera. Estos informes fueron emitidos por la Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Mecánica, en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzo y Vibraciones. Por consiguiente, en el informe se mostró datos de esfuerzo y su aprobación o no, más las curvas de esfuerzo vs deformación para cada probeta analizada.

ANEXO D: HOJA DE DATOS DEL ALAMBRE UTILIZADO COMO MATERIAL DE APORTE EN EL PROCESO DE SOLDADURA

A continuación las propiedades del material que se utilizó como material de aporte para realizar la parte práctica del proyecto, el que fue la realización de las probetas de soldadura para su posterior calificación. Estos datos se obtuvieron del certificado del material que se puede encontrar en el sitio web de la marca que fabrica estos materiales. [12]

Propiedades del material

Descripción	Varilla para soldadura TIG
Característica	Revestimiento cobrizado
Estándares	ER70S-6

Tabla.D.1. Datos Generales del Material

Composición Química	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
	0.08	1.44	0.86	0.012	0.014	0.02	0.04	0.003

Tabla.D.2. Especificación de la Composición química del material

Propiedades Mecánicas	Esf. Fluencia en 0.2% (Mpa)	Esf. Máx. de Tracción (Mpa)	Elongación	E. Absorbida Ch-v
	415	530	31%	103 J a -30°C

Tabla.D.3. Especificación de las propiedades mecánicas del material

**ANEXO E: LISTADO DE TODAS LAS VARIABLES PARA EL PROCESO DE
SOLDADURA GMAW**

En las siguientes páginas, se puede observar el listado de todas las variables esenciales, esenciales suplementarias, y no esenciales que deben ser tomadas en cuenta en un proceso de calificación de soldadura GMAW según el código ASME sección IX para su uso en la realización de diferentes tipos de equipos industriales.

ANEXO F: DIMENSIONES DE UNA PROBETA PARA UN ENSAYO DE DOBLADO

En la siguiente página, se puede observar las dimensiones que debe tener una probeta que será utilizada para un ensayo de doblado, el cual es uno de los pasos para certificar la calidad del proceso de calificación de soldadura GMAW según el código ASME sección IX para su uso en la realización de diferentes tipos de equipos industriales.

ANEXO G: DIMENSIONES DE UNA PROBETA PARA UN ENSAYO DE TENSIÓN

En la siguiente página, se puede observar las dimensiones que debe tener una probeta que será utilizada para un ensayo de tensión, el cual es uno de los pasos para certificar la calidad del proceso de calificación de soldadura GMAW según el código ASME sección IX para su uso en la realización de diferentes tipos de equipos industriales.

ANEXO H: CRITERIO DE ACEPTACIÓN PARA UN ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE DOBLADO

En las siguiente figuras, se puede observar los criterios de aceptación que según el código ASME sección IX deben ser tomados en cuenta para poder aprobar o no a los ensayos destructivos que se realizaron en la calificación de soldadura GMAW para terminar con la calificación y corroborar la calidad del cordón de soldadura realizado.

QW-153 ACCEPTANCE CRITERIA — TENSION TESTS

QW-153.1 Tensile Strength. Minimum values for procedure qualification are provided under the column heading "Minimum Specified Tensile, ksi" of [Table QW/QB-422](#). In order to pass the tension test, the specimen shall have a tensile strength that is not less than

(a) the minimum specified tensile strength of the base metal; or

(b) the minimum specified tensile strength of the weaker of the two, if base metals of different minimum tensile strengths are used; or

(c) the minimum specified tensile strength of the weld metal when the applicable Section provides for the use of weld metal having lower room temperature strength than the base metal;

(d) if the specimen breaks in the base metal outside of the weld or weld interface, the test shall be accepted as meeting the requirements, provided the strength is not more than 5% below the minimum specified tensile strength of the base metal.

(e) the specified minimum tensile strength is for full thickness specimens including cladding for Aluminum Alclad materials (P-No. 21 through P-No. 23) less than $\frac{1}{2}$ in. (13 mm). For Aluminum Alclad materials $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) and greater, the specified minimum tensile strength is for both full thickness specimens that include cladding and specimens taken from the core.

Fig.H.1. Criterio de aceptación para un ensayo de tracción

QW-163 ACCEPTANCE CRITERIA — BEND TESTS

The weld and heat-affected zone of a transverse weld-bend specimen shall be completely within the bent portion of the specimen after testing.

The guided-bend specimens shall have no open discontinuity in the weld or heat-affected zone exceeding $\frac{1}{8}$ in. (3 mm), measured in any direction on the convex surface of the specimen after bending. Open discontinuities occurring on the corners of the specimen during testing shall not be considered unless there is definite evidence that they result from lack of fusion, slag inclusions, or other internal discontinuities. For corrosion-resistant weld overlay cladding, no open discontinuity exceeding $\frac{1}{16}$ in. (1.5 mm), measured in any direction, shall be permitted in the cladding, and no open discontinuity exceeding $\frac{1}{8}$ in. (3 mm) shall be permitted along the approximate weld interface.

Fig.H.2. Criterio de aceptación para un ensayo de doblado

**ANEXO I: PROPIEDADES DEL MATERIAL BASE UTILIZADO EN EL
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA**

En las siguientes páginas, se puede observar las propiedades del material SA-516-70 obtenidas del código ASME sección II parte D. En esta tabla se especifican varias propiedades del material como el mínimo esfuerzo de tensión, mínimo esfuerzo de fluencia y los valores máximos de esfuerzo que dependen de la temperatura a la que se va a trabajar.

**ANEXO J: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN DE LAS PROBETAS
SIN SOLDADURA**

En las siguientes páginas, se puede observar los resultados del ensayo de tracción de las probetas de soldadura que realizó en la Universidad San Francisco de Quito en laboratorio de materiales para comprobar y verificar los valores máximos que el material SA-516 grado 70 resiste a la ruptura, es decir su esfuerzo último.

