



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**GENERALIDADES PARA EL DISEÑO, MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE JUNTAS
SOLDADAS Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA TANQUES ATMOSFÉRICOS DE
ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL**

Julio Alberto Martínez Cuéllar

Asesorado por el Ing. Luis Antonio Luarca Saracho

Guatemala, abril de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GENERALIDADES PARA EL DISEÑO, MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE JUNTAS
SOLDADAS Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA TANQUES ATMOSFÉRICOS DE
ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO ALBERTO MARTÍNEZ CUÉLLAR
ASESORADO POR EL ING. LUIS ANTONIO LUARCA SARACHO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

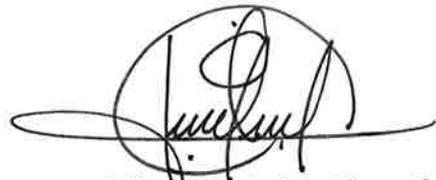
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez
EXAMINADORA	Inga. Carmen Marina Mérida Alva
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**GENERALIDADES PARA EL DISEÑO, MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE JUNTAS
SOLDADAS Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA TANQUES ATMOSFÉRICOS DE
ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha septiembre de 2010.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a circular stamp. The signature is cursive and appears to read 'Julio Alberto Martínez Cuéllar'.

Julio Alberto Martínez Cuéllar

Guatemala, 29 de Agosto de 2011

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles
Facultad de Ingeniería
Guatemala

Respetado Ingeniero:

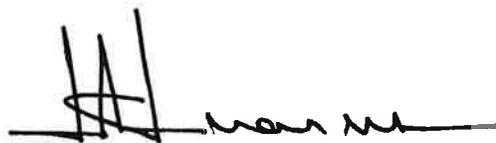
Por medio de la presente comunico a usted, que he tenido a la vista el trabajo de graduación del estudiante **Julio Alberto Martínez Cuéllar** quién se identifica con el carnet **2005-12238**, el cual se titula **"GENERALIDADES PARA EL DISEÑO, METODOS DE INSPECCION DE JUNTAS SOLDADAS Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA TANQUES ATMOSFERICOS DE ALMACENAMIENTO CILINDRICO VERTICAL"**.

El que he asesorado y revisado oportunamente, doy el visto bueno de aprobación del mismo. El cual cumple con los estándares establecidos por la Universidad de San Carlos de Guatemala.

No teniendo ningún inconveniente extendiendo la presente para los usos que al interesado convenga.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted

Atentamente



Ing. Luis Antonio Luarda Saracho
Colegiado No. 1014

Luis Antonio Luarda S.
INGENIERO CIVIL COL. No. 1014
GUATEMALA C.A.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
4 de octubre de 2011

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **GENERALIDADES PARA EL DISEÑO, METODOS DE INSPECCIÓN DE JUNTAS SOLDADAS Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO CILINDRICO VERTICAL**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Julio Alberto Martínez Cuéllar, quien contó con la asesoría del Ing. Luis Antonio Luarda Saracho.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Antonio Luarca Saracho y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Julio Alberto Martínez Cuéllar, titulado GENERALIDADES PARA EL DISEÑO, MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE JUNTAS SOLDADAS Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril de 2012

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **GENERALIDADES PARA EL DISEÑO, MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE JUNTAS SOLDADAS Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA TANQUES ATMOSFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL**, presentado por el estudiante universitario **Julio Alberto Martínez Cuéllar**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 16 de abril de 2012

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por haberme dado la sabiduría y fuerzas para realizar dicho trabajo.
- Mis padres** Julio Gilberto Martínez Velásquez y Ester Noemí Cuéllar Manzo, por formarme el hombre que soy e impulsarme en la búsqueda del éxito.
- Mi familia** Por su apoyo y amor incondicional, especialmente a mis hermanas.
- Mis amigos** Por darme su apoyo en toda mi carrera universitaria, especialmente a mi novia.

AGRADECIMIENTOS A:

Ing. Luis Antonio Luarca	Por su valiosa colaboración en la asesoría, revisión y corrección del presente trabajo.
Ing. Daniel Luarca	Por la aportación de conocimientos en dicho trabajo.
La Facultad de Ingeniería	Por haber participado en toda mi formación académica.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme albergado todos estos años en tan prestigiosa casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. TANQUE DE ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL PARA LÍQUIDOS BAJO PRESIONES ATMOSFÉRICAS	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Tipos de tanques	2
1.2.1. Tanques superficiales	2
1.2.1.1. Tipos de tanques superficiales	2
1.2.1.1.1. Tanques atmosféricos	2
1.2.1.1.2. Tanques de baja presión	3
1.2.1.1.3. Tanques esferoidales de presión intermedia	3
1.2.1.1.4. Esferas presurizadas	3
1.2.1.1.5. Tanques atmosféricos Refrigerados	4
1.2.2. Tanques subterráneos	5
2. ELEMENTOS DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL PARA LÍQUIDOS A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	7
2.1. Cimiento	7
2.1.1. Cimiento sobre terracería	7
2.1.2. Cimiento anular de concreto	8
2.1.3. Cimiento anular de grava y roca triturada	10

2.1.4.	Cimiento de losa y pilotes	10
2.2.	Anclajes	11
2.2.1.	Anclaje por sismo	12
2.2.2.	Anclaje por viento	12
2.2.3.	Anclaje por riesgo de inundación	12
2.2.4.	Anclaje por requerimiento del propietario	13
2.3.	Fondo	13
2.3.1.	Unión traslapada	14
2.3.2.	Unión a tope	14
2.4.	Paredes	15
2.5.	Techo	17
2.5.1.	Techos cónicos soportados	19
2.5.2.	Techos auto soportados	19
2.5.3.	Techos de domo	19
2.5.4.	Techos tipo sombrilla	19
2.5.5.	Techos flotantes	20
2.5.5.1.	Internos	21
2.5.5.2.	Externos	21
2.6.	Aperturas y conexiones	22
2.6.1.	Pasos de hombre	23
2.6.1.1.	Pasos de techo	23
2.6.1.2.	Pasos de pared	24
2.7.	Ventilaciones	25
2.7.1.	Pasivas	25
2.7.2.	Activas	26
2.8.	Conexiones	26
3.	CONSIDERACIONES DE DISEÑO	27
3.1.	Contenido	27
3.1.1.	Peso propio del contenido	27
3.1.2.	Naturaleza del contenido	29

3.2.	Materiales	30
3.3.	Capacidad	31
3.4.	Suelo	31
3.4.1.	Estudio de suelos	32
3.4.1.1.	Capacidad de soporte	32
3.4.1.2.	Ángulo de fricción interna	32
3.4.1.3.	Asentamientos	33
3.4.1.4.	Condiciones especiales	33
3.5.	Cargas	33
3.5.1.	Carga muerta	34
3.5.2.	Carga viva	34
3.5.3.	Carga hidrostática	34
3.5.3.1.	Presión vertical	35
3.5.3.2.	Presión horizontal	35
3.5.4.	Viento	35
3.5.5.	Sismo	36
3.6.	Corrosión permisible	36
4.	CONSIDERACIONES DE SERVICIO	39
4.1.	Función	39
4.2.	Aspectos ambientales y de desastres	39
4.2.1.	Contenedores secundarios	39
4.2.2.	Lavado de agua de lluvia	40
4.2.3.	Reducción de emisiones	41
4.2.4.	Red contra incendios	41
4.2.5.	Techo frangible	41
4.3.	Protecciones y mantenimiento	42
5.	GUÍA PRÁCTICA DE DISEÑO	43
5.1.	Especificaciones preliminares	43
5.2.	Elección de elementos	44

5.2.1.	Fondo	45
5.2.2.	Techo	45
5.2.3.	Cimiento	46
5.3.	Dimensiones del tanque	46
5.3.1.	Determinar la altura de la columna de líquido	46
5.3.2.	Determinar el diámetro del tanque	47
5.3.3.	Establecer dimensiones y capacidad finales	48
5.4.	Diseño de las paredes	48
5.5.	Diseño del fondo	53
5.6.	Diseño del techo	54
5.6.1.	Techo convencional	54
5.6.2.	Techo flotante	58
5.7.	Diseño de cimiento	58
5.7.1.	Esfuerzos horizontales	58
5.7.2.	Esfuerzos verticales	60
5.8.	Viento, sismo, resistencia en compresión de la pared y anclajes	61
5.8.1.	Chequeo por deslizamiento y volteo a causa del viento	61
5.8.2.	Chequeo por deslizamiento y volteo a causa del sismo	64
5.8.2.1.	Momento de volteo	64
5.8.2.2.	Momento estabilizante	68
5.8.2.3.	Fuerza lateral causada por el sismo	69
5.8.2.4.	Resumen de cálculos	70
5.8.3.	Chequeo por compresión en la pared	72
5.8.4.	Anclajes	76
5.9.	Resumen de diseño	79
5.10.	Consideraciones importantes	80

6.	SOLDADURAS	81
6.1.	Generalidades	81
6.2.	Tipos de soldadura	81
6.2.1.	Soldadura autógena	82
6.2.2.	Soldadura por arco eléctrico	83
6.2.2.1.	Soldadura con electrodo de carbono	84
6.2.2.2.	Soldadura con electrodo tungsteno	84
6.2.2.3.	Soldadura con electrodo metálico revestido	84
6.3.	El cordón de soldadura	85
6.3.1.	Zona de soldadura	86
6.3.2.	Zona de penetración	86
6.3.3.	Zona de transición	86
6.3.4.	Clasificación de los cordones de soldadura	87
6.4.	Normas de soldadura	90
7.	MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE JUNTAS EN TANQUES API	91
7.1.	Método radiográfico	91
7.1.1.	Aplicaciones	91
7.1.2.	Ubicación de las radiografías	92
7.1.3.	Técnica	95
7.1.4.	Presentación de las radiografías	96
7.1.5.	Normas radiográficas	97
7.1.6.	Determinación de límites para la soldadura defectuosa	97
7.2.	Examen partículas magnéticas	99
7.2.1.	Generalidades	99
7.2.2.	Materiales	100
7.2.3.	Requerimientos	100
7.2.4.	Procedimientos	101
7.2.5.	Métodos de examinación	102

7.3.	Examen ultrasónico	103
7.3.1.	Procedimiento	103
7.3.2.	Requisitos generales del examen excepto para la medición de espesores	104
7.3.3.	Equipo	104
7.3.4.	Chequeo y calibración del equipo	105
7.4.	Examen por medio de líquidos penetrantes	106
7.4.1.	Generalidades	107
7.4.2.	Revisión del procedimiento de inspección	108
7.4.3.	Control de contaminantes	108
7.4.4.	Preparación de superficie	109
7.4.5.	Secado después de la inspección	110
7.4.6.	Inspección	110
7.4.7.	Aplicación del penetrante	110
7.4.8.	Penetrantes post-emulsificables	111
7.4.9.	Penetrantes removibles con solvente	111
7.4.10.	Secado después de la remoción del penetrante	111
7.4.11.	Revelado	112
7.4.12.	Interpretación	113
7.5.	Examen visual	114
7.6.	Prueba de vacío	116
8.	PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA Y ACREDITACIÓN DEL SOLDADOR	119
8.1.	Requisitos generales	119
8.2.	Pruebas de impacto	119
8.3.	Acreditación del soldador	120
8.4.	Identificación de las juntas soldadas	121

CONCLUSIONES	123
RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFÍA	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tanque de almacenamiento superficial cilíndrico	4
2.	Refuerzo y formaleta de un anillo de cimentación	9
3.	Sección típica del anillo de cimentación	9
4.	Vista de anclajes y una conexión de tubería	11
5.	Vista de la pared desde el interior de un tanque	15
6.	Diagrama de tensión en la pared de un cilindro	16
7.	Techo convencional	22
8.	Pasos de hombre de techo	24
9.	Pasos de hombre de pared	25
10.	Esquema de la distribución de elementos del techo	57
11.	Masas efectivas	66
12.	Centroide de fuerzas sísmicas	66
13.	Factor K	68
14.	Fuerza compresiva b	73
15.	Soldadura con electrodo metálico revestido	85
16.	Partes del cordón de soldadura	85
17.	Dimensiones fundamentales de una soldadura	87
18.	Soldadura de tope	88
19.	Soldadura en ángulo	89
20.	Clasificación de los cordones de soldadura	89
21.	Clasificación de los cordones de soldadura según su posición durante la posición de soldar	90
22.	Ubicación de las tomas radiográficas	94
23.	Toma de una muestra radiográfica	98
24.	Equipo para toma de muestras radiográficas	98

25.	Radiografía de una unión de soldadura	99
26.	Muestra de método de inspección con partículas magnéticas	103
27.	Método ultrasónico	106
28.	Maquinaria a utilizar en el ensayo por líquidos penetrantes	113
29.	Inspección visual	115

TABLAS

I.	Pesos y gravedades específicas de algunos líquidos	28
II.	Datos preliminares de diseño	44
III.	Espesores de pared mínimos según diámetro	49
IV.	Esfuerzos de resistencia máximos de algunos tipos de aceros	51
V.	Resumen de espesores de pared del tanque	52
VI.	Peso de la pared del tanque	53
VII.	Peso del fondo del tanque	54
VIII.	Peso del techo del tanque	56
IX.	Presiones de viento mínimas	61
X.	Resumen del cálculo de cargas de viento	63
XI.	Coefficientes de sitio	68
XII.	Resumen del cálculo de cargas sísmicas	71
XIII.	Resumen del cálculo de fuerzas compresivas	76
XIV.	Cargas de levantamiento	77
XV.	Resumen de diseño	79
XVI.	Espesores máximos de soldadura	96

RESUMEN

La mayor parte de los líquidos manejados en los procesos industriales se almacena a granel en tanques que operan en el entorno de la presión atmosférica. Existen diferentes tipos de tanques de almacenaje. Los descritos en este trabajo son los tanques de almacenamiento cilíndricos verticales. Estos se emplean para almacenar productos de diferente naturaleza química, como por ejemplo: ácidos, álcalis, hidrocarburos, etc. Estos a su vez pueden ser clasificados según sus aspectos, algunos de los cuales son:

- Tipo de cuerpo
- Tipo de techo
- Tipo de fondo

Los factores a considerar para el diseño y la inspección de juntas en dichos tanques son de suma importancia ya que éstas protegen la integridad estructural de los tanques. Sin embargo, una mala consideración en el diseño o en las juntas soldadas pueden ser puntos en donde el tanque pueda fallar o tener fugas y provocar desastres al derramar los productos químicos que almacena.

Se expondrá una especificación clara y concisa de las variables que caracterizan el tema en su totalidad, continuando así con los instrumentos que se utilizarán para desarrollar el tema y el propósito de la investigación.

OBJETIVOS

General

Elaborar un manual que especifique las generalidades de diseño, método de inspección de juntas y procedimiento de soldadura de los tanques de almacenamiento cilíndrico vertical tomando como referencia las normas API 650.

Específicos

1. Definir las consideraciones generales para el diseño e inspección de un tanque de almacenamiento cilíndrico vertical.
2. Enumerar los diferentes métodos de inspección de juntas para tanques de almacenamiento cilíndrico vertical.
3. Determinar un procedimiento adecuado para la soldadura de un tanque de almacenamiento cilíndrico vertical.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación, trata un tema de suma importancia en el campo del diseño de estructuras de acero; enfocándose en los factores a considerar para el diseño de un tanque atmosférico cilíndrico vertical, así como también la metodología de inspección de juntas soldadas de planchas de acero y las normas aplicables a la ejecución de soldaduras especificadas por la norma API 650.

Presenta las generalidades de tanques de almacenamiento cilíndrico vertical para líquidos bajo presiones atmosféricas, así como los diferentes tipos de tanques.

Así mismo describe los elementos de estos tanques como lo son el cimientado, los anclajes, el fondo, las paredes, el techo y las diferentes ventilaciones y conexiones que contienen.

Se enumeran todas las consideraciones de diseño, como por ejemplo, conociendo el tipo de contenido que se necesite almacenar y la capacidad del tanque se puede conocer la geometría del mismo. Una consideración muy importante es conocer el tipo de suelo en el cual se construirá dicho tanque, del cual lo más importante es conocer la capacidad de soporte del mismo. Así como incluir todas las cargas que afectan la estructura como carga muerta, viva, viento, sismo e hidrostática.

También se detallan las consideraciones de servicio, entre ellos el tiempo de vida del tanque, el propósito del contenido a almacenar y posibles cambios del contenido.

Describe los pasos a seguir para el diseño de un tanque atmosférico de almacenamiento cilíndrico vertical. Tabula los datos a necesitar previo al diseño, así como de cada fórmula necesaria para calcular dicho tanque. Detalla los distintos chequeos necesarios para que el tanque no falle al momento de aplicarle las diferentes cargas.

Es de suma importancia conocer las generalidades de la soldadura así como sus diferentes tipos, entre ellos se encuentran, la soldadura autógena, soldadura por arco eléctrico, el cordón de soldadura, etc.

Detalla todo lo relacionado con los diferentes métodos de inspección de juntas soldadas, tales como el método radiográfico, el método de líquidos penetrantes, examen visual, etc. Cada uno describe la forma, el material y la metodología a utilizar para su correcta ejecución, estos métodos son ensayos no destructivos.

Por último refiere los procedimientos de soldadura y la acreditación del soldador, incluyendo los diferentes exámenes y características que deben de tener los soldadores para poder realizar dicho trabajo de una forma eficiente.

1. TANQUES DE ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL PARA LÍQUIDOS BAJO PRESIONES ATMOSFÉRICAS

Los tanques de almacenamiento son la principal manera de almacenar cantidades grandes de productos líquidos, fluidos y gaseosos. Algunos de estos productos pueden ser inestables, corrosivos e inflamables; haciendo necesario que se tomen precauciones especiales para su almacenamiento y uso. El objetivo de un almacenamiento satisfactorio es asegurarse que los productos se puedan almacenar de una manera práctica, económica y ambientalmente segura.

1.1. Generalidades

Los tanques de almacenamiento pueden ser divididos de una manera general. Basándose en su forma de instalación pueden dividirse en: tanques superficiales y tanques subterráneos. Cada una de estas categorías puede ser dividida bajo criterios más específicos, dependiendo del uso, tipología o requerimientos. Todas estas opciones se pueden usar de manera indistinta en la mayoría de aplicaciones, aunque algunas de estas opciones funcionan mejor que otras para requerimientos específicos.

1.2. Tipos de tanques

Existen dos tipos de tanques de almacenamiento cilíndrico vertical, los que están arriba del nivel de piso y los que están debajo del nivel del piso, los cuales se les llama tanques superficiales y tanques subterráneos respectivamente.

1.2.1. Tanques superficiales

Estos tanques mantienen el fluido almacenado sobre la superficie del terreno, teniendo una estructura que aísla la sustancia, como también le da soporte. Estos están expuestos al viento, lluvia y sol. Es usual que se le proporcione con sistemas contra incendios ya que por su posición tienen el riesgo de incendiarse. También por cuestiones ambientales, se les puede dotar de un sistema de retención secundario, tal como un muro o montículo de suelo, con el propósito de retener el fluido en el caso de un derrame.

1.2.1.1. Tipos de tanques superficiales

Los tanques superficiales se pueden clasificar en cinco diferentes tipos de tanques, dependiendo de la presión a la que esté sometido el líquido a ser almacenado.

1.2.1.1.1. Tanques atmosféricos

Este tipo de tanque mantiene su contenido a una presión igual a la atmosférica por medio de ventilaciones pasivas y/o activas. Su estructura no está capacitada para soportar presiones internas ni externas.

1.2.1.1.2. Tanques de baja presión

Similar al tanque atmosférico en su construcción, diferenciándose de este ya que su estructura es capaz de soportar presiones internas y externas de una baja magnitud. Este posee ventilaciones activas que permiten que se desarrolle cierta presión interna, liberándola cuando esta sobrepasa un límite establecido.

1.2.1.1.3. Tanques esferoidales de presión intermedia

Estos tanques por lo general son de forma cilíndrica, con tapas esferoidales o elipsoidales en los extremos. Estos manejan presiones intermedias entre los tanques de baja presión y las esferas presurizadas. Almacenan gases licuados a bajas presiones.

1.2.1.1.4. Esferas presurizadas

Estas esferas son utilizadas para almacenar líquidos de alta volatilidad, tales como gases licuados. Su estructura tiene que ser capaz de soportar presiones considerables, haciendo que esta tome una forma esferoidal, ya que de esa manera se optimizan los esfuerzos y el uso de materiales.

1.2.1.1.5. Tanques atmosféricos refrigerados

De forma parecida a la de los tanques atmosféricos, estos tienen mecanismos de enfriamiento para disminuir la temperatura del contenido con el propósito de reducir la presión de vapor del producto. De esta manera, se puede almacenar el producto más compactamente, ocupando menor espacio.

Figura 1. **Tanque de almacenamiento superficial cilíndrico**



Fuente: fotografía tomada en Bioetanol, Escuintla, Guatemala.

