



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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS SOBRE FABRICACIÓN DE TANQUE
VERTICAL DE 500 M³ PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, BAJO NORMAS
API-650 Y AWWA D-100**

Kevin Augusto Sermeño Fernández

Asesorado por el Ing. Erwin Antonio Marroquín Ortiz

Guatemala, marzo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS SOBRE FABRICACIÓN DE TANQUE
VERTICAL DE 500 M³ PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, BAJO NORMAS
API-650 Y AWWA D-100**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

Kevin Augusto Sermeño Fernández

Asesorado por el Ing. Erwin Antonio Marroquín Ortiz

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

Ingeniero Civil

GUATEMALA MARZO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS SOBRE FABRICACIÓN DE TANQUE
VERTICAL DE 500 M³ PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, BAJO NORMAS
API-650 Y AWWA D-100**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha abril de 2016.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'KAS' with a large flourish extending upwards and to the right.

Kevin Augusto Sermeño Fernández

Guatemala, 17 de septiembre del 2018.

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Planeamiento
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por este medio me dirijo de la manera más cordial a su persona, para hacer de su conocimiento que he revisado, además de haber efectuado las correcciones del caso, sobre el trabajo de graduación titulado: **"ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS SOBRE FABRICACION DE TANQUE VERTICAL DE 500 M3 PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, BAJO NORMAS API-650 Y AWWA D-100"**, elaborado por el estudiante de Ingeniería Civil Kevin Augusto Sermeño Fernandez con carné No. 201025400.

El mencionado trabajo de graduación llena los requisitos para mi aprobación, por lo anterior, en mi calidad de asesor, me permito se continúe el proceso de aprobación.

Atentamente:



INGENIERO
Erwin A. Marroquín Ortiz
COLEGIADO 12,945

Ing. Civil Erwin Antonio Marroquin Ortiz
Colegiado No.12,945
ASESOR



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 11 de enero de 2019

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

Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS SOBRE FABRICACIÓN DE TANQUE VERTICAL DE 500 M³ PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, BAJO NORMAS API-650 Y AWWA D-100** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Kevin Augusto Sermeño Fernández, quien contó con la asesoría del Ing. Erwin Antonio Marroquín Ortíz.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la ingeniería nacional 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

Guillermo Melini

Ing. civil, Guillermo Francisco Melini Salguero
 Jefe Del Departamento de Planeamiento



**FACULTAD DE INGENIERIA
 DEPARTAMENTO
 DE
 PLANEAMIENTO
 U S A C**

/mrrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Erwin Antonio Marroquín Ortiz y Coordinador del Departamento de Planeamiento Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Kevin Augusto Sermeño Fernández **ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS SOBRE FABRICACIÓN DE TANQUE VERTICAL DE 500 M³ PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, BAJO NORMAS API-650 Y AWWA D-100** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2019

/mmm.





DTG. 162.2019

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: **ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS SOBRE FABRICACIÓN DE TANQUE VERTICAL DE 500 M³ PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA, BAJO NORMAS API-650 Y AWWA D-100**, presentado por el estudiante universitario: **Kevin Augusto Sermeño Fernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, marzo de 2019



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por guiar siempre mis pasos y por sus bendiciones en mi vida.
Mis padres	Joaquín Sermeño y Silvia Fernández, por su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida.
Mis hermanos	Emily y Jonathan Sermeño
Mis abuelos maternos	Jorge Fernández y Francisca Zapeta
Mis abuelos paternos	Joaquín Sermeño y Clara Luz González
Familia Sermeño	Tíos, primos y demás familia.
Familia Fernández	Tíos, primos y demás familia.
Mis amigos	Roberto Mazariegos, Willian Martínez, Jorge Castellanos, Edgar López, Luis Felipe Hernández, Frizly Reyes, José Pablo Araiz, Douglas Mansilla
Mi novia	Nieves Marroquín

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la fuerza, persistencia y dedicación necesaria para permitirme culminar esta meta.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme permitido formar parte de esta gran casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas necesarias para culminar mis estudios e inculcarme valores que servirán en mi formación profesional.
Mis padres	Por su apoyo y sacrificios que me condujeron a donde ahora estoy.
Los compas	Por su amistad y apoyo demostrado en todo momento.
Frizly Reyes	Por la buena amistad, el apoyo y consejos que ayudaron a no rendirnos para que ambos concluyéramos esta meta.
Cindy Sermeño	Por tu amistad y cariño incondicional.

Nieves Ortiz

Por tu amor incondicional, por siempre estar en las buenas y en las malas y ser uno de los pilares más importantes en mi vida.

Ing. Erwin Marroquín

Por su amistad y colaboración en la asesoría y revisión necesaria para concluir este trabajo.

Walter Salomón

Por su amistad, experiencia compartida y valioso apoyo, los cuales fueron esenciales para culminar este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Generalidades	1
1.1.1. Definiciones y conceptos	1
1.1.2. Usos de tanques metálicos para agua.....	1
1.2. Clasificación de los tanques	2
1.2.1. Por su geometría	2
1.2.1.1. Cilíndricos horizontales.....	2
1.2.1.2. Cilíndricos verticales.....	3
1.2.1.3. Esféricos	4
1.2.2. Por su ubicación	5
1.2.2.1. Elevados	5
1.2.2.2. Enterrados	6
1.2.2.3. Semienterrados	6
1.2.2.4. Superficiales	6
1.2.3. Por su función.....	7
1.2.4. Por su material de fabricación	7

1.3.	Tipos de techos para tanques verticales		10
1.3.1.	Techos fijos		10
1.3.2.	Techos flotantes		10
1.3.3.	Abiertos		11
1.4.	Tipos de fondo en tanques verticales.....		11
1.4.1.	Fondo plano		11
1.4.2.	Fondo con pendiente hacia afuera		12
1.4.3.	Fondo con pendiente hacia adentro		13
1.4.4.	Fondo con pendiente simple		13
1.5.	Códigos aplicables		14
1.6.	Material por almacenar.....		15
1.6.1.	Agua potable		15
1.6.2.	Agua de proceso		16
1.6.3.	Efecto del agua en los tanques de acero		16
1.7.	Placas comerciales para la fabricación de tanques		16
1.8.	Soldadura.....		18
1.8.1.	Tipos de juntas		19
1.8.1.1.	Juntas a traslape		20
1.8.1.2.	Juntas a tope.....		20
1.8.1.3.	Juntas de filete		22
1.9.	Accesorios.....		23
1.9.1.	Boquillas.....		23
1.9.2.	Escalera		23
1.9.3.	Plataformas y barandas.....		25
2.	APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE NORMAS.....		27
2.1.	Consideraciones		27

2.2.	Datos para diseño del tanque.....	27
2.2.1.	Cantidad de anillos	28
2.2.2.	Corrosión permisible.....	29
2.3.	Norma API-650.....	30
2.3.1.	Chequeos de espesores del cuerpo	30
2.3.1.1.	Esfuerzos máximos permisibles	31
2.3.2.	Diseño del fondo.....	32
2.3.3.	Diseño del cuerpo.....	33
2.3.3.1.	Paredes del cuerpo.....	34
2.3.4.	Cargas por sismo.....	36
2.3.4.1.	Momento de volteo por sismo.....	36
2.3.4.2.	Chequeo por compresión en el cuerpo del tanque	43
2.3.5.	Cargas por viento	43
2.4.	Norma AWWA D-100.....	45
2.4.1.	Diseño del cuerpo.....	46
2.4.1.1.	Paredes del cuerpo.....	48
2.4.2.	Diseño del fondo.....	49
2.4.3.	Cargas por sismo.....	49
2.4.3.1.	Momento de volteo por sismo.....	49
2.4.4.	Cargas por viento	51
2.5.	Resumen de diseños.....	51
3.	FACTORES DE CONSIDERACIÓN PARA COSTOS DE FABRICACIÓN.....	53
3.1.	Costos	53
3.1.1.	Qué son costos.....	53