1.2.2. Tanques subterráneos

Se encuentran enterrados, manteniendo el fluido almacenado separado del suelo por medio de una pared o membrana. Estos tanques no están expuestos a los elementos atmosféricos, pero si lo están a las acciones corrosivas del suelo. Tienen la ventaja sobre los superficiales de que son menos visibles y que no ocupan espacio vertical, aunque tienen la desventaja que son propensos a sufrir fugas y filtrar contenido hacia el suelo.

2. ELEMENTOS DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO CILÍNDRICO VERTICAL PARA LÍQUIDOS A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

2.1. Cimiento

Este elemento tiene la función de soportar las cargas del tanque y distribuir las de la manera más uniforme posible sobre el suelo, para evitar asentamientos diferenciales indeseables. Brinda además una superficie uniforme desde donde realizar el montaje de la estructura del tanque, como también sirve de protección contra la humedad, ya que separa al tanque de la humedad del suelo.

2.1.1. Cimiento sobre terracería

Este consiste en una base de suelo que soporta el peso de la estructura del tanque y su contenido. Está hecho a base de suelo seleccionado cuidadosamente a manera de que este pueda soportar y distribuir satisfactoriamente las cargas del contenido con asentamientos admisibles, especialmente debajo de la pared del tanque, donde es probable que el asentamiento sea mayor. Tiene que proporcionar una superficie plana estable que soporte el tanque, como también un drenaje adecuado a través del cimiento.

2.1.2. Cimiento anular de concreto

Este cimiento consiste en un anillo de concreto reforzado con acero estructural, el cual sigue el perímetro del tanque, confinando el material de relleno dentro del mismo, formando una placa de suelo en estado de compresión triaxial. Este cimiento es utilizado cuando se considera que el suelo no será capaz de darle un soporte adecuado a la pared del tanque y su contenido. Los tanques de gran diámetro, especialmente los que tienen techos auto soportante, tienden a acumular cargas en la pared, lo que hace que el suelo no pueda soportar la pared solo por contacto directo.

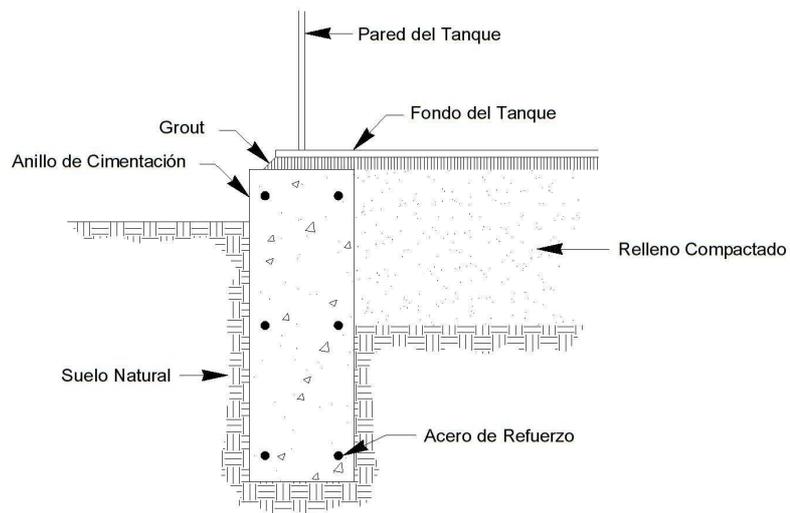
Un cimiento anular de concreto proporciona una buena distribución de las cargas del muro, como también una superficie sólida y nivelada que no se moverá durante la erección del tanque. El confinamiento del anillo minimiza la humedad por debajo del tanque al mismo tiempo que evita la erosión del material de relleno.

Figura 2. Refuerzo y formaleta de un anillo de cimentación



Fuente: fotografía tomada en Bioetanol, Escuintla, Guatemala.

Figura 3. Sección típica del anillo de cimentación



Fuente: elaboración propia.

2.1.3. Cimiento anular de grava y roca triturada

Este cimiento está formado por un anillo de grava y roca triturada de manera similar al anillo de concreto, teniendo características de desempeño similares, aunque no iguales. Sus prestaciones difieren en que el anillo de grava absorbe mejor los asentamientos diferenciales del suelo ya que es más flexible, pero es mucho más difícil de dejarla a nivel, dentro de tolerancias permisibles.

2.1.4. Cimiento de losa y pilotes

Este cimiento consta de una losa de concreto reforzado que es soportada por una área igual o más grande a la del fondo del tanque. Esta losa, a su vez, se puede apoyar sobre pilotes. La losa tiene que ser capaz de soportar todas las cargas impuestas por el tanque y transmitir las de manera satisfactoria al suelo.

Esta opción se utiliza cuando la capacidad de soporte del suelo requiere un área de soporte mayor que la del fondo del tanque, el suelo es propenso a asentamientos diferenciales, o sí, para soportar el tanque se tuviera que utilizar pilotes, ya sea por capacidad de carga o por el riesgo de licuefacción del suelo. La gran desventaja de esta opción es su costo, ya que implica una gran cantidad de materiales, como también de trabajo.

2.2. Anclajes

Los anclajes de un tanque consisten en varillas de acero fijadas al suelo o cemento, las cuales se fijan en silletas, que a su vez, se encuentran unidas a la pared del tanque. Estos tienen la finalidad de resistir las cargas que tienden a levantar el tanque, como también las fuerzas que pudieran tratar de deslizar el tanque lateralmente.

Figura 4. **Vista de anclajes y una conexión de tubería**



Fuente: fotografía tomada en Bioetanol, Escuintla, Guatemala.

Un tanque tiene que ser anclado si no cumple con ciertas características de estabilidad, pero no es imperativo que sea anclado, según el API 650, si cumple con márgenes de seguridad satisfactorios.

2.2.1. Anclaje por sismo

El tanque no es capaz de soportar por estabilidad propia el deslizamiento y/o volteo causado por la masa del contenido y la de su estructura siendo afectados por aceleraciones sísmicas.

2.2.2. Anclaje por viento

El tanque no es capaz de soportar por estabilidad propia el deslizamiento y/o volteo causado por la presión del viento siendo ejercida sobre la proyección de la pared y el techo.

2.2.3. Anclaje por riesgo de inundación

Si el sitio de erección del tanque presenta la posibilidad de que se inunde, implica el riesgo de que el tanque llegue a flotar y moverse de su sitio. Con el fin de contrarrestar este riesgo, se requieren anclajes para fijarlo al suelo y evitar movimientos del mismo.

2.2.4. Anclaje por requerimiento del propietario

El propietario del tanque puede llegar a requerir la implementación de anclajes por requerimientos propios, de seguridad y/o económicos. Los anclajes autorizados por el API 650 son los mencionados anteriormente, los cuales consisten en varillas de acero ancladas a silletas o cimiento.

2.3. Fondo

El fondo del tanque tiene la función de aislar el contenido del suelo que soporta el mismo, evitando filtraciones y pérdidas de líquido, así como contaminación del contenido por elementos del suelo y viceversa. Este elemento no es estructural, ya que el peso de la columna de líquido almacenado es resistido por una fuerza de igual magnitud proporcionada por el suelo, por lo que no requiere diseño directo.

El fondo comúnmente está formado por planchas de acero de forma rectangular, colocadas una a la par de las otras, alternando las juntas en un sentido, tapizando toda el área debajo del tanque. Estas planchas usualmente tienen un espesor mínimo de $\frac{1}{4}$ de pulgada, sin contar el espesor adicional por corrosión, ya que éstas están muy expuestas a los elementos corrosivos que el suelo pueda presentar. Estas planchas pueden ser unidas de dos maneras distintas, siendo las de unión traslapada y de soldadura a tope, cada una con sus ventajas y desventajas.

2.3.1. Unión traslapada

Esta distribución de planchas de fondo consiste en colocar las planchas a manera de que al elaborar el piso, parte de la plancha se traslape 1 pulgada como mínimo sobre las adyacentes, continuando la colocación de manera sucesiva. Posteriormente a la colocación, las planchas son unidas con soldadura de filete, asegurando un sello hermético.

Esta disposición tiene la ventaja de que es más económica, sencilla, y que se puede realizar con mayor rapidez. Tiene la desventaja de que su superficie es irregular, lo cual forma una superficie poco sanitaria, difícil de limpiar. Esto hace que no sea elegible para el almacenamiento de ciertos productos, que requieren altos índices de pureza y requerimientos sanitarios.

2.3.2. Unión a tope

Esta alternativa implica la colocación de las planchas una a la par de la otra con sus bordes unidos a tope ya sea por soldadura de penetración cuadrada o en V. Es deseable que la unión sea realizada con una plancha de acero delgada de respaldo, aunque no es indispensable.

Entre las ventajas que presenta es el hecho que su superficie es uniforme, lo cual facilita su limpieza e inspección, lo que la hace una disposición bastante sanitaria. Las desventajas serían el costo, el volumen de trabajo, y el tiempo de elaboración, ya que en contraste con la otra alternativa, es mucho más complicada.

2.4. Paredes

La pared del tanque es el elemento principal de su estructura. Esta tiene la función de confinar el contenido y de darle soporte y unidad a todas las demás partes que forman el tanque.

Figura 5. **Vista de la pared desde el interior de un tanque**



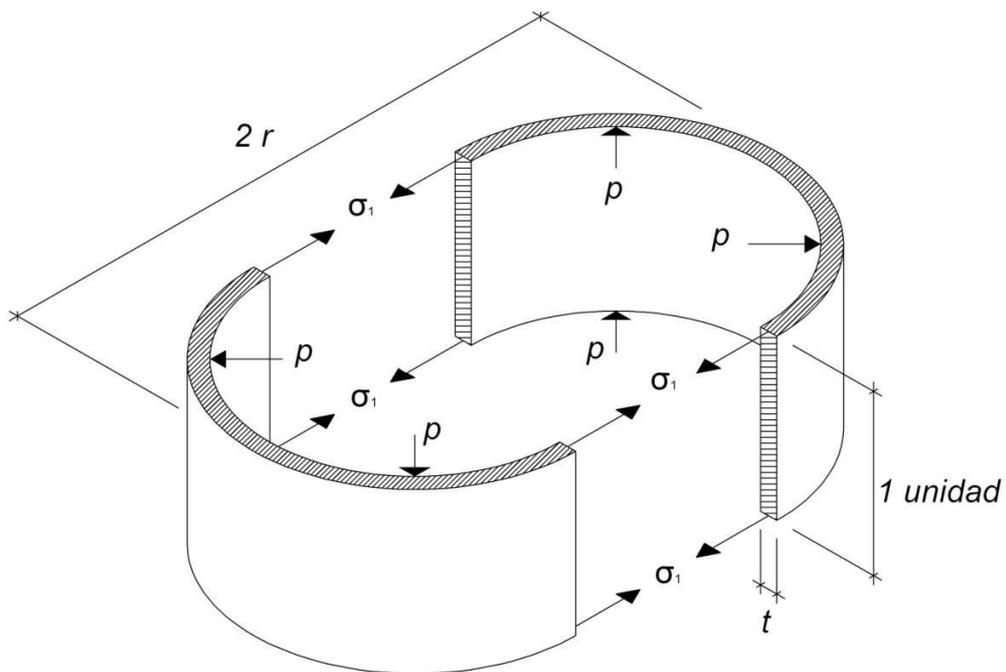
Fuente: fotografía tomada en Bioetanol, Escuintla, Guatemala.

La pared del tanque esta formada por planchas rectangulares de acero unidas en sucesión que constituyen anillos de tensión. El esfuerzo σ_1 en los anillos esta dado por la ecuación:

$$\sigma_1 = \frac{rp}{t}$$

Siendo r el radio del anillo, p la presión ejercida sobre la pared del anillo y t el espesor de la pared del anillo.

Figura 6. Diagrama de tensión en la pared de un cilindro



Fuente: elaboración propia.

Al incrementar la altura del fluido contenida dentro de un tanque, se incrementa la presión lateral ejercida en la pared, describiendo una distribución triangular de carga, siendo de mayor magnitud en su parte inferior. Mientras más altura tenga un tanque, mas presión ejercerá su contenido, por lo tanto, el esfuerzo en la pared será mayor. Para reducir el esfuerzo del material de la pared, es necesario incrementar el espesor del anillo. Esto implica anillos delgados en la parte de arriba de la pared, y más gruesos en su parte baja.

A causa que, un cambio gradual en el espesor de la pared sería muy complicado, el cambio en el espesor se realiza por medio de apilar anillos de placas sobre otros de mayor espesor, cada uno de estos será diseñado para la presión a la cual será sometido dependiendo de su profundidad. A su vez, la presión de cada uno será crítica en su parte más baja, lo cual implica que el diseño se hará basándose en esa presión, aunque la parte superior del mismo se encuentre menos esforzada.

Las planchas de los anillos deben tener sus juntas verticales alternadas en relación a las carreras inmediatamente superiores e inferiores, un mínimo de 5 veces el espesor de la placa más grande en el punto de la unión. Estas juntas deben de ser uniones soldadas de penetración total.

2.5. Techo

El techo de un tanque tiene el propósito de proteger el contenido de elementos tales como: lluvia, viento y sol. Estos pueden tener forma plana, cónica, o esferoidal. Estructuralmente pueden clasificarse como soportados, auto soportantes o flotantes.

La pendiente mínima aplicada al cono del techo recomendada por el estándar API 650 es del 6,25%, aunque es más recomendable una pendiente mayor, sin que sobrepase algunos límites particulares para tipos de techo específicos. De no tener pendiente, el techo tiene que ser proporcionado de medios alternos para drenar el agua de lluvia, tales como bombas.

Por lo general, los techos están formados por una estructura soportante y una capa no estructural de planchas de acero, las cuales forman la cubierta. Las placas del techo (excepto para techos auto soportados) tienen que tener un espesor mínimo de 3/16 de pulgada. Cualquier consideración por corrosión será añadida al espesor escogido o el espesor diseñado, de igual manera a los miembros estructurales.

De ser necesario, se requerirá un refuerzo de tensión en el anillo superior del tanque, el cual puede ser proporcionado por la inclusión de secciones adicionales de acero roladas al diámetro del anillo o planchas adicionales. Para la determinación del área seccional de tensión se puede considerar parte de la estructura de pared y techos, siempre que la unión entre la pared y el techo lo permita.

Existen varios tipos de techos utilizados comúnmente en la aplicación de tanques de almacenamiento. La selección del tipo depende de varios factores, tal como el costo, cuestiones de servicio, criterios sanitarios, proceso de elaboración, tiempo de erección, exposición al entorno y requerimientos por parte del cliente. Cada techo presenta características distintitas que pueden o no llenar los requisitos requeridos para un tanque de almacenamiento dado. Las opciones de techo consideradas por el estándar API 650 siguen a continuación, las cuales enumeran pero no limitan los tipos de techo posibles.

2.5.1. Techos cónicos soportados

Un techo cónico soportado es formado aproximadamente a la superficie de un cono recto, que es soportado principalmente por travesaños sobre vigas y columnas.

2.5.2. Techos auto soportados

Un techo cónico auto soportado es formado aproximadamente a la superficie de un cono recto, soportado solamente en su periferia, haciendo que la lámina de recubrimiento se soporte a sí misma, siendo la estructura en sí. Esta puede tener secciones que actúen como rigidizantes, como también un anillo de compresión en el centro del cono.

2.5.3. Techos de domo

Un techo de domo se forma aproximadamente a la superficie de una esfera o un elipsoide, siendo soportado solamente en su periferia.

2.5.4. Techos tipo sombrilla

Un techo de sombrilla es un domo auto soportante modificado, haciendo que cualquier sección horizontal del mismo sea formada por un polígono regular con tantos lados como placas que forman el techo, soportado solamente en su periferia.

2.5.5. Techos flotantes

Un techo flotante consta en un dispositivo que flota sobre el líquido contenido dentro del tanque, aislándolo de los elementos, inclusive del aire atmosférico. Este techo sube y baja dentro del tanque conforme lo hace el nivel del líquido contenido. Este dispositivo se utiliza cuando no se quiere utilizar un techo convencional o el líquido almacenado dentro del tanque es muy volátil o higroscópico, lo cual hace necesario que tenga un sello hermético que separe el contenido del tanque de la atmósfera. Esto hace que la emisión de vapor se lleve a un mínimo, lo cual hace esta opción deseable para evitar contaminación ambiental.

Un techo flotante se puede usar en sustitución de un techo convencional, o se puede usar en conjunto con un techo convencional. Este parámetro se establece a partir de los requerimientos de servicio al que estará sometido el tanque.

El techo flotante utiliza dispositivos que ejercen presión sobre el interior de las paredes del tanque, creando un sello hermético. Este sello puede ser creado por medio de la utilización de zapatas metálicas que resbalan sobre la superficie interior, como también con textiles flexibles que se amoldan al interior del tanque creando una junta hermética.

La flotabilidad del techo depende de su estructura, existiendo varios tipos de mecanismos de flotación. Entre las opciones usuales existen pontones, techos de balsa, con compartimientos estancos y de balsa de doble pared.

Existen dos tipos básicos de techos flotantes, los internos y los externos.

2.5.5.1. Internos

Estos techos son los que se utilizan en conjunto con un techo convencional. Solo tienen la finalidad de reducir el escape de vapores del contenido, ya que la protección contra los elementos atmosféricos la proporciona el techo convencional.

Para estos techos es deseable (aunque no indispensable) que el techo convencional no tenga columnas, ya que obstaculizan la colocación, los sellos y movimiento del techo flotante. Existe la opción de colocar sellos deslizantes alrededor de las columnas, similares a los que se encuentran en el perímetro del tanque, pero hacen que el sistema sea más complicado y por lo tanto, más caro y propenso a fallas.

2.5.5.2. Externos

Similar al interno, excepto que este se utiliza en vez de un techo convencional. Este, a causa de su exposición directa a los elementos, tiene que tener la capacidad de soportarlos, a diferencia del techo interno que está protegido por el techo convencional. Esta opción debe estar dotada de una bomba de achique que bombee afuera del tanque el agua de lluvia acumulada sobre el techo, por medio de una manguera o medio similar. Por lo general, se especifica que adicionalmente a los mecanismos de drenaje, tenga la capacidad de soportar una acumulación de agua de lluvia moderada, en el caso de que los mecanismos de bombeo llegasen a fallar.

Figura 7. Techo convencional



Fuente: fotografía tomada en Bioetanol, Escuintla, Guatemala.

2.6. Aperturas y conexiones

Todo tanque tiene que tener accesos a su interior así como entradas y salidas para su contenido. Estas consisten en entradas suficientemente grandes para el paso de personas, así también como aperturas más pequeñas utilizadas para el ingreso y extracción de contenido, para la toma de muestras, ventilación y control.

2.6.1. Pasos de hombre

Son aperturas de alrededor de 2 pies de diámetro con la función de permitir el ingreso y el egreso de una persona al interior del tanque para realizar trabajos de índole variada, tales como labores constructivas, inspección, reparación y mantenimiento. El paso posee un cuello alrededor de la apertura y una brida en su otro extremo, en donde se atornilla una tapadera y un empaque que sellan el acceso herméticamente. Existen dos tipos de pasos de hombre, los de techo y los de pared, aunque de aspecto similar, tienen algunas diferencias a causa de su posición en el tanque y a la presión a la que están sometidos.

2.6.1.1. Pasos de techo

Se encuentran en el techo del tanque, su cuello esta sesgado con el propósito de que la tapadera y el reborde que la soportan queden horizontales. Estos pueden ser circulares o cuadrados, dependiendo de los requerimientos del tanque. Como no resisten cargas, son elaborados a partir de láminas delgadas, a diferencia de los de paso de pared.

Figura 8. Paso de hombre de techo

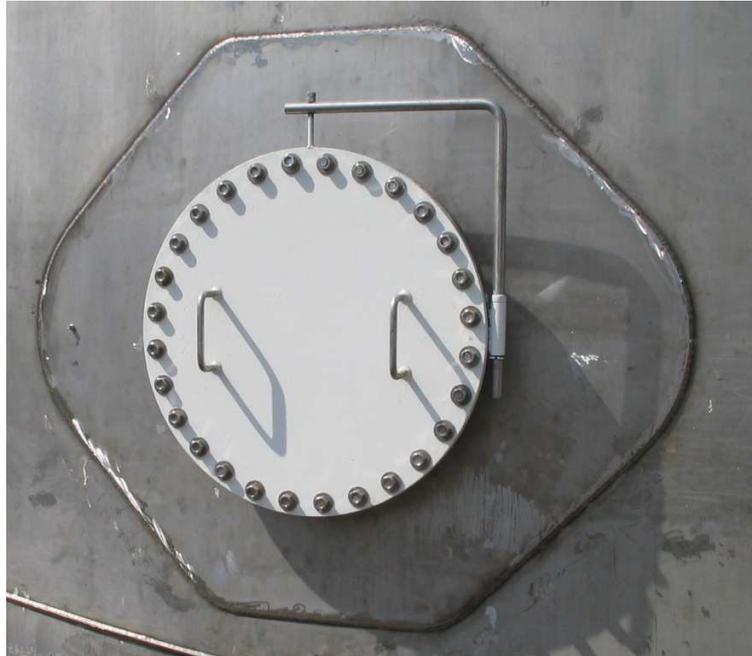


Fuente: fotografía tomada en Bioetanol, Escuintla, Guatemala.