3.1.2.	Tipos de costos	53
3.1.2.1.	Costos directos.....	53
3.1.2.2.	Costos indirectos.....	54
3.2.	Factores básicos por considerar para elaborar un presupuesto de tanques verticales de acero.....	54
3.2.1.	Localización y ubicación.....	54
3.2.2.	Temperatura del lugar	55
3.2.3.	Diseño	55
3.2.3.1.	Presión manométrica a la que estará sometido el tanque	56
3.2.4.	Conocimientos básicos de construcción.....	56
3.2.4.1.	Materiales.....	58
3.2.5.	Tiempo de construcción	59
3.2.6.	Funcionalidad	60
3.2.7.	Durabilidad	60
3.2.8.	Calidad	61
3.2.9.	Planificación	61
3.2.9.1.	Actividades particulares.....	61
3.2.10.	Planos de taller.....	62
3.3.	Aceros utilizados en la construcción de tanques.....	62
3.3.1.	Lámina negra y placa	63
3.4.	Fabricación y montaje	63
3.4.1.	Compra de materiales	63
3.4.2.	Trabajos de taller.....	64
3.4.2.1.	Corte y biselado de planchas	64
3.4.2.2.	Rolado de planchas.....	66
3.4.3.	Transporte y almacenaje de materia prima	68

3.4.4.	Trabajos en campo	68
3.4.4.1.	Soldadura	69
3.4.4.2.	Montaje del fondo	70
3.4.4.3.	Montaje del cuerpo del tanque.....	73
3.4.4.4.	Limpieza e inspección	76
3.5.	Últimas pruebas.....	77
3.5.1.	Verticalidad.....	77
3.5.2.	Redondez	78
3.5.3.	Pruebas radiográficas.....	78
3.5.4.	Prueba hidrostática.....	79
3.6.	Accesorios para la fabricación de la estructura	80
3.6.1.	Escaleras y plataformas	80
3.6.2.	Boquillas	80
3.7.	Acabados y pintura.....	81
3.7.1.	Pinturas epóxicas	82
4.	ANÁLISIS DE COSTOS PARA TANQUES VERTICALES DE ACERO.....	83
4.1.	Cuantificación de planchas de acero.....	83
4.1.1.	Según diseño API-650.....	84
4.1.2.	Según diseño AWWA D-100.....	86
4.2.	Costos unitarios para corte de planchas metálicas	88
4.2.1.	Consumibles	89
4.3.	Costos unitarios para rolado de planchas metálicas	91
4.4.	Cuantificación de la soldadura.....	93
4.4.1.	Según diseño API-650.....	93
4.4.1.1.	Equipo	98
4.4.1.2.	Consumibles de soldadura	98

4.4.2.	Según diseño AWWA D-100	99
4.4.2.1.	Equipo	101
4.4.2.2.	Consumibles de soldadura	101
4.5.	Integración de costos	102
4.6.	Análisis y comparaciones generales	103
CONCLUSIONES		107
RECOMENDACIONES		109
BIBLIOGRAFÍA		111
ANEXOS		113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tanque horizontal	3
2.	Tanque vertical.....	4
3.	Tanque esférico.....	5
4.	Tanque horizontal de aluminio	8
5.	Tanques plásticos.....	9
6.	Tanque fabricado de concreto.....	10
7.	Fondo plano.....	12
8.	Fondo con pendiente hacia afuera	12
9.	Fondo con pendiente hacia adentro	13
10.	Fondo con pendiente simple	14
11.	Juntas a traslape.....	20
12.	Juntas a tope.....	21
13.	Tipos de ranuras para juntas a tope.....	21
14.	Tipos de unión soldadura de filete	22
15.	Tanque vertical con escalera vertical	24
16.	Tanque vertical con escalera helicoidal.....	24
17.	Distribución de anillos del tanque.....	29
18.	Masas efectivas.....	38
19.	Centroides de fuerzas sísmicas	38
20.	Gráfica de factor K.....	39
21.	Procedimiento básico de construcción	57
22.	Sistema de corte semiautomático	65
23.	Máquina para rolado de planchas metálicas	66