2.6.1.2. Pasos de pared

Estos se encuentran en la pared del tanque cerca del suelo. A causa de su posición estos tienen que estar diseñados para resistir la presión hidrostática del contenido, por lo que su construcción es más robusta que la de los pasos de techo. Estos adicionalmente tienen una lámina alrededor de la apertura para reforzar la pared. Adicionalmente, son proporcionados con un dispositivo para detectar fugas (*tell hole*).

Figura 9. **Paso de hombre de pared**



Fuente: fotografía tomada en Bioetanol, Escuintla, Guatemala.

2.7. Ventilaciones

Su función es liberar las presiones que se pueden desarrollar adentro del tanque. Dependiendo de su comportamiento, se definen en dos tipos, las activas y las pasivas. Estas están normadas por el estándar API 2000.

2.7.1. Pasivas

Estas permiten el flujo de aire libremente desde el interior del tanque hacia el exterior y viceversa. Son aperturas sencillas que pueden tener un codo para no permitir el ingreso de agua de lluvia al interior del tanque.

2.7.2. Activas

Estas permiten el flujo de aire en una sola dirección ya sea del exterior hacia el interior o al contrario. También existen algunas que liberan presión sólo si estas llegan a un nivel determinado, de lo contrario se mantienen selladas. Estas tienen la función de reducir escapes de vapor del contenido sin crear presiones internas que puedan llegar a dañar el tanque, manteniendo a un mínimo el flujo de gases en ambas direcciones entre el tanque y la atmósfera.

2.8. Conexiones

Son boquillas colocadas en varias partes del tanque con el propósito de permitir el flujo del contenido u objetos en ambos sentidos. Estas conexiones, dependiendo de su propósito, pueden estar colocadas en el techo, pared o fondo del tanque. Estas deben estar diseñadas a manera de asegurar su hermeticidad y mantener la integridad estructural del elemento que perforan, así como también de soportar la presión a la cual podrían estar sometidas.

3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

3.1. Contenido

El contenido del tanque es parte fundamental de su diseño, ya que rige gran parte de los parámetros utilizados para ello.

3.1.1. Peso propio del contenido

El peso del contenido afecta directamente el diseño de la pared del tanque y la capacidad de almacenamiento del mismo. También afecta el cimiento, ya que este tiene que ser capaz de soportar las cargas verticales y laterales que el contenido puede ejercer sobre el suelo.

Usualmente el peso del contenido se maneja como un peso relativo en función al peso del agua. Los líquidos más livianos oscilan entre 0,7 y los más pesados en alrededor de 1,5 en pesos relativos al del agua.

Tabla I. **Pesos y gravedades específicas de algunos líquidos**

Líquido	Peso	Gravedad Específica
	Lbs / Pie ³	
Alcohol al 100%	49	0,79
Ácido muriático al 40%	75	1,2
Ácido nítrico al 98%	94	1,5
Ácido sulfúrico al 87%	112	1,8
Soda caústica al 66%	106	1,7
Aceite vegetal	58	0,91-0,94
Aceite mineral	57	0,90-0,93
Agua a 4°C. (Máxima Densidad)	62,428	1,00
Agua a 100°C.	59,83	0,9584
Agua de mar	64	1,02-1,03
Petróleo	54	0,87
Petróleo refinado	50	0,79-0,82
Benzeno	46	0,73-0,75
Gasolina	42	0,66-0,69

Fuente: elaboración propia.

La pared del tanque se ve afectada directamente por el peso del contenido, ya que un líquido más pesado ejercerá más presión que uno más liviano, para una columna de la misma altura. Es de esperarse que un tanque de contenido más pesado tenga paredes más gruesas que uno de contenido liviano, para una misma altura de almacenaje.

La capacidad del tanque se establece en parte por el peso propio del contenido, ya que establece la columna máxima de líquido que el tanque puede soportar, en relación a la capacidad de soporte del suelo. Un líquido más liviano ejercerá menos carga distribuida sobre el suelo, significando que su altura dentro del tanque puede ser más alta, llevando a una mayor capacidad para un diámetro establecido.

Es probable que adicionalmente a las cargas del peso propio del contenido exista la necesidad de considerar un contenido de agua en el diseño. Esto se debe a que durante las pruebas preliminares del tanque, se realiza una prueba hidrostática para cerciorarse del funcionamiento del tanque, su integridad y la de sus juntas. Pero como esta prueba es de duración corta en relación con los períodos de carga de servicio, se realizan algunas concesiones al considerar agua como contenido cuando el tanque no tiene el propósito de almacenar ésta.

3.1.2. Naturaleza del contenido

La naturaleza del contenido afecta al diseño en el sentido que determina características del tanque, tales como el techo y los materiales a partir de los cuales se elaborará el tanque.

Un líquido altamente volátil o higroscópico necesitará un techo flotante o que se le proporcionen de dispositivos que regulen el intercambio de gases con el ambiente. La situación es igual con contenidos inflamables, los cuales se requieren que tengan poca exposición al entorno por el riesgo de fuego.

Otro factor que afecta es la capacidad del contenido de corroer y/o dañar el tanque y sus estructuras. Para contrarrestar el daño, usualmente se requiere que se provea a las estructuras del tanque de un espesor extra, el cual se supone que se corroerá pero que el material necesario para ejercer su función quedará intacto, sin alterar las funciones del tanque. Existen otras formas de protección del tanque para contenidos corrosivos, pero no afectan tanto el diseño del tanque, sino cuestiones de servicio.

3.2. Materiales

Entre los distintos materiales constructivos del tanque existen varios tipos de aceros al carbón, como también aceros inoxidable. Cada material de estos tiene una resistencia distinta a los esfuerzos, por lo que la selección del material afectará al diseño.

La resistencia del material afecta primordialmente al espesor de las paredes. Esto sucede a causa de que un acero con un esfuerzo permisible menor, tendrá que ser más grueso que uno de mayor resistencia para resistir las mismas cargas. La selección del material para el tanque es poco probable que se establezca basándose en resistencia de un acero en particular, sino que se realiza por la facilidad de obtención del material, por lo que es común que los tanques sean realizados en aceros comunes de resistencia relativamente baja.

El acero inoxidable se utiliza cuando se necesita que el tanque sea extremadamente sanitario y que tenga muy poca interacción con el contenido. Este acero tiene el beneficio adicional que como teóricamente no se corroe, no es necesario aplicarles factores de engrosamiento por corrosión. Esto hace que el diseño no le aplique factores de reducción. El inconveniente con este acero es que su precio es alto, por lo que puede llegar a ser prohibitivo para tanques de tamaño considerable. Entre otros inconvenientes figuran que su soldadura es más laboriosa, y las secciones roladas en este acero son casi inexistentes y no es factible mezclar piezas de acero al carbón con inoxidable, ya que se puede presentar corrosión por la creación de un par galvánico.

3.3. Capacidad

Usualmente se establece en unidades de volumen, tales como galones, litros o barriles, aunque también se puede especificar en peso para un líquido previamente establecido. Este es el parámetro fundamental de diseño, ya que todos los demás elementos dependen de este. La capacidad es función de la altura y del diámetro del tanque, descrito por la ecuación del volumen del un cilindro:

$$V = \frac{h\pi d^2}{4}$$

Siendo h la altura de la columna del líquido y d el diámetro.

Al calcular las dimensiones del tanque con base en su capacidad, existe la necesidad de considerar una altura adicional, con el propósito de acomodar la posibilidad de una capacidad de reserva, como también la de accesorios tales como techos flotantes. Un techo flotante o las vigas de un techo convencional, de no ser consideradas, pueden llegar a restarle volumen al tanque, ya que le restaran altura a la columna del líquido almacenado. Es por ello que es práctico considerar una altura o diámetro adicional, para incrementar el volumen del tanque y que pueda llegar a acomodar estos aspectos sin alterar la capacidad requerida.

3.4. Suelo

Este aspecto tiene mucha importancia para el diseño del tanque ya que limita sus dimensiones verticalmente y establece el cimiento que se necesitará.

3.4.1. Estudio de suelos

El estudio de suelos tiene que explicar las condiciones del subsuelo, como también su capacidad de soporte y los asentamientos que se puedan presentar a causa de la carga del tanque, a corto y largo plazo. Esta información por lo general, se obtiene a partir de perforaciones, pruebas de carga, pruebas de laboratorio y el análisis por un ingeniero geotécnico.

Los parámetros obtenidos a partir del estudio de suelo que tienen mayor importancia son la capacidad de soporte, ángulo de fricción interna del suelo, los asentamientos probables y las condiciones especiales, tales como el peligro de licuefacción.

3.4.1.1. Capacidad de soporte

Es la fuerza aplicable por área, usualmente dada en unidades de presión tales como kips por pie cuadrado, o toneladas por metro cuadrado. Esta carga producirá asentamientos, pero estos también tienen que estar especificados en el estudio de suelos.

3.4.1.2. Ángulo de fricción interna

Se utiliza para obtener el K_a y el K_p del suelo (coeficiente de presión activa y el coeficiente de presión pasiva, respectivamente). A partir de estos se puede estimar el comportamiento de las presiones laterales del suelo.

3.4.1.3. Asentamientos

Bajo las cargas de servicio del contenido, el tanque ejercerá una gran presión sobre el suelo, consolidándolo, lo cual producirá asentamientos. Estos asentamientos tienen que estar en un rango permisible, a manera que no le causen esfuerzos adicionales al tanque o a sus accesorios o le reste funcionalidad al conjunto. En el caso que se predigan grandes asentamientos, el estudio de suelos tiene que dar una estimación de la magnitud, pudiéndose aplicar las previsiones necesarias al diseño del tanque para contrarrestar los asentamientos.

3.4.1.4. Condiciones especiales

Entre las condiciones especiales figuran cuestiones particulares del suelo en el sitio que albergará al tanque. Entre estas se pueden enumerar tanques en laderas, peligro de licuefacción del suelo, suelos muy arcillosos o muy compresibles y tanques adyacentes a masas de agua o edificaciones. El estudio de suelos tendrá que determinar estas situaciones y recomendar las acciones a tomar.

3.5. Cargas

Son todas las fuerzas externas o internas que afectan la estructura del tanque, causando esfuerzo en sus elementos. El tanque ha de ser diseñado para que pueda resistirlas satisfactoriamente, con márgenes aceptables de seguridad.

3.5.1. Carga muerta

La carga muerta considerada en los tanques es el peso propio de todos los elementos estructurales. Esto incluye el techo, las paredes, y cualquier otro accesorio que se encuentre fijo a la estructura, tal como escaleras, válvulas y similares.

Es importante que a causa de la naturaleza de desgaste que pueden tener los tanques, en algunos casos sea requerido que se calcule el peso estructural con las admisiones de corrosión y sin ellas. Esto se debe a que en algunos casos estas pueden dar estabilidad, pero en otros no, y por lo tanto, se tienen que considerar ambos extremos de carga.

3.5.2. Carga viva

La carga viva que se considera es aplicada en los techos de los tanques. El estándar API 650, por ejemplo, especifica una carga distribuida mínima de 25 PSF, aunque puede variar dependiendo del código utilizado, o por requerimientos del cliente.

3.5.3. Carga hidrostática

A causa de la naturaleza de los líquidos, estos ejercen presiones de manera horizontal como vertical, por lo que hay que considerarlos y determinar los esfuerzos que estas presiones causan.

3.5.3.1. Presión vertical

Esta es la que se ejerce sobre el suelo a causa del peso de la columna de líquido que yace sobre este. Esta carga es de magnitud proporcional a la altura de líquido contenido en el tanque, como también lo es del peso específico del mismo.

3.5.3.2. Presión horizontal

Es ejercida sobre las paredes del tanque y al igual que la presión vertical depende del peso del líquido y la profundidad de este al punto de diseño. Esta presión varía a lo largo de la altura de la pared del tanque, por lo que el diseño requiere varios puntos de referencia.

3.5.4. Viento

Este afecta al tanque en la proyección de su área lateral en la forma de presión horizontal. Esta carga por lo general se considera como la presión causada por un viento de 100 MPH, pero puede variar dependiendo de la exposición del tanque y de la velocidad promedio del lugar y/o el código utilizado. El viento presenta la posibilidad de deslizar el tanque horizontalmente y/o de producirle un momento de volteo, especialmente cuando este se encuentra vacío. Esto sucede a causa de que el contenido del tanque tiende a estabilizarlo bajo cargas laterales externas, dándole mayor resistencia a las mismas. Es por ello que para el diseño del tanque bajo cargas de viento, es necesario considerar el tanque bajo condiciones críticas, que sería sin contenido.

3.5.5. Sismo

El sismo es la aceleración horizontal de la masa del tanque y su contenido a causa de fuerzas geotécnicas. El sismo afecta todas las estructuras del tanque, pero primordialmente la pared del tanque. El contenido del tanque también es afectado, ya que durante un evento de sismo, éste puede llegar a oscilar periódicamente en el interior del tanque, en un modo de vaivén, causando empujes adicionales a la pared del tanque.

Al igual que el viento, el sismo presenta la posibilidad de deslizar el tanque horizontalmente y de producirle un momento de volteo, pero a diferencia del viento, el sismo es crítico cuando el tanque está lleno. La condición del tanque bajo capacidad máxima es la que producirá cargas críticas, por lo que esta condición es la utilizada para el diseño.

3.6. Corrosión permisible

Los tanques de almacenamiento superficiales a causa de su contacto directo con su contenido, el suelo y los elementos atmosféricos, se hallan sometidos a grandes efectos corrosivos. A causa de esto, es común que se especifique un sobre espesor en todos sus elementos, con el fin de tener un porcentaje del material del tanque que puede perderse a la corrosión. Este material será prescindible, ya que la estructura del tanque tiene que ser capaz de cumplir su función satisfactoriamente y con seguridad sin este material. Es conocido como CA por sus siglas en inglés (*corrosion allowance*).

La cantidad de material adicional que se especifica con el fin de tener una reserva permisible de corrosión, depende principalmente de las condiciones del entorno, la naturaleza del contenido, el mantenimiento del tanque, las previsiones que se tomarán, criterios de protección y las especificaciones del cliente. Estas tienen que ser estudiadas y evaluadas y posteriormente aplicadas al diseño.

De ser necesaria esta protección, el cliente deberá especificar la magnitud de este sobre espesor por corrosión. Este será aplicado a cada anillo de la pared del tanque, al fondo, techo, boquillas, conexiones, pasos de hombre y miembros estructurales.

4. CONSIDERACIONES DE SERVICIO

4.1. Función

La función del tanque establece criterios aplicables a varios aspectos del tanque. Estos parámetros aplican criterios tales como el tiempo de vida del tanque, el propósito del contenido a almacenar, y posibles cambios de contenido a almacenar.

4.2. Aspectos ambientales y de desastres

A causa del incremento en los niveles de seguridad ambiental se deben proporcionar a los tanques medidas de reducción de daño al ambiente y de prevención de desastres, a manera que al establecer un tanque este no presente un peligro de ningún tipo para el sitio. Estos aspectos no intervienen directamente con el diseño del tanque, pero podrían llegar a afectarlo de manera indirecta, por lo tanto deben de ser considerados.

4.2.1. Contenedores secundarios

Estos son recipientes que se construyen alrededor del tanque con el propósito de almacenar provisionalmente el contenido del tanque en el caso de que este falle de alguna manera y derrame su contenido. El contenido derramado debe de ser almacenado en el recipiente secundario, de manera que ya con el derrame contenido dentro de este contenedor, se puedan tomar decisiones sobre las acciones a tomar con el derrame.

Existen varios tipos de contenedores secundarios, entre los cuales destacan los montículos de tierra alrededor del tanque, muros de concreto o mampostería y tanques con doble muro. Estos deben almacenar un volumen igual a la capacidad máxima del tanque, y es común que se le incluya un volumen adicional, en caso de que hubiese agua almacenada en el recipiente previamente al derrame.

Se deben tener consideraciones especiales con estos recipientes, ya que tienden a captar agua de lluvia y se deben tener métodos para drenar el agua, sin que estos permitan fugas del contenido derramado del tanque.

4.2.2. Lavado de agua de lluvia

El agua que se capta alrededor de un tanque o dentro de un contenedor secundario, puede llegar a absorber pequeñas cantidades del contenido del tanque, especialmente si este tiene fugas menores. En ciertas ocasiones, se exige al cliente que se cerciore que al desaguar el agua de lluvia, esta no tenga rastros del producto, especialmente cuando se almacenan hidrocarburos.

El procedimiento de limpieza se puede realizar por medio de separadores de líquidos. Estos almacenan el agua de lluvia, y a causa de las densidades distintas de los fluidos, estos se separan. Posteriormente se recoge el producto y se drena el agua de lluvia.

4.2.3. Reducción de emisiones

Este factor implica que se instalen válvulas o artefactos equivalentes que regulen el egreso de los vapores del tanque hacia la atmósfera. Se deben tomar en cuenta especialmente cuando el tanque almacena hidrocarburos o similares.

4.2.4. Red contra incendios

En los casos en que el contenido almacenado sea altamente inflamable, el tanque debe de ser proporcionado de un sistema de protección y mitigación de fuego, el cual debe operar y estar disponible todo el tiempo durante la vida útil del depósito. Este sistema debe ser diseñado para que pueda sofocar satisfactoriamente un incendio, en caso de que este llegara a ocurrir.

4.2.5. Techo frangible

A petición del cliente, la unión entre el techo y la pared del tanque puede ser frangible, es decir que falle antes que los demás elementos del tanque cuando exista una acumulación excesiva de presión dentro del tanque. Esta opción no debe ser utilizada en vez de ventilaciones convencionales, sino que debe ser aplicada como una medida de prevención. Este mecanismo no puede ser aplicado tampoco a todos los tipos de techos, ya que algunos requieren una junta fuerte entre el techo y la pared del tanque, tales como los techos auto soportados, por lo que restringe el número de opciones viables de techos.

4.3. Protección y mantenimiento

Para permitir que el tanque pueda cumplir con su vida útil de manera satisfactoria, cumpliendo con sus requerimientos, es necesario proporcionarlo de mecanismos de protección contra las adversidades y llevar un mantenimiento periódico sobre el mismo. Esto garantiza que el tanque mantenga un funcionamiento adecuado y que pueda durar el tiempo para el que fue diseñado.

Entre los aspectos de protección que se destacan son la protección catódica, recubrimientos especiales y pintura común o epóxica. Éstos protegen los elementos del tanque de las fuerzas corrosivas ambientales.

Es importante definir con el cliente la protección que se proporcionará al tanque y el mantenimiento de ésta. El cliente deberá establecer estos parámetros basándose en la función que le planea dar al tanque, aunque cabe que el diseñador recomiende el procedimiento a seguir según lo que se crea necesario.

5. GUÍA PRÁCTICA DE DISEÑO

A continuación, se presenta una serie de pasos a seguir para el diseño de un tanque atmosférico según el estándar API 650. Para fines de demostración teóricos se empleará el siguiente ejemplo de un tanque de almacenamiento cilíndrico vertical.

5.1. Especificaciones preliminares

Como primer punto, se debe contar con la información previa necesaria para poder realizar el diseño del tanque, utilizando el método y procedimientos dados por el estándar API 650. Para el tanque en estudio, se tienen resumidas en la tabla No. 2 las siguientes especificaciones preliminares de diseño, las cuales fueron obtenidas y definidas previo al inicio del diseño por el cliente y el diseñador.

Tabla II. Datos preliminares de diseño

CONCEPTO	DATOS
A. Materiales	
Acero estructural	A36M $f_y = 36$ KSI
Concreto	$f'_c = 4$ KSI
Acero de refuerzo	Grado 60 $f_y = 60$ KSI
Tamaño de planchas de acero	4,6 ó 8 x 20 pies
B. Contenido	
Líquido almacenado	Etanol de alto grado al 95%
Gravedad específica	0,79
Peso específico	0,049 K/Pie ³
Capacidad	2 400 000 gal (320 856 Pies ³)
C. Suelo	
Condiciones del suelo	Suelo duro y denso
Peligro de licuefacción	No
Estratos altamente compresibles	No
Capacidad de soporte	2,5 KSF
Incremento a cargas temporales	33%
Coeficiente de presión activa (Ka)	0,3
Coeficiente presión pasiva (Kp)	3,00
Peso del suelo	0,100 K/Pie ³
Condiciones químicas del suelo	Beningnas
D. Entorno	
Precipitación pluvial	Moderada
Sismo	Alto (Zona 4)
Viento	100 MPH
E. Corrosión Permisible	
Espesor del sobre ancho	1/16"

Fuente: elaboración propia.

5.2. Elección de elementos

Con base en las especificaciones preliminares, se puede realizar una selección de elementos estructurales, basándose en la necesidad y practicidad de los mismos. Esto rige algunos factores de diseño y determina la topología de los mismos, lo que provee una propuesta de diseño, que deberá ser comprobada posteriormente por medio de cálculos.

5.2.1. Fondo

A causa que el alcohol de alto grado requiere condiciones sanitarias bastante altas ya que este podrá ser utilizado para consumo humano, el tipo de fondo a utilizar será el de planchas a tope, ya que este proporciona una superficie más adecuada para este propósito.

5.2.2. Techo

Tomando en cuenta la alta volatilidad del contenido y sus propiedades higroscópicas, se deberá colocar un techo flotante en el tanque para asegurar que no se pierda contenido al aire ni que este absorba agua del mismo. A causa de las posibles condiciones climatológicas, especialmente la lluvia, se deberá tener un techo convencional que proteja el techo flotante. La combinación de los dos techos implica que es preferible no tener columnas internas, por lo que se seleccionará un techo soportado sin columnas. Se elegirá la opción de un techo soportado por armaduras, ya que es una opción práctica dadas las dimensiones y capacidad del tanque.

5.2.3. Cimiento

Según los datos obtenidos por en el estudio de suelo, el suelo no presenta peligro de licuefacción ni peligro de asentamiento excesivos, por lo que se descarta la opción de una losa con pilotes. Considerando la practicidad de las demás opciones, se escoge la del cimiento anular de concreto. Esto es a causa de que se espera que las paredes del tanque transmitan cargas considerables al suelo debido a que el techo será soportado por armaduras, las cuales se apoyaran en su totalidad en la pared, por lo que es apropiado tener un cimiento que distribuya de forma adecuada este peso.

5.3. Dimensiones del tanque

La capacidad nominal del tanque debe de ser de 2 400 000 galones de etanol de alto grado, teniendo que dimensionar el tanque para acomodar una cifra que se encuentre cercana a este volumen, ya sea ligeramente inferior o superior a esta, pero de preferencia superior. Para ello, hay que dimensionar el tanque verticalmente, en relación con la capacidad de soporte del suelo, y horizontalmente, es decir su diámetro.

5.3.1. Determinar la altura de la columna de líquido

La capacidad de soporte para cargas de servicio del suelo dada por el estudio de suelos es de 2,5 KSF. Se debe suponer que la columna de líquido ejercerá una presión uniforme sobre el suelo, pero no debe de sobrepasar esta capacidad, además de dejar un margen que pueda soportar las paredes, techos, y posibles cargas momentáneas.

Además, es útil tratar que esta altura también sea un módulo del tamaño de las planchas de acero de las cuales se tiene disponibilidad, así no se requerirá cortar longitudinalmente planchas

Suponiendo una presión vertical máxima admisible ejercida por el líquido sobre el suelo de 2,0 KSF y utilizando la ecuación de presión del líquido, se tiene:

$$\sigma_v = \gamma h$$

Despejando para h y sustituyendo:

$$h = \frac{\sigma_v}{\gamma}$$

$$\frac{2,0KSF}{0,0495K / Pie^3} = 40,40Pies$$

Lo cual establece una altura aproximada de 40 pies, la cual puede ser modulada con 5 carreras de planchas de 8 pies de altura.

5.3.2. Determinar el diámetro del tanque

Ya con una altura propuesta, se procede a definir el diámetro del tanque, el cuál puede tener cualquier diámetro, pero es recomendable que su circunferencia, sea un módulo de la longitud de las planchas de acero de las cuales se tiene disponibilidad, las cuales en este caso son de 20 pies.

Utilizando la ecuación de volumen del cilindro despejada para el diámetro y sustituyendo:

$$\sqrt{\frac{4(320,856Pies^3)}{\pi(40Pies)}} = 101,06Pies$$

Obtenemos un diámetro de 101,06 pies. La circunferencia (C) de este diámetro es igual a 317,49 pies. El módulo de 20 pies que más se aproxima por arriba a esta cifra es de 320 pies, por lo que se recalcula el diámetro a 101,85 pies en base en esta circunferencia.

5.3.3. Establecer dimensiones y capacidad finales

Para la altura y diámetros establecidos previamente se recalcula el volumen, el cual es de 325 949 pies³, o de 2 438 100 galones. La diferencia entre la capacidad nominal y la efectiva (en este caso de un 1,5 %) debe de ser evaluada por el cliente para su aceptación. De lo contrario se debe de buscar nuevas dimensiones para acomodarse a los criterios y necesidades del cliente.

En lo que a la altura del tanque respecta, la altura establecida previamente da cabida al contenido, pero no al techo de armaduras ni al flotante. Por lo tanto se debe añadir una altura suplementaria al tanque, la cual será de 6 pies (suponiendo 2 pies para el techo flotante y 4 pies para las armaduras del techo, incluyendo holguras y espacios libres).

5.4. Diseño de las paredes

El API 650 requiere que el espesor de las paredes del tanque sea el mayor de los espesores de diseño incluyendo las permisiones por corrosión, o del espesor por la prueba hidrostática, pero no pueden ser menores que los valores contenido en la tabla III.

Tabla III. **Espesores de pared mínimos según diámetro**

Diámetro nominal del tanque	Espesor nominal de planchas
Pies	Pulgadas
< 50	3/16
50 a < 120	1/4
120 a 200	5/16
> 200	3/8

Fuente: elaboración propia.

Para el diseño de las paredes el API 650 permite tres métodos, los cuales son: método de 1 pie, método de punto variable y el de análisis elástico. Por su practicidad, se utilizará el método de un pie, el cual calcula el espesor requerido 1 pie arriba de la parte más baja de cada anillo de placas de la pared del tanque.

El espesor mínimo requerido del anillo será el máximo de los valores calculados por las siguientes fórmulas:

Para la prueba de diseño:

$$t_d = \frac{2,6D(H-1)G}{S_d} + CA$$

Para la prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{2,6D(H-1)}{S_t}$$

Siendo:

t_d = espesor de diseño en pulgadas

t_t = espesor de la prueba hidrostática en pulgadas

D = diámetro nominal del tanque en pies

H = altura de diseño en pies, desde el fondo del anillo bajo consideración a nivel de servicio del líquido almacenado

G = gravedad específica del líquido

CA = espesor de la corrosión permisible en pulgadas

S_d = esfuerzo permisible para la condición de diseño en PSI

S_t = esfuerzo permisible para la condición de la prueba hidrostática PSI

Tabla IV. Esfuerzos de resistencia máximos de algunos tipos de aceros

Especificación de plancha	Grado	Esfuerzo mínimo de fluencia psi	Esfuerzo mínimo de tensión psi	Esfuerzo de diseño de producto psi	Esfuerzo de prueba hidrostática psi
A 283	C	30 000	55 000	20 000	22 500
A 285	C	30 000	55 000	20 000	22 500
A 131	A, B, CS	34 000	58 000	22 700	24 900
A 36	--	36 000	58 000	23 200	24 900
A 131	EH 36	51 000	71 000	28 400	30 400
A 573	58	32 000	58 000	21 300	24 000
A 573	65	35 000	65 000	23 300	26 300
A 573	70	42 000	70 000	28 000	30 000
A 516	55	30 000	55 000	20 000	22 500
A 516	60	32 000	60 000	21 300	24 000
A 516	65	35 000	65 000	23 300	26 300
A 516	70	38 000	70 000	25 300	28 500
A 662	B	40 000	65 000	26 000	27 900
A 662	C	43 000	70 000	28 000	30 000
A 537	1	50 000	70 000	28 000	30 000
A 537	2	60 000	80 000	32 000	34 300
A 633	C, D	50 000	70 000	28 000	30 000
A 678	A	50 000	70 000	28 000	30 000
A 678	B	60 000	80 000	32 000	34 300
A 737	B	50 000	70 000	28 000	30 000
A 841	Clase 1	50 000	70 000	28 000	30 000

Fuente: elaboración propia.

Procediendo a calcular, utilizando las dimensiones y los esfuerzos especificados en la tabla IV para el acero A36, se calcula el primer anillo de 8 pies desde arriba hacia abajo, es decir el anillo más cercano a la superficie del líquido.

Por diseño:

$$0,125 p l g = \frac{2,6(101,85 \text{ pies})(8 \text{ pies} - 1 \text{ pie})(0,79)}{23200 \text{ psi}} + 1/16 p l g$$

Por prueba hidrostática:

$$0,0744 \text{ plg} = \frac{2,6(101,85 \text{ pies})(8 \text{ pies} - 1 \text{ pie})}{24900 \text{ psi}}$$

De estos cálculos se tiene que el espesor mayor es de 0,125 pulgada, pero como el valor correspondiente según el diámetro dado por la tabla de espesores mínimos para un tanque de este diámetro es de ¼ de pulgada, por lo tanto, se usará este último.

Repitiendo el procedimiento para las demás carreras se obtienen los siguientes espesores:

Tabla V. **Resumen de espesores de pared del tanque**

Carrera de anillo	Alto de anillo	Profundidad del fondo del anillo	Espesor de planchas
	Pies	Pies	Pulgadas
1	6	0	1/4
2	8	8	1/4
3	8	16	1/4
4	8	24	5/16
5	8	32	3/8
6	8	40	7/16

Fuente: elaboración propia.

La primera carrera, ya que no está diseñada para soportar esfuerzos causados por el contenido del tanque, su espesor es el mínimo permitido, ¼ de pulgada.

Además se determina el peso de las paredes con el sobre ancho de corrosión, sin este sobre ancho y la altura del centroide de las paredes del tanque.

Estos fueron calculados como:

Tabla VI. **Peso de la pared del tanque**

Concepto	Valor	Unidad
Peso de paredes sin CA	151,9	Kips
Peso de paredes con CA	189,5	Kips
Altura del centroide de pared	20,17	Pies

Fuente: elaboración propia.

5.5. Diseño del fondo

El fondo del tanque no requiere diseño directo, pero se debe establecer su espesor según las condiciones a las cuales estará sometido. Según el estudio de suelos, el suelo no presenta riesgos especiales de corrosión, por lo que se prevé condiciones de desgaste normales. El estándar API 650 especifica en espesor mínimo para las planchas de fondo de $\frac{1}{4}$ de pulgada. Utilizando este espesor mínimo le sumamos el espesor por corrosión en ambas caras de las planchas, sumando un espesor de $\frac{3}{8}$ de pulgada.

Adicionalmente, se determina el peso del fondo por métodos geométricos con y sin la protección por corrosión. Los pesos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Peso del fondo del tanque**

Concepto	Valor	Unidad
Peso del fondo con CA	125	Kips
Peso del fondo sin CA	83	Kips

Fuente: elaboración propia.

5.6. Diseño del techo

Para el diseño del techo se realizará el tipo convencional ya que es el que más demanda presenta en el mercado, por ser el más económico y práctico.

5.6.1. Techo convencional

El techo principal será elaborado a partir de armaduras con vigas radiales, cubiertas de planchas de acero. El estándar API 650 dicta que el espesor mínimo de las planchas de techo deberá ser de 3/16 de pulgada, sin contar cualquier sobre ancho por corrosión. Basando el diseño del acero en las luces que tendrá que salvar esta lámina y las cargas aplicadas a ella, suponemos satisfactorio un espesor de lámina de 3/16. Adicionalmente, se le aplica el espesor por corrosión de 1/16 de pulgada, lo que suma un espesor de ¼ de pulgada.

La estructura del techo deberá soportar cualquier carga muerta que pueda tener el mismo techo, más una carga mínima uniformemente distribuida de 25 PSF sobre el área de proyección del techo. Las planchas de techo, armaduras y demás vigas deben soportar satisfactoriamente estas cargas con márgenes de seguridad y servicio.

La pendiente mínima del techo dictada por el estándar API 650 para techos soportados es del 6,3%. Las armaduras y vigas del techo deberán ser dimensionadas para que su estructura describa esta pendiente mínima, o una mayor. Para este caso se utilizará un 25% de pendiente, a causa del peralte necesario de las armaduras en su centro. Con esta pendiente, la altura del cono es de 12,73 pies.

Adicionalmente, el estándar dicta que los elementos soportantes radiales no deben de estar espaciados a más de 6,28 pies centro a centro en el perímetro del tanque y de 5,5 pies en las áreas internas, por lo que las vigas radiales deben estar espaciadas respetando este espaciamiento.

El estándar API 650 no tiene normativa directas en cuanto al diseño de techos respecta, solamente provee parámetros de máximos y mínimos en cuanto a cargas, dimensiones y cuestiones de servicio. El diseño del techo se deberá hacer bajo los estándares y normas dictadas para estructuras metálicas, tales como las de la AISC, pero aplicando criterios adicionales de API 650. Por lo tanto, esta guía solo cubrirá los parámetros especificados por el API 650, y no profundizará propiamente en el diseño estructural del techo, ya que este escapa a los alcances de esta guía.

Finalmente, a partir del diseño estructural del techo esquematizado en la figura 10, se establecen sus dimensiones, el peso combinado de la estructura del techo y las planchas, con y sin la permisión de corrosión. Estas se resumen en la tabla VIII. (Estimadas a partir de diseños previos ajenos).

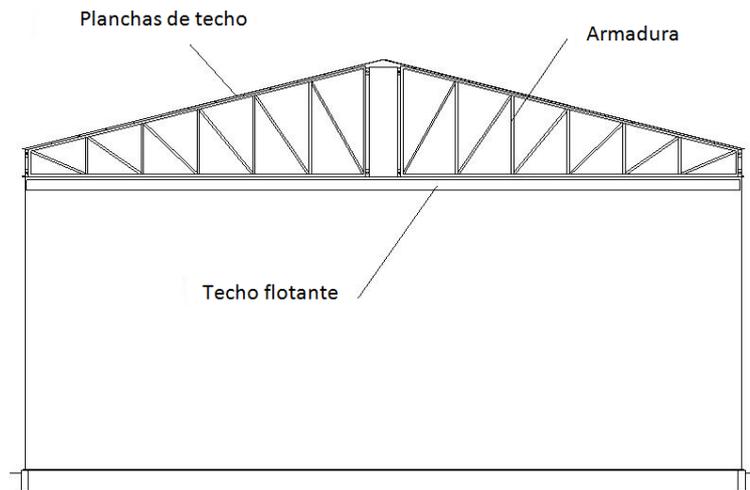
Tabla VIII. **Peso del techo del tanque**

Concepto	Valor	Unidad
Peso de la estructura y planchas del techo con CA	150	Kips
Peso de la estructura y planchas del techo sin CA	129	Kips

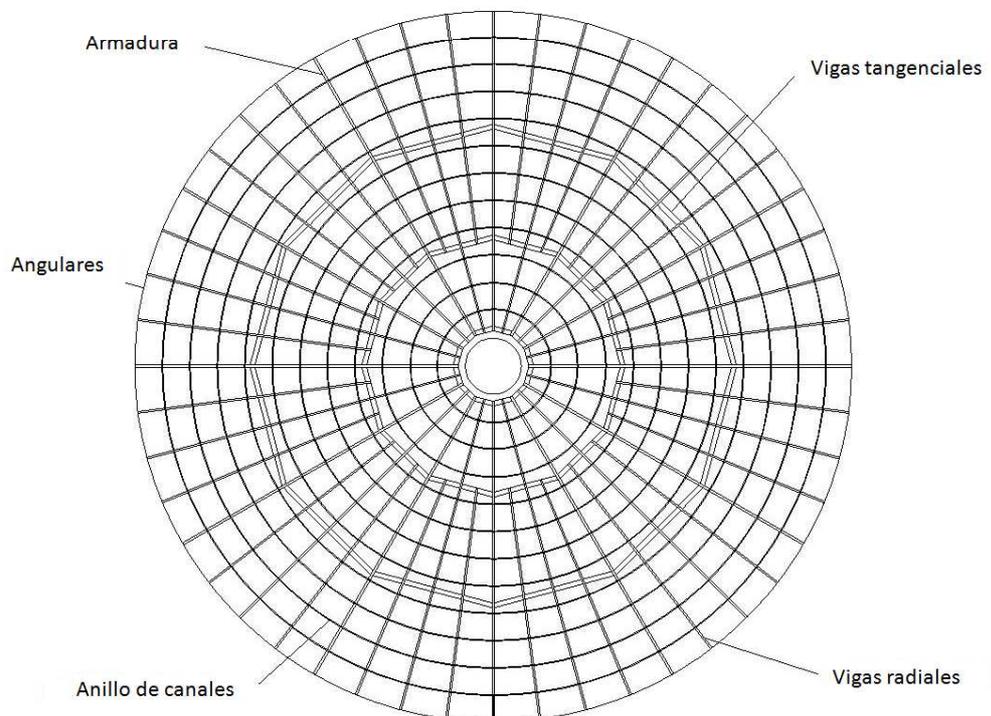
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Esquema de la distribución de elementos del techo**

Sección del tanque



Planta de vigas



Fuente: elaboración propia.

5.6.2. Techo flotante

Al igual que el techo principal, el estándar API 650 solamente dicta algunos parámetros en lo que el diseño del techo flotante refiere, ya que el diseño debe ser realizado bajo otras normas y especificaciones, aplicando algunos parámetros adicionales del API 650. Por lo tanto, el diseño del techo flotante escapa a esta guía, y supondremos que el techo flotante necesita una altura dentro del tanque de 2 pies.

5.7. Diseño de cimiento

El diseño del anillo de cimentación de concreto comprende dos criterios, el de esfuerzos horizontales por presiones activas del suelo y la capacidad de soporte vertical del anillo, soportando el peso del techo y la pared del tanque. Para ello se deben de utilizar los parámetros obtenidos en el estudio de suelos, así como también considerar las cargas causadas por el contenido.

5.7.1. Esfuerzos horizontales

Para realizar el diseño del cimiento para esfuerzos horizontales se utiliza un criterio similar al del diseño de las paredes, ya que el anillo de cimentación es esencialmente un anillo en tensión que soporta la presión lateral de tierra, causada por el peso propio de la misma más la carga distribuida sobre ella, esta última a su vez, causada por el peso del contenido del tanque. Calculando la presión sobre el suelo de la columna del líquido, la presión vertical es de:

$$40\text{pies} \times 0,0495\text{kips} / \text{pie}^3 = 1,98\text{KSF}$$

Con la ecuación de presión activa del suelo:

$$\sigma_p = \frac{1}{2} K_a \gamma_s h_s^2 + K_a Q h_s$$

Siendo h_s la altura del cimiento en pies, γ_s el peso del suelo en kips/pies³, y Q la sobrecarga en KSF. Suponiendo que la altura del cimiento (h_s) es de 3 pies, tenemos que la presión lateral en el anillo es de:

$$\frac{1}{2}(0,3)(0,100Kips / pie^3)(3pies)^2 + (0,3)(1,98KSF)(3pies) = 1,917Kips$$

Esta fuerza de 1,917 Kips esta ejercida por pie lineal de circunferencia del tanque y deberá ser resistida por el acero de refuerzo del cimiento. Este tiene el esfuerzo permisible de 24 KSI, según las normas del ACI para esfuerzos de servicio. El esfuerzo a tensión proporcionado por el concreto se despreciará, ya que este se considerará agrietado, por lo que no podrá ofrecer resistencia a la tensión. Por lo tanto la tensión en el cimiento (utilizando la ecuación de esfuerzos de tensión en cilindros) es de:

$$\frac{(101,85pies)(1,917)}{2} = 97,62Kips$$

El área de acero requerida por tensión es calculada como:

$$\frac{97,62Kips}{24KSI} = 4,07 Pulgadas^2$$

Estas 4,07 pulgadas², pueden ser proporcionadas por 6 varillas No. 8, lo que nos da un área de 4,74 Pulgadas², superior al acero requerido.

5.7.2. Esfuerzos verticales

Utilizando los pesos de los elementos previamente establecidos, se procede a verificar la capacidad de soporte vertical del cimiento. La carga soportada verticalmente por el cimiento es la sumatoria de todas las cargas verticales en la pared. Esta magnitud se calcula en peso por pie lineal de circunferencia de la pared. El anillo de cimentación se proporciona a manera que la presión bajo este sea similar al que se desarrolla a causa del contenido bajo el fondo en centro del tanque. El espesor del anillo debe de ser dimensionado utilizando la siguiente ecuación:

$$b = \frac{W' \times 1000}{31,25HG - 44h_s}$$

Donde W' es la carga en Kips por pie lineal en la pared del tanque y H es el nivel operativo del contenido dentro del tanque. La carga distribuida en la pared del tanque se calcula como:

$$W' = \frac{W_{Techo} + W_{Pared}}{C}$$

Sustituyendo los pesos del techo y paredes cuando son críticos, y la circunferencia:

$$\frac{150Kips + 151,9Kips}{320Pies} = 0,943Kips / Pie$$

Sustituyendo una vez más:

$$\frac{(0,943Kips / Pie) \times 1000}{31,25(40Pies)(0,79) - 44(3)} = 1,10Pies$$

Redondeando la cifra, se establece un cimiento de 1 pie de ancho.

5.8. Viento, sismo, resistencia en compresión de la pared y anclajes

Es de suma importancia realizar los chequeos de las cargas accidentales porque son las responsables de hacer fallar la estructura en la mayoría de los casos.