24.	Consideraciones para rolado de planchas.....	67
25.	Cimentación anular del tanque	70
26.	Traslapes.....	71
27.	Montaje del fondo.....	72
28.	Soldadura de orilla del fondo	73
29.	Montaje del cuerpo	74
30.	Espaciadores para soldadura	75
31.	Soldadura interna del cuerpo.....	76
32.	Distribución de planchas para norma API.....	84
33.	Distribución de planchas del fondo	85
34.	Distribución de planchas para norma AWWA.....	87
35.	Diseño de junta vertical a tope.....	94
36.	Diseño de junta horizontal a tope.....	95
37.	Diseño de junta plana de filete traslapada	96
38.	Comparación de costos de fabricación.....	105
39.	Comparación de peso de la estructura	106

TABLAS

I.	Datos para diseño del tanque	28
II.	Esfuerzos permisibles de tipos de acero	32
III.	Espesores para el cuerpo del tanque.....	33
IV.	Espesores calculados según api 650.....	36
V.	Peso total del cuerpo	40
VI.	Presiones de diseño para velocidad de 100 MPH (160 km/h)	44
VII.	Tipo de eficiencia de juntas.....	46
VIII.	Esfuerzo permisible de diseño, S.....	47
IX.	Espesor mínimo de placas contacto con agua.....	47
X.	Espesores calculados según AWWA-D100	49

XI.	Coeficiente de reducción de fuerza, R_w	50
XII.	Resumen de espesores para tanque de 500m ³	52
XIII.	Corte para boquillas HA-311-Acetileno	66
XIV.	Tolerancia de redondez.....	78
XV.	Sistemas para preparación de superficie	81
XVI.	Resumen de espesores para tanque de 500m ³	83
XVII.	Distribución de peso para tanque API-650	86
XVIII.	Distribución de peso para tanque AWWA D-100.....	88
XIX.	Equipo corte (4,78 mm).....	88
XX.	Equipo corte (6,35 mm).....	89
XXI.	Equipo corte (7,94 mm).....	89
XXII.	Corte (consumibles boquilla HA-311-2).....	90
XXIII.	Resumen de consumibles según tanque API.....	90
XXIV.	Corte (consumibles boquilla HA-311-2).....	91
XXV.	Resumen de consumibles según tanque AWWA.....	91
XXVI.	Equipo rolado (4,78 mm).....	92
XXVII.	Equipo rolado (6,35 mm).....	92
XXVIII.	Equipo rolado (7,94 mm).....	92
XXIX.	Tamaño mínimo de filete de soldadura	94
XXX.	Equipo de soldadura tanque API.....	98
XXXI.	Consumibles de soldadura para tanque API	99
XXXII.	Tamaño mínimo de filete de soldadura	99
XXXIII.	Equipo de soldadura tanque AWWA.....	101
XXXIV.	Consumibles soldadura tanque AWWA.....	101
XXXV.	Integración de costos tanque API.....	102
XXXVI.	Integración de costos tanque AWWA.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

Xs	Altura del fondo al centro de gravedad del tanque
X1	Altura del fondo al centro de gravedad de W1
X2	Altura del fondo al centro de gravedad de W2
Y	Altura del nivel de anillo del tanque
Hp	Altura del nivel de diseño del líquido
H	Altura del nivel del líquido de diseño
H	Altura del tanque
Ht	Altura total del cuerpo del tanque
Rw	Coefficiente de reducción de fuerza
S	Coefficiente de sitio
C1, C2	Coefficientes laterales sísmicos
Ca	Corrosión admisible
G	Densidad relativa del líquido
D	Diámetro nominal
E	Eficiencia de la junta
K	En función de la relación D/H
Sd	Esfuerzo permisible por condiciones de diseño
St	Esfuerzo permisible por fuerza hidrostática
s	Esfuerzo permitido de diseño
t	Espesor del fondo del cuerpo
Td	Espesor por condiciones de diseño
Tt	Espesor por condiciones de fuerza hidrostática
I	Factor de importancia
Z	Factor de zona sísmica
h	Hora

PSI	Libras fuerza por pulgadas cuadradas
Mpa	Mega pascales
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
MPH	Millas por hora
Fa	Mínimo esfuerzo de fluencia
M	Momento de volteo
Mw	Momento producido por el viento
T	Periodo
W1, W2	Peso de la masa efectiva
Wt	Peso del líquido contenido
Wc	Peso del perímetro del manto y porción de techo
W	Peso muerto del tanque
Ws	Peso total del cuerpo del tanque
Wr	Peso total del techo
ft	Pies
Pv	Presión del viento
In	Pulgadas
Ton	Toneladas
Vh	Velocidad media en altura
V33	Velocidad promedio a 33 ft

GLOSARIO

AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica
Anclaje	Su principal función es evitar el desplazamiento de las estructuras en todas sus direcciones.
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWWA	American Water Works Association
Carga hidrostática	Presión ejercida por un líquido en reposo.
Código	Es un documento que debe ser considerado como obligatorio para su uso dentro de su alcance establecido.
Corrosión	Desgaste que se presenta en elementos estructurales por causa de factores externos como humedad.
Gravedad específica	Propiedad física que tiene un líquido. Se obtiene entre la relación de peso específico de un líquido por el peso específico del agua.

Momento	Magnitud que resulta del producto de una fuerza por una distancia a un punto referente.
Nivel de diseño	Altura del nivel del líquido medida desde el fondo del tanque.
Norma	Documento que contiene métodos y requisitos estandarizados.
Peso específico	Propiedad física que tiene un material. Se obtiene entre la relación de peso por unidad de volumen de una sustancia.
Placa anular	Anillo que bordea la placa del fondo; es donde se debe soldar el cuerpo del tanque.
Presión atmosférica	Fuerza que ejerce el aire sobre la superficie terrestre. Depende de la altura sobre el nivel del mar.
Residuos de escoria	Son residuos o subproductos que se generan durante los procesos de fundición metalúrgicos.
Volátil	Medida de la facilidad con que una sustancia se evapora.

RESUMEN

Actualmente, la industria del acero supera la demanda de las construcciones en concreto, debido a la rapidez de construcción y puesta en marcha de estas estructuras al momento de finalizar su construcción. El acero es clasificado según sus características mecánicas y es distribuido en diferentes calidades, grados y perfiles. En este trabajo de graduación se presenta en forma general un análisis comparativo de los costos en acero que involucran la fabricación del cascarón de tanques verticales con planchas de acero A36, enfocados en el diseño del cuerpo y fondo que proponen las norma API y AWWA.

En el primer capítulo se desarrolla una base teórica en donde se expone la utilidad, tipos, materiales y generalidades de los tanques que se analizarán en este trabajo de investigación, así como características de mayor importancia. En el capítulo dos se detalla el análisis de los diseños del cuerpo del tanque propuesto que involucran normas API y AWWA, con los cuales se podrán obtener los espesores mínimos de las planchas de acero para la fabricación del mismo.

En el capítulo tres se menciona de los aspectos más importantes por considerar para el presupuesto, al construir estas estructuras, así como pruebas necesarias para garantizar el funcionamiento y calidad de los tanques. Por último, el capítulo cuatro se analizan a detalle los costos que genera la fabricación de estas estructuras según el acero requerido por las normas, para así determinar en qué norma se dará un beneficio más grande en relación a los costos.

OBJETIVOS

General

Identificar los procedimientos y características relevantes de fabricación de las normas API-650 y AWWA D-100 con el fin de hacer una comparación costo beneficio.

Específicos

1. Elaborar un marco teórico conceptual que abarque las definiciones fundamentales que se aplicarán en la propuesta
2. Analizar las diferencias de un diseño de tanque vertical bajo la norma API-650 con la norma AWWA-D100.
3. Dar a conocer la aplicación que puedan tener estas estructuras en los diferentes ámbitos de la construcción.
4. Dar a conocer los costos directos que involucran la fabricación de tanques de almacenamiento de placas de acero soldado.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de almacenar el agua para controlar, transportar, distribuir y producir es evidente en la medida en que se desea asegurar un abastecimiento abundante y seguro. Esto tiene una función importante tanto en la industria como en la población.