5.8.1. Chequeo por deslizamiento y volteo a causa del viento

La velocidad de viento mínima especificada por el estándar API 650 que puede afectar al tanque, es de 100 MPH, lo cual causa distintas presiones dependiendo del tipo de área del tanque afectada por el viento. Las presiones especificadas por el estándar para esta velocidad mínima son:

Tabla IX. Presiones de viento mínimas

Tipo de Área	Presión	Unidad
Superficies verticales planas	30	PSF
Áreas proyectadas de superficies cilíndricas	18	PSF
Áreas proyectadas de superficies cónicas o de doble curva	15	PSF

Fuente: elaboración propia.

El momento de volteo para un tanque sin anclajes no debe de exceder 2/3 del momento estabilizante por cargas muertas, excluyendo cualquier contenido almacenado y se calcula de la siguiente manera:

$$M_w \leq \frac{2}{3} \left(\frac{WD}{2} \right)$$

Siendo M_w el momento de volteo en Kips/ pie causado por las presiones de viento y W el peso en Kips de la carga muerta, excluyendo cualquier permisión por corrosión. De no cumplir con este criterio, el tanque deberá ser anclado para contrarrestar este volteo. El resumen del cálculo sigue a continuación en la tabla X.

Tabla X. Resumen del cálculo de cargas de viento

REGLON	PROCEDIMIENTO	VALOR	UNIDAD
Área de proyección de pared	$D \times h_{pared}$	4 685,10	Pies ²
Área proyección de cono	$1/2 h_{cono} \times D$	648,34	Pies ²
Altura del centroide área cono	$h_{pared} + 1/3 h_{cono}$	50,24	Pies
Altura del centroide área pared	$h_{pared}/2$	23	Pies
Carga de viento captada en cono	$A_{cono} \times P_{cono}$	9,72	Kips
Carga de viento captada en la pared	$A_{pared} \times P_{pared}$	84,33	Kips
Carga total (P_t)	ΣP_i	94,05	Kips
Momento de volteo por viento (M_w)	$\Sigma h_i \times P_i$	2 428,25	Kips-Pie
Peso del tanque sin CA (W)	$W_{techo} + W_{pared}$	280,90	Kips
Brazo de momento estabilizante	$D/2$	50,93	Pies
Momento estabilizante (M_w)	$W \times D/2$	14 304,83	Kips-Pie
μ_s del fondo del tanque y suelo		0,4	--
Peso del tanque considerando el fondo (W'')	$W_{piso} + W_{techo} + W_{pared}$	364,07	Kips
Fricción resistente al deslizamiento (F_f)	$\mu_s \times W''$	145,63	Kips
Factor de seguridad al volteo	M_w/M_w	5,89	--
Factor de seguridad al deslizamiento	P_t/F_f	1,55	--

Fuente: elaboración propia.

Los factores de seguridad para ambos casos cumplen con el factor especificado por el estándar API 650, por lo tanto, el tanque resiste satisfactoriamente las cargas de viento y no necesita ser anclado.

5.8.2. Chequeo por deslizamiento y volteo a causa del sismo

El sismo afecta al tanque de almacenamiento de dos maneras primordiales. Una es la respuesta amplificada a movimientos geotécnicos de frecuencia relativamente alta del techo y pared del tanque junto con la porción del contenido del tanque se mueve al unísono con la pared. La otra es respuesta amplificada a movimientos geotécnicos de frecuencia relativamente baja de la porción de líquidos que se mueven en el modo fundamental de vaivén.

El diseño requiere la determinación de la masa hidrodinámica asociada con cada modo de respuesta, así como también las fuerzas laterales y de volteo que el tanque pudiese experimentar.

5.8.2.1. Momento de volteo

El momento de volteo del tanque a causa del sismo se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$M_s = ZI(C_1W_sX_s + C_1W_rH_r + C_1W_1X_1 + C_2W_2X_2)$$

Donde:

M_s = momento de volteo por sismo en Kips-Pie

Z = factor de zona sísmica

I = factor de importancia

C_1 = coeficiente de fuerzas laterales 1

C_2 = coeficiente de fuerzas laterales 2

W_s = peso total de la pared del tanque en Kips

X_s = altura del centroide de la pared del tanque en pies

W_r = peso total del techo del tanque en Kips

H_r = altura total de la pared del tanque en pies

W_1 = masa del contenido del tanque que se mueve al unísono con la pared en Kips

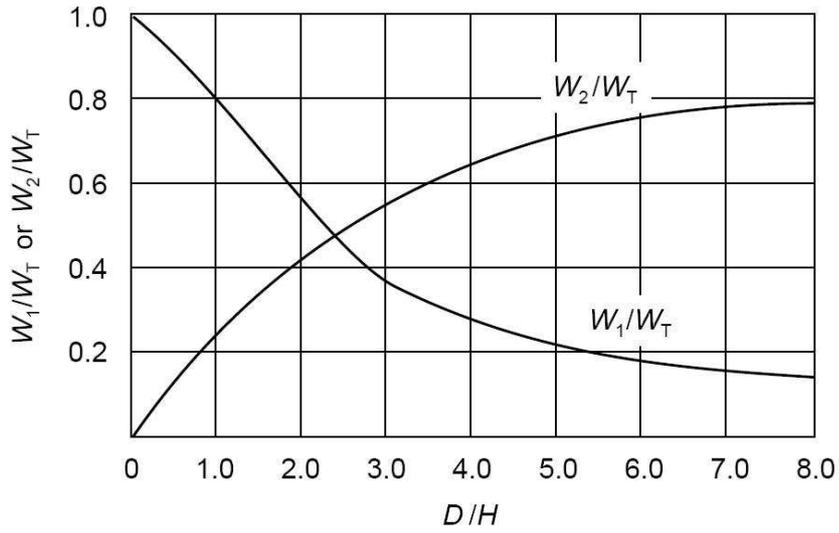
X_1 = centroide de masa de W_1 en pies

W_2 = masa del contenido del tanque que se mueve en el primer modo fundamental de vaivén en Kips

X_2 = centroide de masa de W_2 en pies

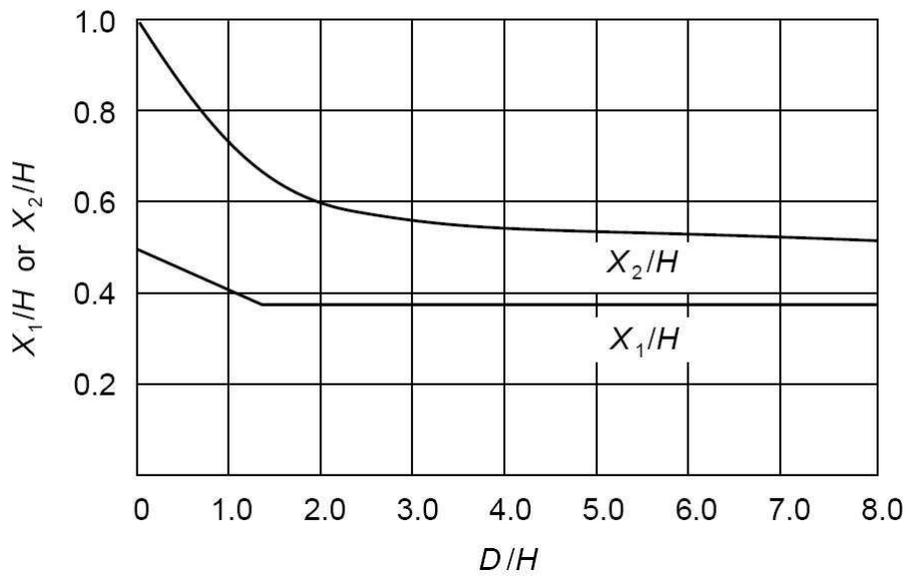
Las masas efectivas W_1 y W_2 se determinan a partir de multiplicar W_T (el peso total de contenido del tanque, en Kips) por el valor obtenido del gráfico de relación No. 1, a partir de la relación D/H . De manera similar, las alturas centroidales X_1 y X_2 se obtienen multiplicando el valor de la figura 12 por H .

Figura 11. Masas efectivas



Fuente: American Petroleum Institute (API) 650.

Figura 12. Centroide de fuerzas sísmicas



Fuente: American Petroleum Institute (API) 650.

El coeficiente de fuerza lateral C_1 debe de calcularse como 0,6. El coeficiente C_2 se determina como una función del primer modo fundamental de vaivén, T (en segundos), y las condiciones del suelo en el sitio del tanque. T puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$T = k(D^{0,5})$$

Donde k es un factor obtenido de la figura 13 para la relación D/H . Si $T \leq 4,5$ segundos:

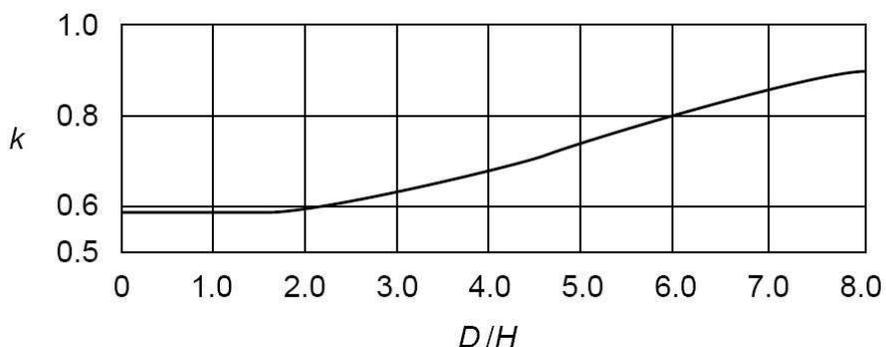
$$C_2 = \frac{0,75S}{T}$$

Si $T > 4,5$ segundos:

$$C_2 = \frac{3,375S}{T^2}$$

Donde S es el factor de sitio obtenido de la tabla XI, o por estudios geotécnicos apropiados.

Figura 13. **Factor k**



Fuente: American Petroleum Institute (API) 650.

Tabla XI. **Coefficientes de sitio**

Tipo	Descripción del perfil del suelo	Factor S
S_1	Material rocoso y/o suelo duro o denso donde su profundidad no excede los 200 pies.	1,0
S_2	Suelo duro o denso donde su profundidad excede los 200 pies.	1,2
S_3	Suelo con 40 pies o más que contenga más de 20 pies de arcilla suave a medio dura pero más de 40 pies de arcilla suave.	1,5
S_4	Suelo que contenga más de 40 pies de arcilla suave.	2,0

Fuente: Uniform Building Code 91'.

5.8.2.2. Momento estabilizante

La resistencia al volteo será proporcionada por el peso del tanque y sus anclajes, o para tanques no anclados, parte del contenido del tanque adyacente a la pared. Esta puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$w_L = 7,9t_b\sqrt{F_{by}GH}$$

Siempre y cuando no sea mayor que:

$$1,25GHD$$

Donde:

w_L = peso máximo del contenido que resiste el volteo en lbs/pie de circunferencia

t_b = espesor del fondo del tanque sin CA en pulgadas

F_{by} = esfuerzo mínimo de fluencia del fondo en psi

5.8.2.3. Fuerza lateral causada por el sismo

La fuerza lateral causada por el sismo puede causar deslizamiento del tanque, por lo que se debe de calcular. Esta se integra a partir de la ecuación de M_s , solamente sin los coeficientes de altura, lo que produce fuerzas horizontales.

$$M_s = ZI(C_1W_s + C_1W_r + C_1W_1 + C_2W_2)$$

Estas fuerzas deben ser resistidas por la fricción producida por la misma masa que provee el momento estabilizante.

5.8.2.4. Resumen de cálculos

Utilizando el procedimiento anterior, se calcula la resistencia del tanque a fuerzas sísmicas. En caso que no cumpla con los factores de seguridad para volteo y deslizamiento (1,5), el tanque deberá ser anclado.

Tabla XII. Resumen del cálculo de cargas sísmicas

REGLON	PROCEDIMIENTO	VALOR	UNIDAD
Zona sísmica	Zona 4	0,4	--
Factor de importancia (I)	Especificado por el Cliente	1.00	--
Relacion D/H	D / H	2,55	--
Coeficiente de fuerza lateral (C ₁)		0,6	--
Coeficiente del sitio (S)		1,2	--
Coeficiente k		0,62	--
Primer periodo natural de vaivén (T)	k (D ^{0.5})	6,26	Sec
Coeficiente de Fuerza Lateral C ₂ Con T>4.5 sec	(3.375 S) / T ²	0,10	--
Peso total de la pared del tanque W _s		189,5	Kips
Centroide de la pared del tanque X _s		20,17	Pies
Peso total del techo del tanque W _r		150	Kips
Altura total de la pared del tanque H _r		46	Pies
Peso del contenido (W _c)		1 6085,70	Kips
Relación W ₁ /W _T		0,45	--
Relación W ₂ /W _T		0,5	--
Relación X ₁ /H		0,38	--
Relación X ₂ /H		0,56	--
Peso W ₁		7 238,57	Kips
Peso W ₂		8 042,85	Kips
Altura X ₁		15,2	Kips
Altura X ₂		22,4	Kips
Momento de volteo por sismo (M_s)		3 6434,30	Kips-Pie
Fuerza lateral sismo (P_T)		2 151.53	Kips
Espesor del fondo sin CA	3/8" - 2(1/16")	0,25	Plg
Esfuerzo de fluencia del fondo		36 000	PSI
Contenido del tanque estabilizante (w _L)	7.9 t _b (F _{br} G H) ^{0.5}	2 106,50	Lbs/Pie
		2,10	Kip/Pie
No mayor que	1.25 G H D	4 023,07	Lbs/Pie
Circunferencia del tanque (C)	Dπ	319,97	Pies
Contenido total estabilizante	C x w _L	674,02	Kips
Peso total estabilizante (W _T)	Ws + Wr + W _b + wLC	1 138,52	Kips
Brazo de momento estabilizante	D / 2	50,93	Pies
Momento estabilizante (M_s)	W _T * D / 2	57 979,13	Kips-Pie
μs del fondo del tanque y suelo		0,4	--
Fricción resistente al deslizamiento (Ff)	μs * (WT - w _L C + W _C)	6 620,08	Kips
Factor de resistencia al volteo	M _s / M _s	1,59	--
Factor de resistencia al deslizamiento	P _T / F _f	3,07	--

Fuente: elaboración propia.

Los factores de seguridad para ambos casos cumplen con el factor especificado por el estándar API 650, por lo tanto, el tanque resiste satisfactoriamente las cargas de sismo y no necesita ser anclado.

5.8.3. Chequeo por compresión en la pared

A causa de las cargas de sismo que afectan el tanque, se puede presentar una falla en la pared del tanque por compresión longitudinal en la parte baja de la pared, por lo que es necesario establecer su capacidad de soportar compresión. La máxima fuerza compresiva longitudinal se determina utilizando la siguiente serie de ecuaciones. Cuando:

$$\frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} \leq 0,785$$

Entonces:

$$b = w_t + \frac{1,273M_s}{D^2}$$

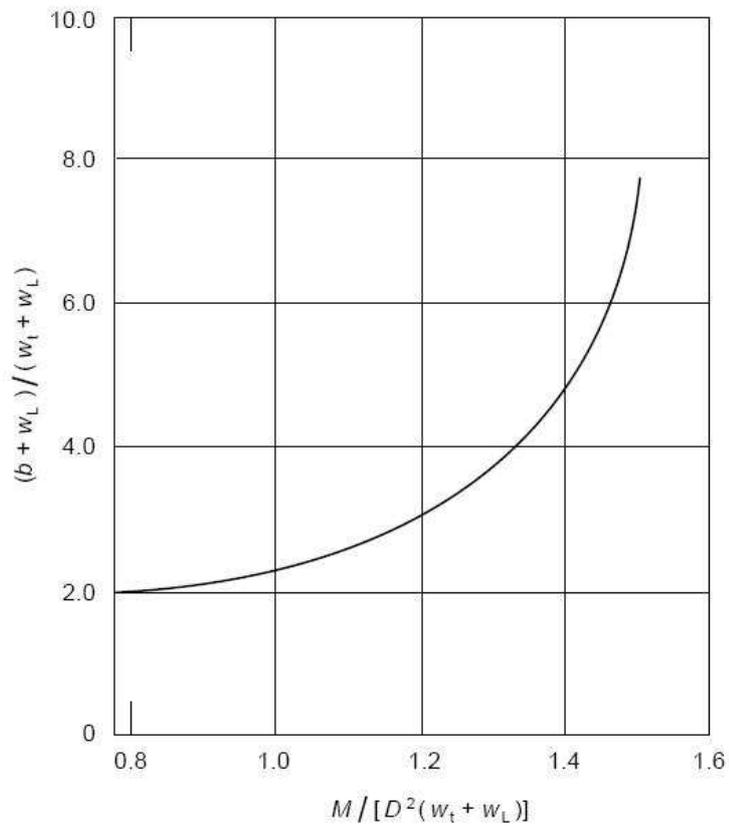
Si:

$$0,785 < \frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} \leq 1,5$$

b puede ser calculada a partir del siguiente parámetro y de la figura 14.

$$\frac{b + w_L}{w_t + w_L}$$

Figura 14. **Fuerza compresiva b**



Fuente: American Petroleum Institute (API) 650

Por último, si:

$$1,5 < \frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} \leq 1,57$$

b se obtiene a partir de:

$$\frac{b + w_L}{w_t + w_L} = \frac{1,490}{1 - \frac{0,637M_s}{D^2(w_t + w_L)}}$$

Donde:

b = Compresión máxima longitudinal en la parte baja de la pared del tanque en lbs/pie de circunferencia

w_t = peso de la pared del tanque y el peso del techo soportado por la pared en lbs/pie de circunferencia

Si:

$$\frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} > 1,57 \quad \text{ó} \quad \frac{b}{12t} > F_a$$

El tanque es estructuralmente inestable, por lo que habría que tomar algunas medidas precautorias, tales como incrementar el espesor del fondo del tanque, incrementar el espesor de la pared, cambiar las proporciones del tanque para incrementar diámetro y reducir altura, o anclar el tanque para eliminar la inestabilidad.

Para tanques anclados la fuerza máxima compresiva puede ser determinada con la siguiente ecuación:

$$b = w_t + \frac{1,273M_s}{D^2}$$

El esfuerzo máximo permisible en compresión, F_a (en psi), puede ser determinado a partir de las siguientes fórmulas. Si:

$$\frac{GHD^2}{t^2} \geq 10^6 \quad \blacktriangleright \quad F_a = \frac{10^6 t}{D}$$

Pero si:

$$\frac{GHD^2}{t^2} < 10^6 \quad \blacktriangleright \quad F_a = \frac{10^6 t}{2,5D} + \sqrt{GH}$$

Sin embargo, F_a nunca debe de ser mayor que $0,5F_{ty}$, donde:

$t =$ espesor de la carrera de la pared adyacente al fondo en pulgadas

$F_{ty} =$ el esfuerzo mínimo de la carrera de la pared adyacente al fondo en psi

Los cálculos del chequeo han sido resumidos en la siguiente tabla:

Tabla XIII. Resumen del cálculo de fuerzas compresivas

REGLÓN	PROCEDIMIENTO	VALOR	UNIDAD
Relación	$M_s/[D^2(w_t+w_L)]$	1,11	--
$0.785 < M_s/[D^2(w_t+w_L)] < 1.5$	ver tabla	--	--
Interpolando y despejando b	6600		lbs-pie
Espesor de la parte baja de la pared sin CA	7/16"-1/16"	3/8"	Pulgada
Esfuerzo en pared (f_a)	$b/(12t)$	1 467	PSI
Parametro	GHD^2 / t^2	2 331 023	
Parametro mayor que 10^6			
Esfuerzo permisible en compresión (F_a)	$(106t)/(2,5D)+600(GH)^{0.5}$	4 845	PSI

Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo en la pared f_a es menor que el esfuerzo permisible F_a , por lo tanto, el tanque no corre el riesgo de colapsar por falla en compresión en su pared.

5.8.4. Anclajes

Según los cálculos anteriores, el tanque no necesita ser anclado, ya que cumple con los requisitos de estabilidad y factores de seguridad satisfactoriamente, pero los anclajes podrían ser exigidos por el cliente o por razones ajenas a la estabilidad del tanque, por lo que serán discutidos brevemente.

Los anclajes serán diseñados para que resistan cada uno de los casos de carga especificados en la tabla XIV. La carga por anclaje será calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$t_b = U/N$$

Donde:

- t_b = carga por anclaje
- U = carga neta de levantamiento
- N = numero de anclajes
- P = presión de diseño en pulgadas de columna de agua
- P_t = presión de prueba en pulgadas de columna de agua
- P_f = presión de falla en pulgadas de columna de agua
- t_h = espesor de las planchas del techo en pulgadas
- W_1 = carga muerta de la pared excluyendo ca en lbs
- W_2 = carga muerta de la pared y el techo, excluyendo ca, en lbs
- W_3 = carga muerta de la pared incluyendo ca

Tabla XIV. **Cargas de levantamiento**

Caso de carga de levantamiento	Formula de levantamiento neto	Esfuerzo permisible del perno de anclaje (PSI)
Presión de diseño	$[(P - 8t_h) \times D^2 \times 4,08] - W_1$	15 000
Presión de prueba	$[(P_t - 8t_h) \times D^2 \times 4,08] - W_1$	20 000
Presión de falla	$[(1.5 \times P_f - 8t_h) \times D^2 \times 4,08] - W_3$	F_y
Carga de viento	$[4 \times M_w / D] - W_2$	$0,8 \times F_y$
Carga de sismo	$[4 \times M_s / D] - W_2$	$0,8 \times F_y$
Presión de diseño + viento	$[(P - 8t_h) \times D^2 \times 4,08] + [4 M_w / D] - W_1$	20 000
Presión de diseño + sismo	$[(P - 8t_h) \times D^2 \times 4,08] + [4 M_s / D] - W_1$	$0,8 \times F_y$

Fuente: elaboración propia.

Los anclajes deberán de estar espaciados a no más de 10 pies entre ellos centro a centro (para tanques de menos de 50 pies de diámetro es de 6 pies), siendo el diámetro mínimo del perno de anclaje 1 pulgada, más cualquier permisión por corrosión especificada. Para el diseño, se utilizará el área neta del perno, descontado la rosca. El anclaje deberá estar unido a la pared del tanque por medio de ensamblajes de tipo silleta o anillos de anclaje de una tamaño adecuado.

Los esfuerzos permisibles de las partes accesorias de los anclajes y de la pared del tanque en la unión podrán ser incrementados en un 33% para cargas temporales, pero nunca deberá sobrepasar los 25 KSI para pared. El diseño de la unión debe realizarse a manera de que el perno del anclaje falle antes que la unión, para que la pared del tanque no llegue a rasgarse.

Al ser un tanque anclado, w_L no se podrá considerar como aportación a las fuerzas estabilizantes del tanque. Adicionalmente, el cimiento deberá ser diseñado para tener la capacidad de soportar las cargas de volteo y deslizamiento a las cuales será sometido, proveyendo un contrapeso.

5.9. Resumen del diseño

Los resultados del diseño realizado en el ejemplo se resumen en la tabla XV.

Tabla XV. Resumen de diseño

A. DIMENSIONES	
Diámetro nominal	101,85 Pies
Circunferencia	320,00 Pies
Alto de pared	46,00 Pies
Alto de techo	12,75 Pies
Altura total	58,73 Pies
Pendiente del techo	25%
B. FONDO	
Distribución de planchas	A tope con juntas soldadas
Espesor	3/8 de pulgada
C. PAREDES	
Carrera 1	6 pies de alto x 1/4 de pulgada de espesor
Carrera 2	8 pies de alto x 1/4 de pulgada de espesor
Carrera 3	8 pies de alto x 1/4 de pulgada de espesor
Carrera 4	8 pies de alto x 5/16 de pulgada de espesor
Carrera 5	8 pies de alto x 3/8 de pulgada de espesor
Carrera 6	8 pies de alto x 7/16 de pulgada de espesor
Número de planchas por anillo	16 planchas de 20 pies
D. ALMACENAJE	
Capacidad	2 438 100 galones de etanol de alto grado
Nivel máximo de operación	40 Pies
Altura considerada para accesorios	6 pies
E. TECHO	
Techo primario	De armaduras radiales
Techo secundario	Flotante
Espesor de planchas del techo	1/4 de pulgada
F. CIMIENTO	
Altura	3 pies
Ancho	1 pie
Refuerzo de acero del concreto	6 varillas No 8
G. ANCLAJES	
Número de anclajes	No necesarios

Fuente: elaboración propia.

5.10. Consideraciones importantes

Los elementos del tanque no especificados en el estándar API 650 que requieran ser diseñados, tales como el techo, escaleras y accesorios de seguridad deberán ser diseñados utilizando sus respectivos códigos o normas, con el propósito de garantizar su buen funcionamiento, así como su integridad estructural.

El diseñador deberá discutir con el cliente los elementos diseñados con el motivo de garantizar que estos llenen las necesidades requeridas de servicio y de función.

6. SOLDADURAS

6.1. Generalidades

Las estructuras soldadas se forman mediante conjuntos de chapas o perfiles unidos entre sí con enlaces capaces de soportar los esfuerzos que se transmiten entre las piezas.

El objetivo principal de la unión es asegurar la mejor continuidad de las piezas, continuidad que será más adecuada cuanto más uniforme sea la transmisión de los esfuerzos.

La transmisión de esfuerzos en las uniones se hace en muchas ocasiones de modo indirecto, ya que para transmitir el esfuerzo de una pieza a otra se la obliga previamente a desviarse de su trayectoria normal. En el caso de soldadura a tope, la transmisión es directa.

6.2. Tipos de soldadura

Existen cerca de cuarenta sistemas para soldar, pero el más importante para las estructuras metálicas es el sistema de soldadura por fusión. En las soldaduras por fusión el calor proporcionado funde los extremos de las piezas y al solidificar se produce la unión.

Existen diferentes tipos de soldadura por fusión, pero los más utilizados son dos:

- Soldadura autógena
- Soldadura por arco eléctrico, que es la que se utiliza en estructuras metálicas

6.2.1. Soldadura autógena

En la soldadura autógena el calor lo proporciona una llama producida por la combustión de una mezcla de acetileno y oxígeno, en la proporción 1:1, que se hace arder a la salida de una boquilla. La temperatura alcanzada en la llama es de unos 1300°C. El calor producido funde los extremos a unir, con lo que se obtiene, después de la solidificación, un enlace homogéneo. Aunque este tipo de soldadura todavía se utiliza en los talleres mecánicos, su utilización no es correcta en uniones sometidas a esfuerzos, ya que por efecto de la temperatura se provocan unas tensiones residuales muy elevadas, siendo en general de más lenta ejecución y cara que la soldadura por arco.

Sin embargo, cuando el soplete de oxiacetilénico se utiliza en la soldadura de piezas, se le suele completar con un alambre de material de aportación que se funde al mismo tiempo que los bordes de las piezas, formando en conjunto el cordón de soldadura. El tamaño de la boquilla del soplete es aproximadamente igual que el espesor de las chapas a unir.

6.2.2. Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco se basa en que si a dos conductores en contacto se les somete a una diferencia de potencia, establecemos entre ambos una corriente. Si posteriormente se les separa, provocamos una chispa, cuyo efecto es ionizar el gas o el aire que la rodea, permitiendo así el paso de la corriente, a pesar de no estar los conductores en contacto directo, con esta acción se crea entre ellos un arco eléctrico, por transformación de la energía eléctrica en energía luminosa y calorífica. Las temperaturas alcanzadas por medio de la utilización de este método pueden ser alrededor de 3500°C.

En el circuito eléctrico formado por los electrodos y el arco, la intensidad de corriente depende de la tensión y de la resistencia del circuito. Si los electrodos se acercan o se separan variará la resistencia y la intensidad y por lo tanto, la energía se transformará en calor, con lo que la soldadura no será uniforme.

Los procedimientos de soldadura en arco pueden agruparse en tres:

- Electrodo de carbono
- Electrodo de tungsteno en atmósfera de hidrógeno (soldadura al hidrógeno atómico)
- Soldadura con electrodo metálico

6.2.2.1. Soldadura con electrodo de carbono

Este tipo de procedimiento no es utilizado en la estructura metálica. El arco salta entre un electrodo de carbón y la pieza a soldar, esta se complementa con metal de aportación.

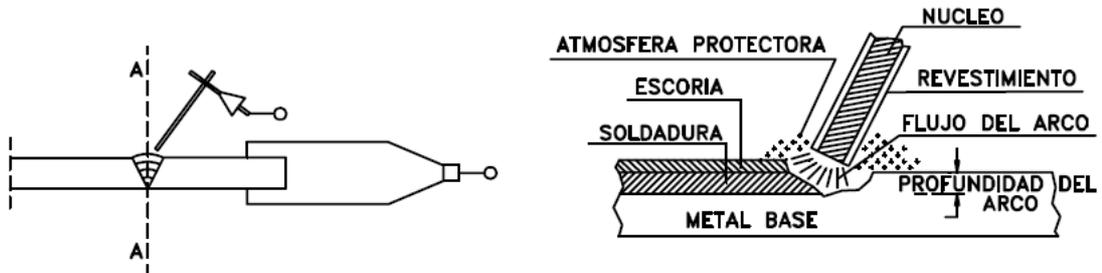
6.2.2.2. Soldadura con electrodo de tungsteno

El arco salta entre dos electrodos de tungsteno en atmósfera de hidrógeno. El calor del arco disocia las moléculas de hidrógeno, que vuelven a soldarse al contacto con las piezas a soldar, desprendiendo una gran cantidad de calor, este calor funde las piezas y permite que se efectúe la soldadura en ausencia del oxígeno y el nitrógeno del aire.

6.2.2.3. Soldadura con electrodo metálico revestido

Es el procedimiento de unión normalmente utilizado en la construcción metálica. Esta unión se consigue al provocar un arco eléctrico entre las piezas a unir y un electrodo que sirve de material de aportación. En este procedimiento el operario establece un contacto inicial entre el electrodo y la pieza a soldar (llamada trabajo), con lo que se inicia un flujo de corriente. A continuación se retira ligeramente el electrodo y se establece un arco, que funde el electrodo y los bordes de la pieza a unir, formándose el cordón de soldadura.

Figura 15. Soldadura con electrodo metálico revestido



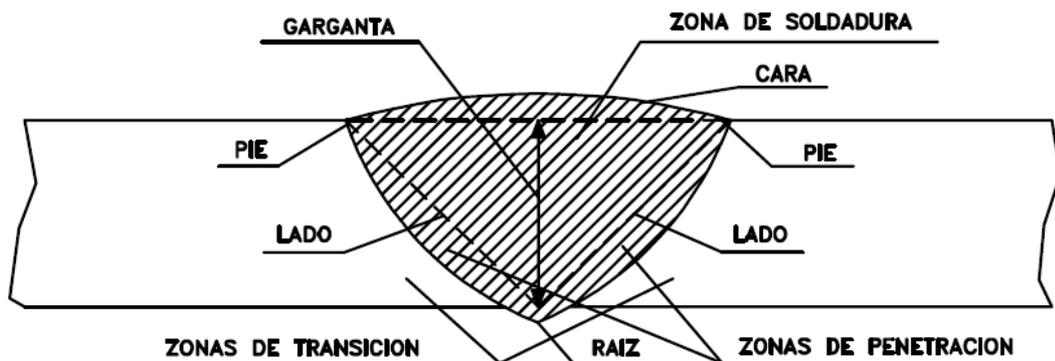
Fuente: American Welding Society (AWS) 2002.

6.3. El cordón de soldadura

El cordón de soldadura tiene tres partes bien definidas:

- Zona de soldadura
- Zona de penetración
- Zona de transición

Figura 16. Partes del cordón de soldadura



Fuente: American Welding Society (AWS) 2002.

6.3.1. Zona de soldadura

Es la zona central, que está formada fundamentalmente por el metal de aportación.

6.3.2. Zona de penetración

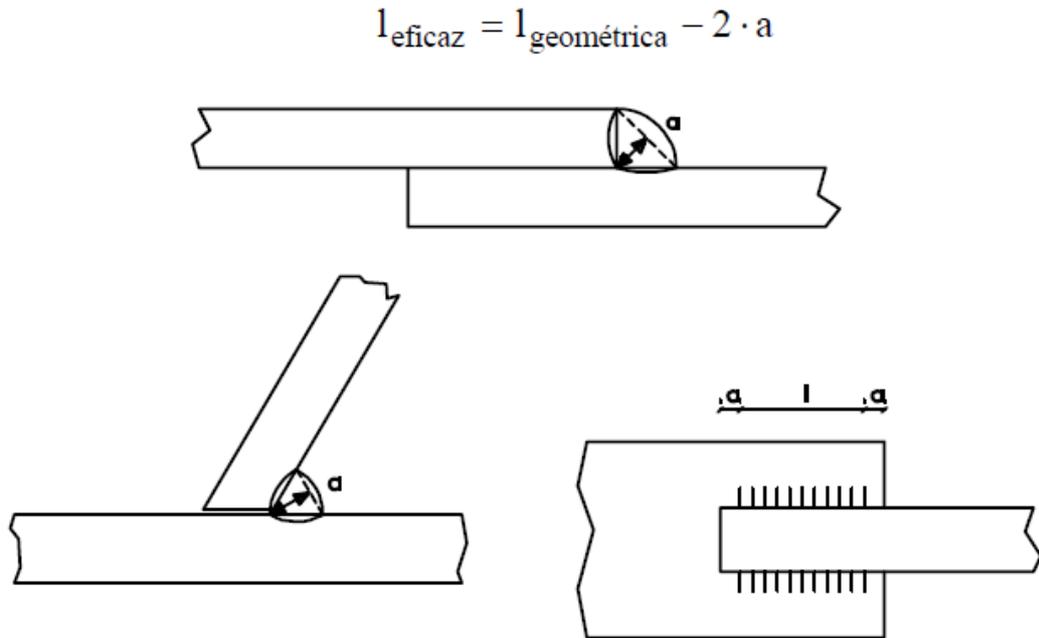
Es la parte de las piezas que ha sido fundida por los electrodos. La mayor o menor profundidad de esta zona define la penetración de la soldadura. Una soldadura de poca penetración es una soldadura generalmente defectuosa.

6.3.3. Zona de transición

Es la más próxima a la zona de penetración. Esta zona, aunque no ha sufrido la fusión, sí ha soportado altas temperaturas, que le han proporcionado un tratamiento térmico con posibles consecuencias desfavorables, provocando tensiones internas.

Las dimensiones fundamentales que sirven para determinar un cordón de soldadura son la garganta y la longitud eficaz. La garganta (a) es la altura del máximo triángulo isósceles cuyos lados iguales están contenidos en las caras de las dos piezas a unir y es inscribible en la sección transversal de la soldadura. Se llama longitud eficaz (l) a la longitud real de la soldadura menos los cráteres extremos. Se dice que la longitud de cada cráter es igual a la garganta.

Figura 17. Dimensiones fundamentales de una soldadura



Fuente: American Welding Society (AWS) 2002.

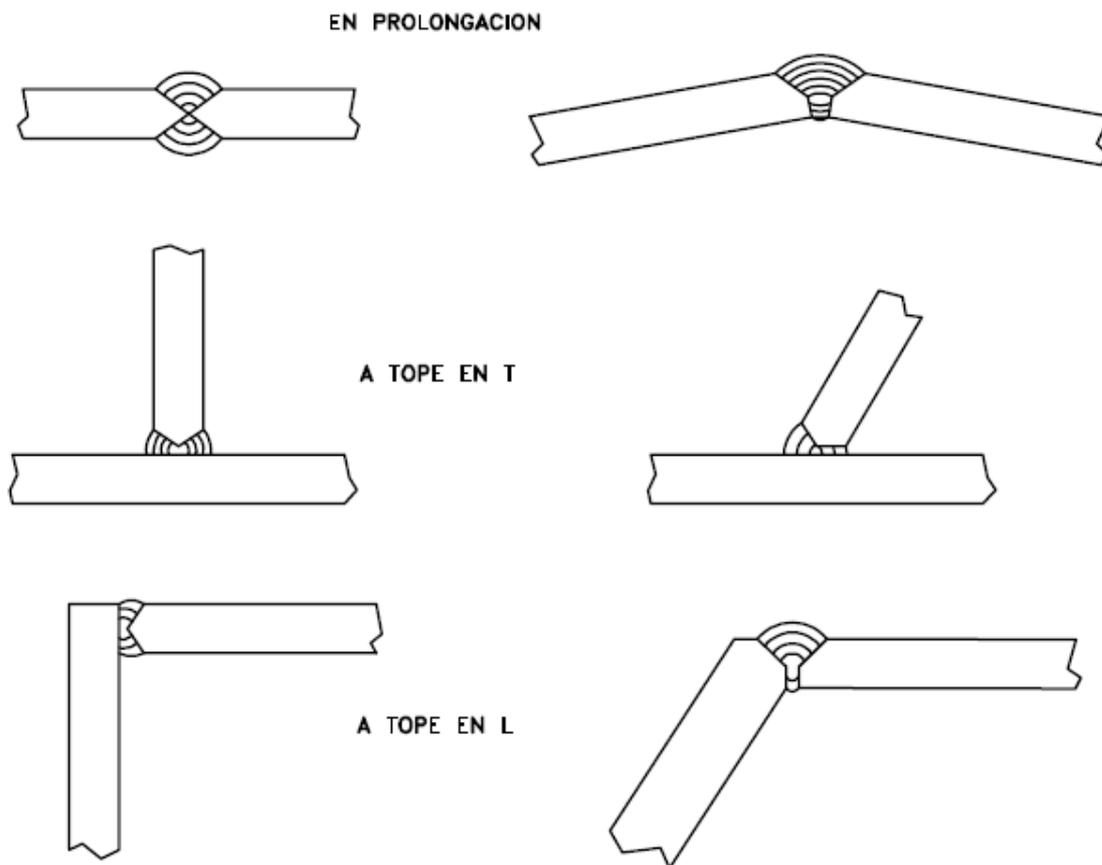
6.3.4. Clasificación de los cordones de soldadura

Los cordones de soldadura se pueden clasificar por:

- Por la posición geométrica de las piezas a unir
 - Soldaduras a tope
 - Soldaduras en ángulo
- Por la posición del cordón de soldadura respecto al esfuerzo
 - Cordón frontal
 - Cordón lateral
 - Cordón oblicuo
- Por la posición del cordón de soldadura durante la operación de soldar

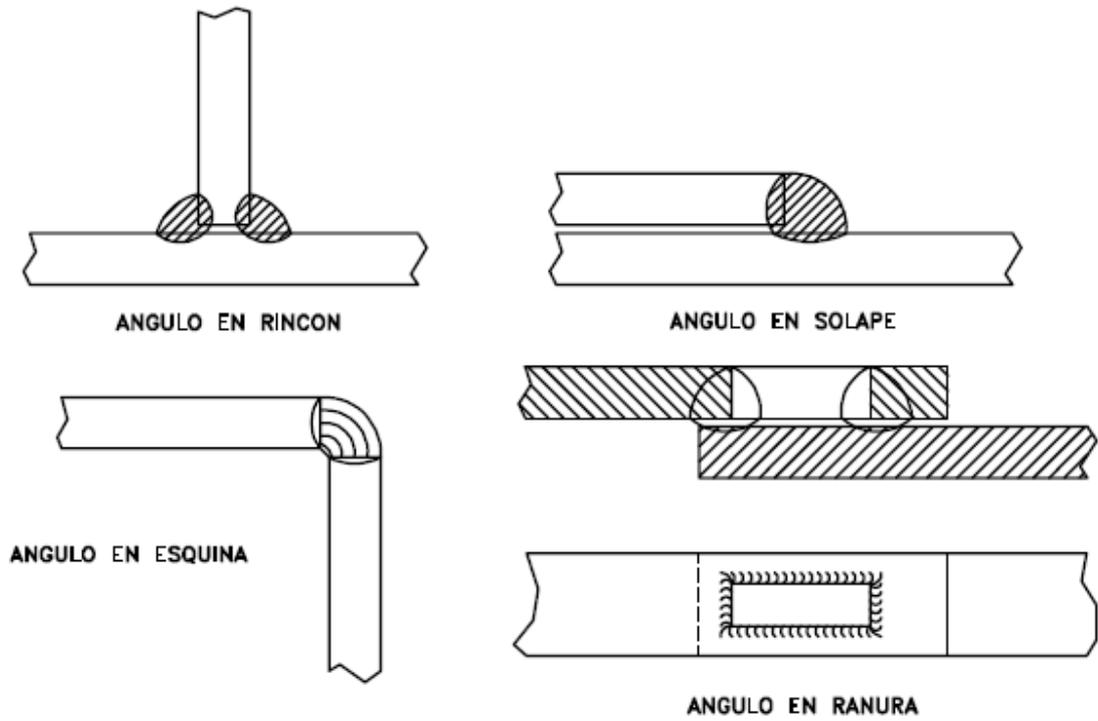
- Cordón plano (se designa con H)
- Cordón horizontal u horizontal en ángulo (se designa por C)
- Cordón vertical (se designa con V)
- Cordón en techo o en techo y en ángulo (se designa con T)

Figura 18. **Soldadura de tope**



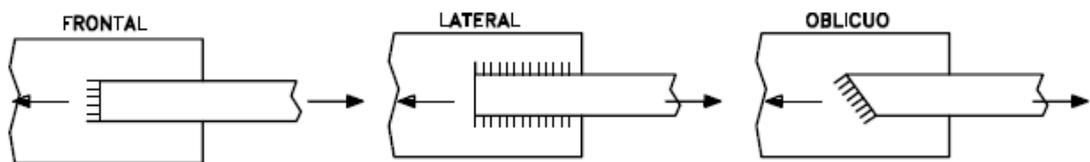
Fuente: American Welding Society (AWS) 2002.