Para la construcción de un sistema de almacenamiento de líquidos se debe considerar lograr la mayor economía posible, considerando las restricciones de seguridad, ecología y calidad de los productos. Uno de los sistemas más utilizados para el almacenamiento líquidos son los tanques verticales, que son capaces de almacenar grandes cantidades de líquidos de diferentes densidades.

Estos tipos de tanques son fabricados de distintos materiales, desde concreto, acero hasta PVC o fibra de vidrio, dependiendo el uso y capacidad de almacenaje. Actualmente, en Guatemala y la mayoría de países del mundo, están optando por la construcción de estas estructuras a base de planchas de acero que, con un montaje relativamente sencillo y unido a base de soldadura, proporciona una estructura libre de fugas que optimiza el tiempo de construcción y entrega. Uno de los factores más influyentes del uso acero es su relativo bajo costo y mejores propiedades mecánicas en comparación con otros materiales.

Por lo anterior, nace la inquietud de realizar un análisis comparativo costo beneficio para la fabricación del cascarón de un tanque vertical de acero, para almacenamiento de agua, especificando los gastos que involucra el acero, soldadura, fabricación y montaje. Se comparará dos normas de diseño, para

determinar cuál es más económica y segura que otra, principalmente porque la norma API es utilizada para almacenamiento de líquidos derivados del petróleo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades

En Guatemala, almacenar el agua resulta de mucha importancia para la economía y productividad del país. Por esto, día con día se fabrican estructuras que sean capaces de almacenar grandes cantidades volumétricas de fluidos. Por tanto, para el desarrollo del presente trabajo, es necesario definir algunos conceptos para comprender el desarrollo del mismo, el cual se enfocará en los tanques verticales para el almacenamiento de agua.

1.1.1. Definiciones y conceptos

Los tanques de almacenamiento, también llamados estanques, son estructuras que se utilizan como depósitos para contener una reserva de casi cualquier tipo de fluido, el cual puede ser líquido o gaseoso. Estos cuerpos receptores tienen la finalidad de almacenar el fluido para un uso futuro con fines utilitarios o bien para proveer a una comunidad.

1.1.2. Usos de tanques metálicos para agua

En los diferentes sectores del país resulta de mucha importancia almacenar agua para muchas actividades. Cuando se requieren en grandes cantidades, los tanques verticales son una solución acertada para desempeñar los diferentes trabajos, entre los que se puede mencionar:

- Industrias: como materia prima, refrigerante, solvente, agente de transporte o sistemas contra incendios.
- Municipal: para consumo directo o como proceso.
- Agricultura: para riego de cultivos y el consumo en la ganadería.
- Generación de energía: principalmente en centrales hidroeléctricas, en actividades que usan vapor de agua para el movimiento de turbinas.
- En algunas industrias lo utilizan para el almacenaje de material granular o material agrícola.

1.2. Clasificación de los tanques

La elección del tipo de tanque para un proyecto dependerá del servicio para el que será utilizado y su clasificación. La elección podría afectar directamente a los costos y/o necesidades. Los tanques de almacenamiento se pueden clasificar de la siguiente manera.

1.2.1. Por su geometría

La geometría de los tanques es la característica principal, ya que de ella dependerá la capacidad volumétrica del tanque y su ubicación en el terreno. Entre estos se encuentran:

1.2.1.1. Cilíndricos horizontales

Se utilizan para conservar bajas cantidades volumétricas, debido a que están propensos a fallar a corte y flexión. Tienen la facilidad de adaptarse al espacio donde se quieran colocar. Pueden ser cilíndricos o rectangulares.

Figura 1. Tanque horizontal



Fuente: Herberth Alexis Huyhua Muñoz. *Diseño de tanques hidrocarburos*.
<https://es.scribd.com/doc/100485401/Clase-de-Tanques-De-almacenamiento-I>.
Consulta: enero de 2017.