Figura 19. Soldadura en ángulo



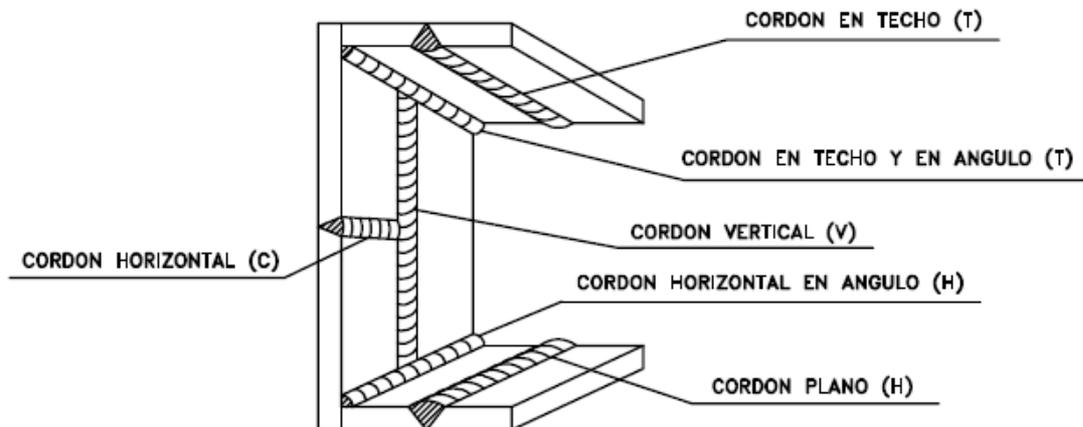
Fuente: American Welding Society (AWS) 2002.

Figura 20. Clasificación de cordones de soldadura



Fuente: American Welding Society (AWS) 2002.

Figura 21. Clasificación de los cordones de soldadura según su posición durante la posición de soldar



Fuente: American Welding Society (AWS) 2002.

6.4. Normas de soldadura

Existen diversas normas de soldadura, dependiendo del país que se reside. En Guatemala no hay una norma específica, por lo que se utiliza la AWS (*American Welding Society*). Esta norma es de Estados Unidos en donde es utilizada extensamente.

7. MÉTODO DE INSPECCIÓN DE JUNTAS EN TANQUES API

Este capítulo describe los métodos aprobados por las normas API en las cuales hacen referencia a métodos no destructivos. Cada método enumera tanto el equipo como los pasos a realizar para su correcta ejecución. Los métodos se mencionan a continuación:

7.1. Método radiográfico

Para los efectos de este capítulo, las placas se considerarán del mismo espesor cuando la diferencia de su espesor no exceda 3 mm (1 / 8 de pulgada).

7.1.1. Aplicaciones

La inspección radiográfica se requiere para la soldadura a tope y anular. Esta no es necesaria para: soldaduras de la placa del techo, soldaduras de las placas del suelo, soldadura de la unión entre el techo y la pared, las soldaduras que fijan la pared del suelo, soldaduras que unen el paso de hombre de pared, paso de hombre de techo y ventilaciones.

7.1.2. Ubicación de las radiografías

Los siguientes requisitos se aplican a las juntas verticales de pared:

- a Para las juntas soldadas a tope en donde la placa es menor o igual a 10 mm (3/8 de pulgada) de espesor es necesario una toma radiográfica en los primeros 3 metros (10 pies) de soldadura completa a cada soldador. No importando el número de soldadores, es necesaria una radiografía a cada 30 metros o 100 pies aproximadamente y cualquier fracción restante de junta vertical del mismo tipo y espesor. Al menos el 25% de las radiografías tomadas tienen que estar en la intersección de juntas verticales y horizontales, con un mínimo de dos intersecciones por tanque. Además de los requisitos anteriores, es necesaria una radiografía tomada al azar en cada articulación vertical en la parte más baja del tanque.

- b Para las juntas soldadas a tope en donde la placa es mayor a 10 mm (3/8 de pulgada), pero inferior o igual a 25 mm (1 pulgada) de espesor, la radiografía debe ser tomada de acuerdo al punto a. Además, todas las uniones de las juntas verticales y horizontales en este rango de espesores deben ser radiografiadas; cada radiografía debe mostrar claramente no menos que 75 mm (3 pulgadas) de soldadura vertical y de 50 mm (2 pulgadas) de longitud de soldadura a cada lado de la intersección vertical. En la parte más baja, es necesaria dos radiografías en cada junta vertical; una deberá ser tomada en la parte más baja posible y la otra deberá ser tomada en forma aleatoria.

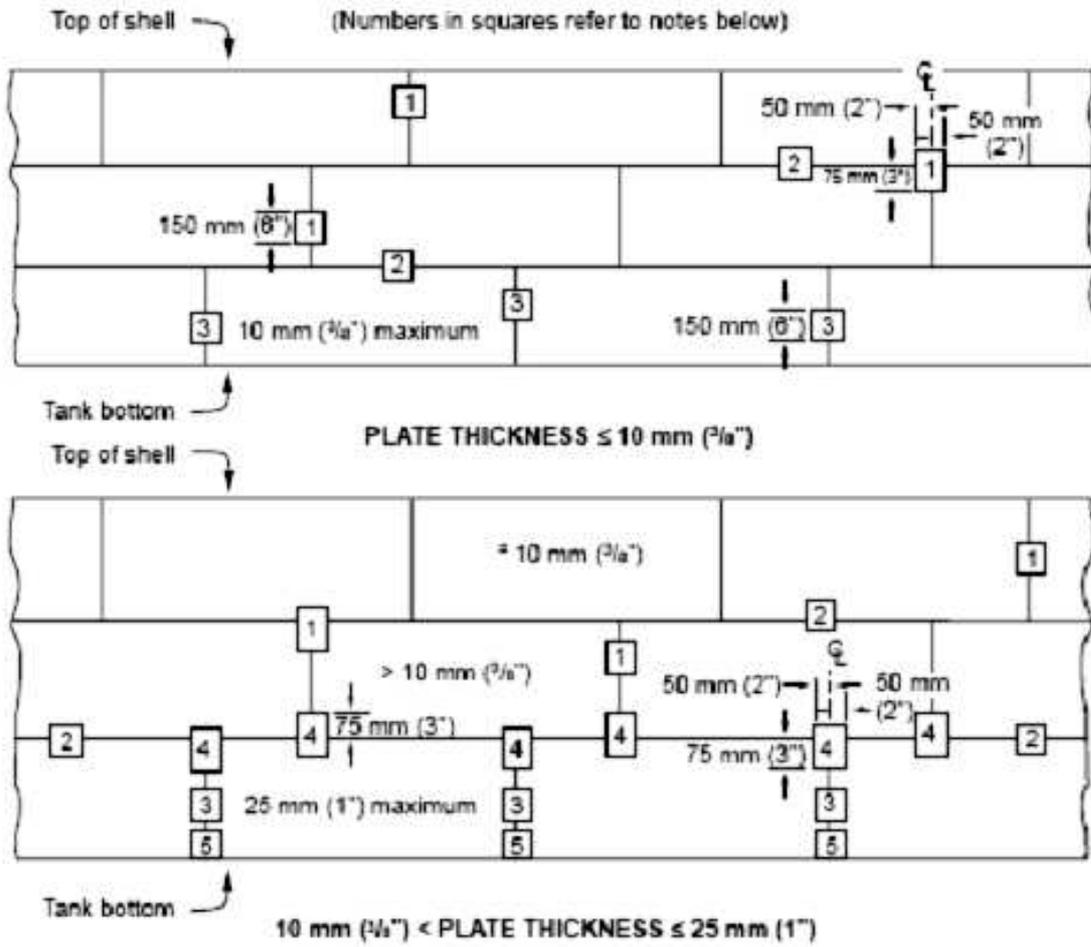
- c Para las juntas soldadas a tope en donde la placa es mayor a 25 mm (1 pulgada), de espesor, la radiografía deberá ser tomada en todas las juntas verticales y en todas las intersecciones de juntas verticales y horizontales. Cada radiografía deberá mostrar claramente no menos que 75 mm (3 pulgadas) de soldadura vertical y 50 mm (2 pulgadas) de longitud de soldadura a cada lado de la intersección vertical.

- d La soldadura a tope en la periferia de una boca de inspección deberá ser totalmente radiografiada. Una radiografía deberá tomarse en los primeros 3 m (10 pies) de una junta horizontal completa del mismo tipo de soldadura y mismo espesor sin importar el número de soldadores. A partir de ese punto, una radiografía deberá ser tomada cada 60 m o 200 pies aproximadamente.

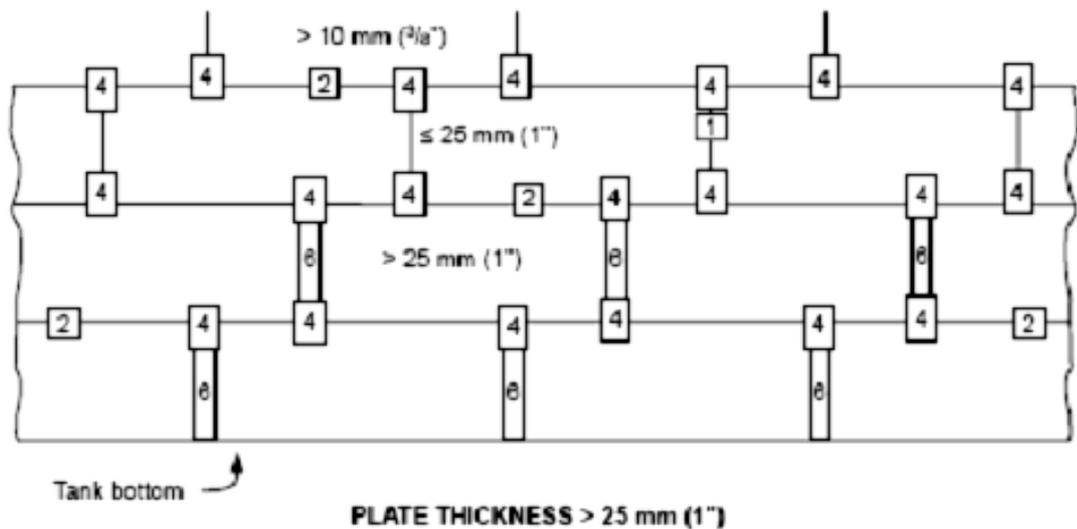
Cuando dos soldadores están trabajando juntos en los lados opuestos del tanque es permitido tomar solo una radiografía, si la radiografía es rechazada, otra radiografía deberá ser tomada para determinar cuál de los dos soldadores cometieron un error. Mientras se está soldando, las radiografías pueden ser tomadas tan pronto como sea factible y la localización de las mismas deberán ser determinadas por el inspector en turno.

Cada radiografía deberá mostrar claramente un mínimo de 150 mm (6 pulgadas) de longitud de soldadura. La radiografía deberá ser centrada en la soldadura y deberá tener el ancho suficiente para que la imagen sea de calidad y se puedan identificar las fallas.

Figura 22. Ubicación de tomas radiográficas



Continuación figura 22



Notas:

1. Radiografía vertical, una a cada 3 metros (10 pies) y el resto a cada 30 m (100 pies), el 25% de los cuales deberá ser tomada en las intersecciones
2. Radiografía horizontal, una a cada 3 metros (10 pies) y el resto a cada 60 m (200 pies)
3. Radiografía vertical en cada parte baja del tanque
4. Radiografías de todas las intersecciones de más de 10 mm (3/8 de pulgada)
5. Radiografía en el fondo del tanque por encima de 10 mm (3/8 de pulgada)
6. Radiografía completa de cada junta vertical de más de 25 mm (1 pulgada)

Fuente: American Petroleum Institute (API) 650.

7.1.3. Técnica

La superficie acabada de la soldadura, en la ubicación de la radiografía deberá ser al ras con la placa o una corona bastante uniforme que no exceda los siguientes valores:

Tabla XVI. **Espesores máximos de soldadura**

Espesor de placas mm(in)	Máximo de espesor de refuerzo mm (in.)
≤13 (1/2)	1,5 (1/16)
>13 (1/2) a 25 (1)	2,5 (3/32)
<25 (1)	3 (1/8)

Fuente: elaboración propia.

7.1.4. Presentación de las radiografías

Todos los resultados deberán ser presentados al inspector para ser analizadas, si alguna soldadura resultase defectuosa, el inspector de turno deberá aprobar la reparación de la misma. Las soldaduras defectuosas deberán ser reparadas por cincel o fusión de un lado o ambos lados de la junta, según sea necesario y volver a soldar.

Todas las soldaduras que sean reparadas deberán ser inspeccionadas nuevamente por el procedimiento de inspección original. El fabricante deberá elaborar un mapa con la ubicación de todas las radiografías tomadas junto con las marcas de identificación de cada radiografía.

Después que la estructura se ha completado, las radiografías serán propiedad del cliente a menos que se acuerde lo contrario por el cliente y el constructor.

7.1.5. Normas radiográficas

Las soldaduras examinadas por el método radiográfico serán tomadas como aceptables o inaceptables por las normas del párrafo UW-51 (b) en la Sección VIII, del Código ASME.

7.1.6. Determinación de límites para la soldadura defectuosa

Cuando una sección de soldadura se muestra en una radiografía que es inaceptable de acuerdo con las disposiciones de la norma ASME o los límites de la soldadura no están definidos por la radiografía, dos puntos adyacentes a la sección serán examinadas por la radiografía. Sin embargo, si la radiografía original muestra por lo menos 75 mm (3 pulgadas) de soldadura aceptable entre el punto defectuoso a cualquier extremo de la radiografía, no será necesario examinar esa parte de la soldadura. Si la soldadura se sustituye, el inspector tendrá la facultad de exigir una radiografía en cualquier ubicación de la misma.

Figura 23. Toma de una muestra radiográfica



Fuente: www.encontrol.com

Figura 24. Equipo para toma de muestras radiográficas



Fuente: www.encontrol.com

Figura 25. Radiografía de una unión de soldadura



Fuente: www.encontrol.com

7.2. Examen de partículas magnéticas

Cuando el método de partículas magnéticas sea requerido el método a utilizar será de acuerdo a la Sección V, Artículo 7, del código ASME.

7.2.1. Generalidades

El examen de partículas magnéticas será aplicado para detectar rajaduras y otras discontinuidades en la superficie de los materiales. Este tipo de examen es muy sensible si la discontinuidad está cercana a la superficie y disminuye mientras la discontinuidad sea más profunda. Los tipos de discontinuidades que pueden ser detectados por este método son: grietas, juntas, laminaciones, etc. En principio, este método consiste en crear un campo magnético en la zona a examinar, junto con la aplicación de partículas ferromagnéticas a la superficie.

Las partículas se forman en patrones en la superficie donde las grietas y discontinuidades causan distorsiones en el campo magnético. Estos modelos suelen ser característicos del tipo de discontinuidad que se detecta. Para lograr la máxima eficacia en la detección de todo tipo de discontinuidades, cada área debe ser examinada por lo menos dos veces, con las líneas de flujo durante un examen aproximadamente perpendicular a las líneas de flujo en la otra.

7.2.2. Materiales

Las finas partículas ferromagnéticas utilizadas para dicho examen deben cumplir con los siguientes requerimientos.

- Tipos de partículas. Las partículas deberán ser tratadas para impartir color (pigmentos fluorescentes, no fluorescentes o ambos) y generar contraste con el fondo de la superficie a ser examinada.
- Partículas. Las partículas pueden ser secas o húmedas.
- Límites de temperatura. Las partículas deberán ser usadas dependiendo del rango de temperatura aceptada por el fabricante.

7.2.3. Requerimientos

Condiciones de la superficie.

- Resultados satisfactorios son usualmente obtenidos cuando la superficie se encuentra soldada, laminada, cortada o en su estado bruto. Sin embargo es necesario preparar la superficie puliéndola o lijándola cuando se muestren irregularidades en la superficie pudiendo esta, afectar los resultados.

- Antes de empezar a realizar dicha prueba el área a ser examinada y el área adyacente, como mínimo 1 pulgada libre en cada lado, deberá de estar seca, libre de polvo, grasa o cualquier tipo de químico que pudiera interferir con la prueba.
- Para la limpieza de la superficie a ser examinada se podrá utilizar detergentes, solventes orgánicos, removedores de pinturas, vapores para desengrasar o métodos de limpieza ultrasónicos.

7.2.4. Procedimientos

El examen de partículas magnéticas deberá ser realizado de acuerdo a un procedimiento escrito. Cada procedimiento deberá incluir como mínimo la siguiente información.

- El material, la forma y el tamaño de la pieza a ser examinada
- La técnica de magnetización a ser utilizada
- El equipo a ser utilizado en la magnetización
- Preparación de la superficie
- Tipo de partículas ferromagnéticas a ser utilizadas: fabricante, color, si es húmeda o seca, etc
- Rango de temperatura a ser utilizada para las partículas ferromagnéticas
- Las corrientes de magnetización (tipo y amperaje)
- Desmagnetización
- Limpieza después del examen

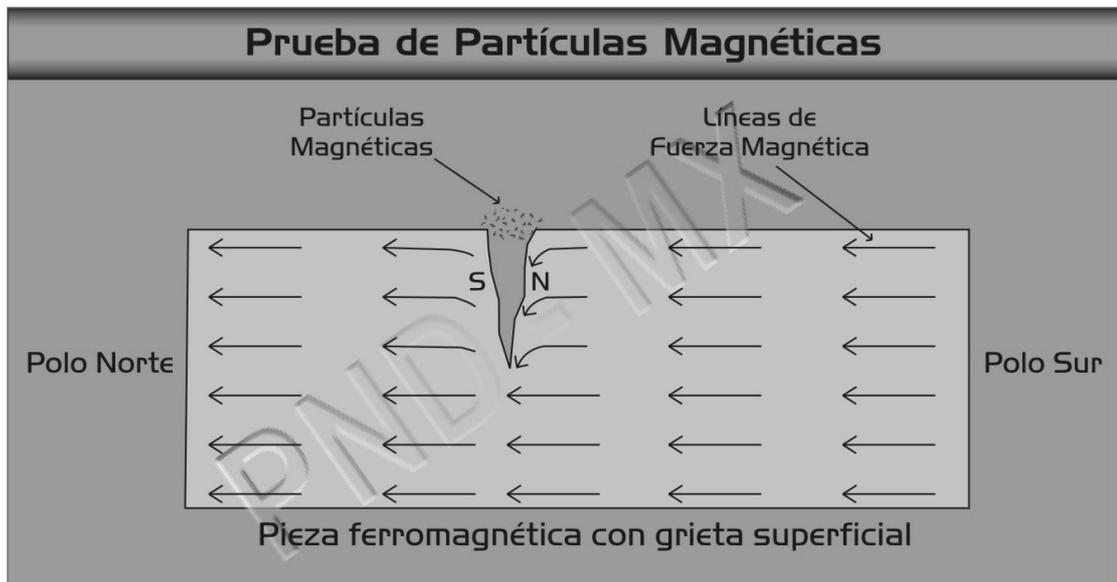
7.2.5. Métodos de examinación

El examen se realizará con el método continuo; es decir, la corriente de magnetización se mantiene mientras el examen se está aplicando y el exceso de partículas del examen se remueve. Las partículas ferro magnéticas utilizadas en el examen podrán ser húmedas o secas, fluorescentes o no fluorescentes.

Una de las siguientes cinco técnicas de magnetización deberá de ser utilizada.

- Magnetización longitudinal
- Magnetización circular
- Magnetización multidireccional
- Técnica yoke
- Técnica prod

Figura 26. **Muestra de método de inspección con partículas magnéticas**



Fuente: www.pnd.com.mx

7.3. Examen ultrasónico

Cuando el método ultrasónico sea requerido, el método a utilizar será de acuerdo a la Sección V, Artículo 5, del código ASME.

7.3.1. Procedimiento

El examen ultrasónico deberá ser realizado de acuerdo a un procedimiento escrito. Cada procedimiento deberá incluir como mínimo la siguiente información.

- Tipo de material y/o soldadura a ser examinado, incluyendo espesor e información del producto

- La superficie o superficies en donde el examen se llevara a cabo
- Condiciones de la superficie
- Técnica a ser utilizada
- Angulo y forma de las ondas de propagación del material
- Tipo de unidad, frecuencia y tamaño del transductor
- Tipo de instrumentos ultrasónicos
- Descripción de la calibración
- Datos a ser registrados y tipo de registro (manual o mecánico)
- Limpieza después del examen

7.3.2. Requisitos generales del examen excepto para la medición de espesores

El volumen debe examinarse moviendo el palpador sobre la superficie del examen de tal manera que se inspeccione el volumen completo. En cada paso del palpador debe trasladarse por lo menos el 10% de la dimensión perpendicular del transductor (elemento piezo-eléctrico) a la dirección del barrido. La velocidad a ser utilizada para el examen no deberá de exceder 6 plg/seg (152 mm/seg).

7.3.3. Equipo

El examen deberá ser realizado por un instrumento ultrasónico capaz de generar frecuencias como mínimo de 1 MHz a 5 MHz. Este instrumento debe proporcionar una presentación vertical lineal dentro del 5% de la altura total de la pantalla desde el 20% al 80% de la altura de la pantalla calibrada (desde la línea de tiempo base al punto de pantalla máximo calibrado).

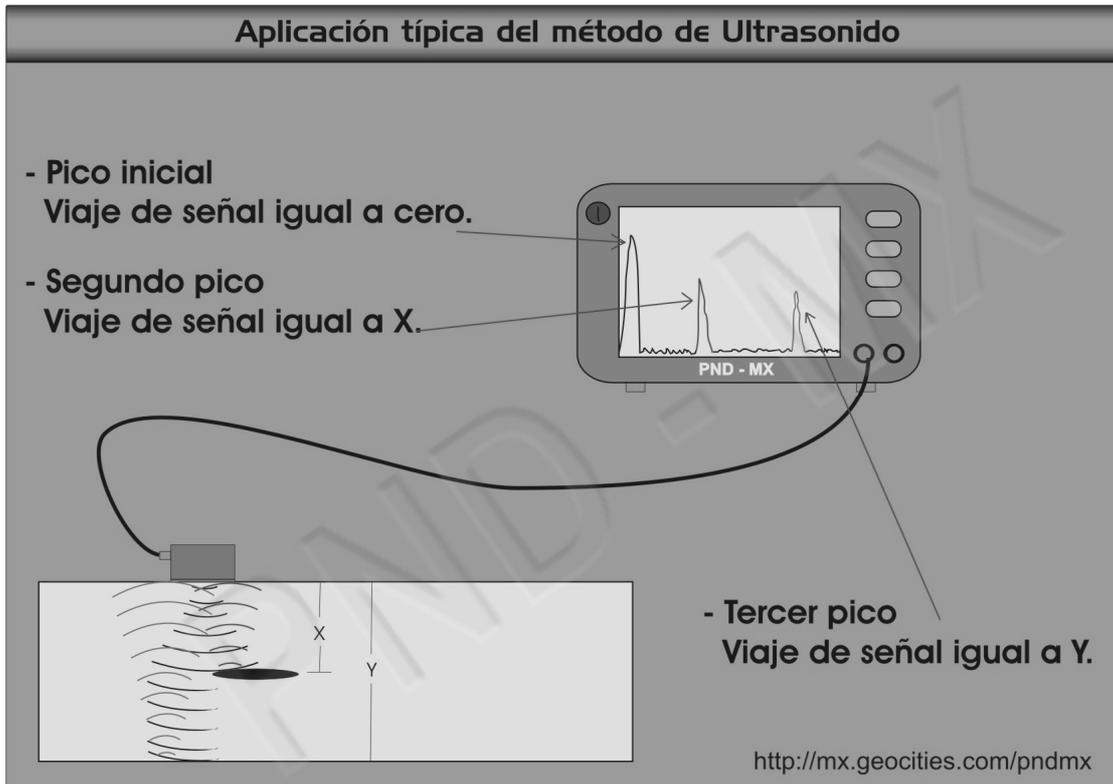
El instrumento ultrasónico deberá utilizar un control de amplitud exacta sobre su gama útil $\pm 20\%$ del coeficiente de amplitud nominal, para permitir la medición de las indicaciones más allá del rango lineal vertical en la pantalla.

7.3.4. Chequeo y calibración del equipo

El correcto funcionamiento del equipo deberá ser chequeado y el equipo deberá ser calibrado, al inicio y al final de cada examen, cuando se cambie el personal que manipulará el equipo y cuando se sospeche de su mal funcionamiento como mínimo.

Si durante una prueba se llegara a determinar que el equipo no funciona correctamente, todo lo examinado anteriormente desde su última revisión del equipo deberá ser re chequeado.

Figura 27. **Método ultrasónico**



Fuente: <http://mx.geocities.com/pndmx>

7.4. Examen por medio de líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes es un método específico en la detección de discontinuidades que se encuentran abiertas a la superficie en materiales no porosos. Las discontinuidades típicas detectables por este método son:

- Grietas
- Laminaciones

- Traslapes en frío
- Porosidades

En principio el líquido penetrante es aplicado en la superficie de prueba a inspeccionar, este penetra en las discontinuidades, luego el exceso de penetrante es eliminado. La superficie es secada y el revelador es aplicado. El revelador funciona como absorbente del penetrante que ha quedado atrapado en las discontinuidades y como superficie de contraste. El tinte en el penetrante puede ser visible o fluorescente (visible bajo el uso de luz negra).

7.4.1. Generalidades

El examen por medio de líquidos penetrantes deberá ser realizado de acuerdo a procedimientos escritos, cada procedimiento deberá tener como mínimo la siguiente información:

- El material, forma o tamaño a ser inspeccionado y la longitud de la inspección
- Tipo (número o designación si es posible) de cada penetrante, removedor, emulsificante y revelador
- Detalles del proceso para la prelimpieza y el secado, incluyendo los materiales usados en la limpieza y el tiempo de secado
- Detalles del proceso para la aplicación del penetrante, tiempo de penetración y temperatura de la pieza de prueba si está fuera de 60 a 125° F
- Detalles del proceso para la eliminación del penetrante y para el secado de la superficie al aplicar el revelador

- Detalles del proceso para la aplicación del revelador y el tiempo de revelado e interpretación
- Detalles del proceso para la limpieza posterior

7.4.2. Revisión del procedimiento de inspección

- Siempre que un cambio o sustitución sea hecho en tipo o familia de materiales o en la técnica de inspección
- Siempre que un cambio o sustitución sea hecho en el tipo de materiales o proceso de prelimpieza
- En cualquier cambio en las partes a inspeccionar, que pudiera cerrar las discontinuidades o dejar depósitos que interfieran con la inspección, ejemplo: chorro de arena o granalla así como ataque de ácido

7.4.3. Control de contaminantes

Cuando este artículo sea usado se debe tener un certificado de todos los materiales penetrantes usados en aleaciones en base níquel, acero inoxidable, autenitico y titanio. Estos certificados deben incluir el nombre del fabricante, el número de lote y resultados obtenidos. La aplicación de este artículo debe estar de acuerdo a los requerimientos del código.

- Cuando se inspeccionen aleaciones en base níquel, todos los materiales deben ser analizados individualmente para el contenido de sulfuros de la manera siguiente:

- Cuando una muestra individual de penetrante con excepción del removedor sea preparada para el análisis calentando 50 gramos del material en vidrio petri de 150 mm de diámetro a una temperatura de 194 a 212°F por 60 minutos.
- El análisis del residuo debe ser como sigue:
 - Si el residuo es menor a 0,0025 gr. el material es aceptado sin mayor análisis.

7.4.4. Preparación de la superficie

En general, los resultados satisfactorios pueden ser obtenidos cuando la superficie de la parte es de soldadura, de rolado, de fundido o de forjado. La preparación de la superficie por esmerilado, maquinado u otro medio puede ser necesaria cuando las irregularidades pudieran enmascarar indicaciones de discontinuidades inaceptables.

Antes de la inspección por penetrantes, la superficie a ser inspeccionada y todas las áreas adyacentes dentro de 1" deben estar secas y libres de cualquier material que afecte la inspección. Pueden ser usados agentes típicos de limpieza como detergentes, solventes orgánicos, soluciones decapantes y removedores de pintura. El método de limpieza es una parte importante en el proceso de inspección.

7.4.5. Secado después de la inspección

Después de la limpieza, el secado de las superficies a inspeccionar debe ser realizado por evaporación normal o con aire caliente. Un período mínimo de tiempo debe ser establecido para asegurar que la solución limpiadora se ha evaporado antes de la aplicación del penetrante.

7.4.6. Inspección

Técnica para temperatura estándar.

La temperatura del penetrante y de la superficie de prueba no debe ser menor a 60° F ni mayor a 125° F, en toda la inspección. El calentamiento o el enfriado de la pieza de prueba es permitida siempre y cuando se cumpla con el rango de temperatura y tiempos estipulados.

7.4.7. Aplicación del penetrante

El penetrante puede ser aplicado por cualquier medio, por ejemplo: inmersión, brocha o aspersión. Si el penetrante es aplicado por aspersión con aire comprimido el uso de filtros es obligatorio para evitar contaminación con grasa o agua. Después del tiempo de penetración debe ser removido el exceso del penetrante tomando en cuenta no remover penetrante de las discontinuidades. El exceso de agua de los penetrantes lavables con agua debe ser removido por aspersión de agua. La presión del agua no debe ser mayor a 110°F.

7.4.8. Penetrantes post-emulsificables

Los penetrantes post-emulsificables deben ser aplicados por aspersión o inmersión. El tiempo de emulsificación es crítico y gobernado por la rugosidad superficial y el tipo de discontinuidad buscada. No debe exceder de 5 min. a menos que otros tiempos hayan sido calificados para la prueba después de la emulsificación, la mezcla debe ser removida por agua usando el mismo proceso que en el penetrante lavable con agua.

7.4.9. Penetrantes removibles con solvente

El exceso de penetrante removible con solvente debe de quitarse por absorción con un trapo o papel absorbente, repitiendo la operación hasta que la mayoría de los residuos finales sean removidos con un trapo ligeramente humedecido con solvente. Para minimizar la remoción del penetrante en las discontinuidades debe tenerse cuidado de no usar removedor en exceso. El uso del removedor sobre la pieza de manera directa está prohibido.

7.4.10. Secado después de la remoción del penetrante

Para los penetrantes lavables con agua o post-emulsificables, las superficies pueden ser secadas con aire circulante caliente siempre y cuando las temperaturas no sean mayores a 125°F.

Para removibles con solvente, las superficies pueden ser secadas con evaporación normal, con un trapo seco o aire forzado.

7.4.11. Revelado

El revelador debe ser aplicado tan pronto como sea posible. El intervalo de tiempo no debe exceder a lo estipulado en el procedimiento. Una aplicación insuficiente de revelador puede no hacer visible las discontinuidades, inversamente una aplicación excesiva del revelador puede enmascarar las indicaciones. Con penetrantes visibles solo debe ser usado revelador húmedo. Con penetrantes fluorescentes puede ser usado revelador húmedo o seco.

El revelador seco debe ser aplicado solo en superficies secas por medio de un cepillo suave, un aplicador en polvo, una pistola u otro medio pero este debe ser aplicado uniformemente.

Antes de la aplicación del removedor húmedo tipo suspensión a la superficie de prueba, el revelador debe ser fuertemente agitado para asegurar la adecuada dispersión de las partículas suspendidas.

- Aplicación del removedor acuoso. El revelador acuoso puede ser aplicado a superficies húmedas o secas y debe ser aplicado por inmersión, brocha, aspersion u otros medios que proporcionen una capa delgada y uniforme sobre la superficie de prueba. El tiempo de secado puede ser reducido si se usa aire caliente, siempre que se cumpla el rango de temperatura aceptable.
- Aplicación del revelador no-acuoso. Debe ser aplicado solo a superficies secas y por aspersion, excepto cuando por seguridad o por acceso no sea posible. Bajo tales condiciones el revelador puede ser aplicado con brocha. El secado debe ser por evaporación normal.

Figura 28. **Maquinaria a utilizar en el ensayo por líquidos penetrantes**



Fuente: www.encontrol.com

7.4.12. Interpretación

El tamaño verdadero y tipo de discontinuidad son difíciles de evaluar si el penetrante se expande excesivamente en el revelador. Consecuentemente, la superficie debe estar observada de cerca durante la aplicación del revelador. Al aparecer las indicaciones, las cuales tienden a expandirse profusamente.

La interpretación final, debe ser hecha de 7 a 30 min. Si las indicaciones al expandirse no aceptaran los resultados de inspección se permiten tiempos de interpretación mayores, también si la superficie a ser inspeccionada es muy grande.

7.5. Examen visual

Una soldadura será aceptable por el método de inspección visual si en la inspección se muestra lo siguiente:

- No hay grietas con cráter, grietas superficiales o de arco cerca de las uniones soldadas.
- La frecuencia de la porosidad de la superficie de la soldadura no excederá de un clúster (uno o más poros) en una distancia de 100 mm (4 pulgadas) de longitud y el diámetro de cada grupo no superior a 2,5 mm (3 / 32 pulgada.)

Una soldadura que no cumple con los criterios que figuran en el inciso anterior será reparada antes de la prueba hidrostática de la siguiente manera:

- Cualquier defecto deberá ser removido por medios mecánicos o procesos térmicos. Cada soldadura de arco defectuosa descubierta en o cerca a las uniones soldadas será reparada por trituración y volver a soldar según sea necesario, las cuales deberán ser soldadas al ras de la plancha de acero.
- Es necesario volver a soldar si el espesor resultante es menor que el mínimo requerido para el diseño o las condiciones de la prueba hidrostática.

- La soldadura de reparación, se examinarán visualmente para detectar defectos.

Figura 29. Inspección visual



Fuente: www.encontrol.com

7.6. Prueba de vacío

La prueba de vacío se realiza mediante una caja de pruebas aproximadamente de 150 mm (6 pulgadas) de ancho por 750 mm (30 pulgadas) de largo con una ventana transparente en la parte superior, que proporciona una visibilidad adecuada para ver el área bajo inspección. Durante las pruebas, la iluminación deberá ser adecuada para una correcta evaluación e interpretación de la prueba. El fondo abierto deberá ser sellado contra la superficie del tanque por una junta apropiada.

Las pruebas de vacío se llevarán a cabo conforme a un procedimiento escrito preparado por el fabricante del tanque. El procedimiento deberá requerir:

- Realización de un examen visual de la parte inferior y soldaduras antes de realizar la prueba de vacío.
- Verificación de la condición de la caja de vacío y sus sellos de juntas.
- Verificar que no hayan burbujas o fugas grandes.
- La aplicación de la solución deberá ser sobre un área seca, de tal manera que el área sea totalmente mojada y que se produzca una mínima formación de burbujas.

Un vacío parcial de 21 kPa (3 lbf/in.2/6 mm Hg) a 35 kPa (5 lbf/in.2/10 en Hg) se utilizará para la prueba. Si es especificado por el comprador, una segunda prueba de vacío parcial de 56 kPa (8 lbf/in.2/16 mm Hg) a 70 kPa (10 lbf/in.2/20 mm Hg) se llevará a cabo para la detección de fugas muy pequeñas.

El fabricante deberá determinar que cada operador cumpla los siguientes requisitos:

- Tener una visión (con corrección, si es necesario) para ser capaz de leer a una distancia de no menos de 300 mm (12 pulgadas) y ser capaz de distinguir y diferenciar contrastes entre los colores utilizados. Los examinadores deberán ser sometidos a revisiones anuales para asegurar el cumplimiento de estos requisitos.
- El examinador debe de saber la correcta realización del examen e interpretar y evaluar los resultados.

La prueba de vacío deberá tener por lo menos 50 mm (2 pulgadas) de superposición respecto a la superficie.

Los límites de temperatura para el metal deberán estar entre los 4 °C (40 °F) y 52 °C (125 °F), a menos que la solución de la prueba funcione a temperaturas fuera de estos límites. Si se excede los límites de temperatura deberá tener como mínimo de intensidad de luz de 1000 lux (100 pc). El vacío se mantendrá como mínimo 5 segundos o el tiempo necesario para ver el área bajo prueba. Un registro o informe de la prueba, incluyendo una declaración de la temperatura y la intensidad de luz deberá ser presentado por el inspector.

La presencia de una fuga, indicada por la formación continua de burbujas o espuma, producidas por el aire que pasa a través de la placa o la presencia de una fuga de gran abertura, indicada por un rápida explosión burbujas en el ajuste inicial de la caja de vacío es inaceptable. Las fugas serán reparadas y vuelto a probar.

Como método alternativo de la prueba de vacío esta la prueba de gas el cual indica la integridad de la soldadura. Esta deberá de cumplir los siguientes requisitos.

- Cada prueba de gas deberá ser realizada de acuerdo a un procedimiento escrito y aprobado por el comprador y que tendrá como mínimo: el tipo de gas a utilizar, el equipo a ser utilizado la permeabilidad del suelo y el método o técnica a ser utilizada.
- La técnica será capaz de detectar las fugas de 1×10^{-4} Pa m³/s (1×10^{-3} cm³/s) o más pequeños.

8. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA Y ACREDITACIÓN DEL SOLDADOR

8.1. Requisitos generales

El constructor deberá especificar los procedimientos de soldadura y deberá realizar pruebas documentadas para cumplir con los requerimientos del Código ASME.

Los procedimientos de soldadura utilizados deberán producir piezas soldadas con las propiedades mecánicas requeridas por el diseño.

8.2. Pruebas de impacto

Para todos los materiales usados a temperatura por debajo de 10 °C (50 °F), la calificación de la soldadura para juntas verticales deberá incluir una prueba de impacto del material soldado. Si la junta vertical es realizada por un proceso automático o semiautomático, la prueba de impacto de la zona afectada por el calor también deberá ser realizada.

Los ensayos de impacto deberán tener como mínimo los siguientes valores:

- Para secciones de acero con una resistencia de 70 ksi o menos. 20 J (15 pies-libras), promedio de tres juntas.

- Para secciones de acero con una resistencia entre 70ksi y 80 ksi. 27 J (20 pies-libras), promedio de tres juntas.
- Para secciones de acero con una resistencia de más de 80ksi. 34 J (25 pies-libras), promedio de tres juntas.
- Para placas de espesor mayor que 40 mm (1-1/2 pulgadas), estos valores deberán ser incrementados 7 J (5 pies-libras) por cada 12,5 mm (1 / 2 pulgadas). Es permitido interpolar.

Las muestras de las pruebas de impacto deberán ser tomadas en forma paralela y a una distancia no mayor de 1,5 mm (1 / 16 pulgadas) de la superficie del material. La muestra deberá ser recogida con la soldadura completa con excepción de la zona fracturada.

8.3. Acreditación del soldador

El constructor deberá realizar pruebas a todos los soldadores para demostrar su capacidad de realizar soldaduras según las normas descritas anteriormente.

Los registros de las pruebas para la acreditación de soldadores deberán incluir lo siguiente:

- Cada soldador deberá tener asignado un número de identificación, letra o símbolo por el constructor para su correcta identificación.
- El constructor deberá tener los registros actualizados de cada soldador con fechas y resultados de todas las pruebas. Estos registros tendrán que ser certificados por el constructor y deberán estar accesibles para el inspector.

8.4. Identificación de las juntas soldadas

Cada soldador deberá identificar con una marca estampada, ya sea a mano o a máquina, el número de identificación asignado por el constructor. Estas marcas deberán estar en intervalos que no excedan 1 m (3 pies) a lo largo de toda la soldadura terminada. Las soldaduras en los techos, conexiones y pasos de hombres no requieren la identificación del soldador.

CONCLUSIONES

1. Los tanques de almacenamiento cilíndrico vertical son estructuras de acero cuya función es almacenar fluidos en forma segura, práctica y eficiente por medio de la correcta combinación de todos los elementos estructurales que lo componen.
2. La información recabada y establecida previo al diseño tal como el fluido a almacenar, capacidad del tanque y propiedades del suelo, es de mucha importancia ya que sobre estos datos se basa el diseño del tanque.
3. Existen diversos métodos de inspección de juntas soldadas, es a criterio del inspector cual método utilizar al momento que se inspeccionen las mismas.
4. Es de suma importancia que el constructor realice todas las pruebas necesarias al equipo de soldadores para garantizar la correcta ejecución de las mismas.

RECOMENDACIONES

1. Antes de realizar un diseño, es necesario que se lleve a cabo un estudio de suelo, ya que este definirá la capacidad del tanque e inclusive la factibilidad de la construcción del mismo, porque si se pronostica un mal suelo, puede que las medidas precautorias sean económicamente prohibitivas.
2. Debe haber una correcta comunicación entre el diseñador y el cliente ya que esto permite que el diseño se aplique mejor a los requerimientos del cliente y el cliente conozca los parámetros bajo cuales se diseña el tanque de almacenamiento.
3. Es necesario que cada soldador este correctamente identificado para poder llevar un orden y hacer más fácil la identificación del mismo a la hora de una soldadura deficiente.
4. Al momento de inspeccionar las juntas soldadas se puede tener como referencia de ayuda las normas ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) además de las normas API 650.

BIBLIOGRAFIA

1. American Concrete Institute. Comité 318. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. Estados Unidos de América: ACI Journal, 2001. 670 p.
2. American Institute of Steel Construction. *Manual of Steel Construction Allowable Stress Design*. 9a ed. USA: AISC, 1994. 1993 p. ISBN 01-56424-000-2.
3. American Petroleum Institute. *Welded steel tanks for oil storage*. API Standard 650. 10a ed. USA: API, 2007. 393 p.
4. CHEREMISINOFF, Paul N. *Storage Tanks*. USA: Gulf, 1996. 303 p. ISBN 08-7201-332-4.
5. GAYLORD, Edwin H. Jr. ; GAYLORD, Charles N. *Structural Engineering Handbook*. USA: McGraw-Hill, 1968. 1248 p. ISBN 07-023115-X.