1.2.1.2. Cilíndricos verticales

Son utilizados para almacenar grandes cantidades volumétricas a un bajo costo. Generalmente son cilíndricos y están apoyados sobre el suelo, torres, columnas, entre otros.

Figura 2. **Tanque vertical**



Fuente: De León, Juan Pablo. *Guía para el diseño estructural de cimientos y anclajes de tanques de almacenamiento tipo API-650*. p. 17.

1.2.1.3. Esféricos

Se sostienen mediante columnas que deben ser diseñadas para soportar el peso de toda la estructura. Son destinados al almacenamiento de hidrocarburos ligeros, tales como propano, butano, propileno y amoniaco.

Figura 3. **Tanque esférico**



Fuente: Álvaro Monzón. *Tanques de almacenamiento GLP*. https://www.vega.com/es-ES/home_gt/Aplicaciones/Casos-pr%C3%A1cticos-reales/Medici%C3%B3n-de-nivel-de-LPG-medici%C3%B3n-con-un-sistema-de-presi%C3%B3n-diferencial-electr%C3%B3nico.

Consulta: enero de 2017.

1.2.2. Por su ubicación

Los tanques también se pueden clasificar según el lugar de instalación. Se dividen en:

1.2.2.1. Elevados

Son de forma cilíndrica y están apoyados sobre torres, columnas o pilotes. Este tipo de tanque no necesita de bombas para poder llevar el fluido a su destino, ya que trabajan por gravedad.

1.2.2.2. Enterrados

Son utilizados comúnmente en gasolineras para el almacenamiento de combustible o como cisternas que recogen el agua de lluvia o procedente de un río o manantial. Protegen el fluido a variaciones de temperatura y ofrecen una perfecta adaptación al entorno.

1.2.2.3. Semienterrados

Tienen parte de su estructura bajo el nivel del terreno y parte sobre el nivel del mismo. Se utilizan generalmente cuando la altura topográfica respecto al punto de alimentación es suficiente y el terreno presenta dificultades para la excavación.

1.2.2.4. Superficiales

Son conocidos como tanques verticales de fondo plano y están apoyados sobre una cimentación de concreto en forma de anillo o sobre el suelo mismo, si cumple con las condiciones. Los tanques apoyados a nivel del suelo se clasifican en:

- Tanques abiertos

Se utilizan para almacenar materiales que no son susceptibles a daños por agentes atmosféricos, como agua, vientos clima o contaminación atmosférica. Almacenan fluidos como el potable, para uso industrial, para sistemas contra incendios, entre otros. Este tipo de tanque es el propuesto para realizar el análisis comparativo de los costos de fabricación para este trabajo.

- Tanques a presión

Se les llama así debido a que están cubiertos por techos que hacen que el elemento tenga presiones internas o manométricas, según el fluido contenido. Deben tener un espesor idóneo en el cuerpo que lo conforma, debido a que las fuerzas hidrostáticas pueden impactar en el techo y transmitirse al cuerpo, lo que podría provocar un colapso de la estructura.

1.2.3. Por su función

Los tanques pueden ser clasificados según el uso que se requiera de ellos. En la industria se utiliza generalmente para elaboración de productos específicos o procesos; en otros lugares, principalmente dentro de la minería o agroindustrias, son utilizados para almacenamiento de sustancias con un mayor tiempo de residencia. Generalmente, su capacidad volumétrica es bastante grande comparándolos con los tanques de proceso, ya que permiten una pausa dentro del área productiva y transporte. También son utilizados en zonas rurales, municipales, hospitales, empresas, entre otros. que requieren almacenar agua para emergencia.

1.2.4. Por su material de fabricación

La selección del material para la construcción de tanques se basa principalmente en el costo de los materiales, el tiempo de fabricación y la resistencia a la corrosión que el material pueda brindar. Entre los materiales comúnmente utilizados están:

- **Tanques metálicos**

Son fabricados de acero y sus variaciones como el inoxidable o aluminio. Son los más comunes debido a que es un material fácil de adquirir, su construcción es rápida, eficiente y de bajo costo. Almacenan líquidos y gases.

Figura 4. **Tanque horizontal de aluminio**



Fuente: Constructora Ixtepete. <https://www.ixtepete.com/Tanques.html>. Consulta: enero de 2019.

- **Tanques plásticos**

Tienen un menor costo en comparación con los metálicos; además, poseen varias características que lo hacen tener una alta demanda en la actualidad. Entre sus ventajas se encuentra que son indiferentes a la corrosión, livianos, no necesitan mantenimiento continuo, son reforzados con fibra de vidrio. Son resistentes a cargas, pero diseñados para capacidades pequeñas y medianas.

Figura 5. **Tanques plásticos**



Fuente: Albiz, México. <http://www.mx.all.biz/tanques-de-plastico-reforzado-con-fibra-de-vidrio-g29131#.WBvVyfnhDIU>. Consulta: enero 2017.

- Tanques de concreto

Su costo es más elevado en comparación con el de acero. Puede ocasionar muchos problemas debido a que debe ser de baja permeabilidad y resistente a la corrosión química. Su tiempo de fabricación es elevado debido al curado del concreto.

Figura 6. **Tanque fabricado de concreto**



Fuente: Centro de agroecología y permacultura Las Cañadas.
<http://www.bosquedeniebla.com.mx/eco05.htm>. Consulta: enero de 2017.

1.3. Tipos de techos para tanques verticales

A continuación, se muestran los tipos de techos más utilizados en tanques verticales como su utilidad:

1.3.1. Techos fijos

Son elaborados para contener productos no volátiles como el agua, diésel, asfalto, petróleo crudo, entre otros. Debido que, al disminuir la columna del fluido, se genera una cámara de aire que facilita la evaporación del fluido. Están sostenidos por medio de columnas dentro del tanque.

1.3.2. Techos flotantes

Se utilizan para almacenaje de productos con alto contenido de volátiles como alcohol, gasolinas y combustibles en general. No necesitan de columnas que

lo sostenga. Son fabricados de aluminio para que sean más livianos debido a que suben y bajan dentro del tanque conforme al nivel del líquido contenido.

1.3.3. Abiertos

Son básicamente tanques sin techo. Se usan para almacenar productos en los cuales no es importante que este se contamine o que se evapore a la atmósfera, como el caso del agua cruda, residual, contra incendios, entre otros.

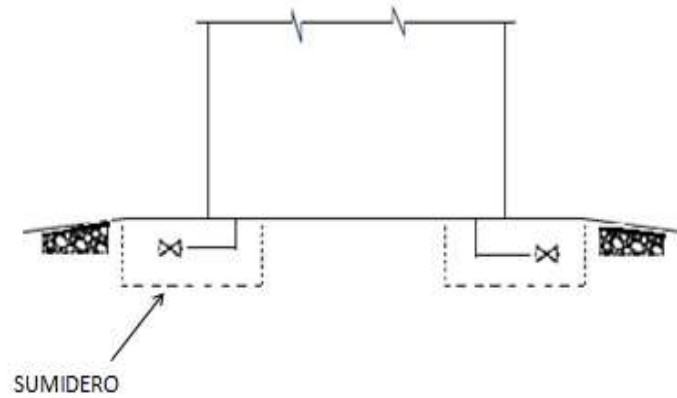
1.4. Tipos de fondo en tanques verticales

El fondo del tanque es la parte que cerrará al cilindro en su parte inferior y estará apoyada en un tipo de cimentación o estructura que soportará el peso total del nivel del líquido. Se clasifican en:

1.4.1. Fondo plano

Estos tanques verticales tienen la limitante que solo se pueden usar a presión atmosférica o presiones internas que sean relativamente pequeñas, o tanque de diámetro menor de 6 metros. Se utilizan mayoritariamente para procesos, tanques de medición, de tratamiento y en la industria química; poseen varias ventajas respecto a los horizontales como la facilidad para manejar la sustancia almacenada, tienen mayor capacidad, son menor costo de material e ideales para armar en campo.

Figura 7. **Fondo plano**

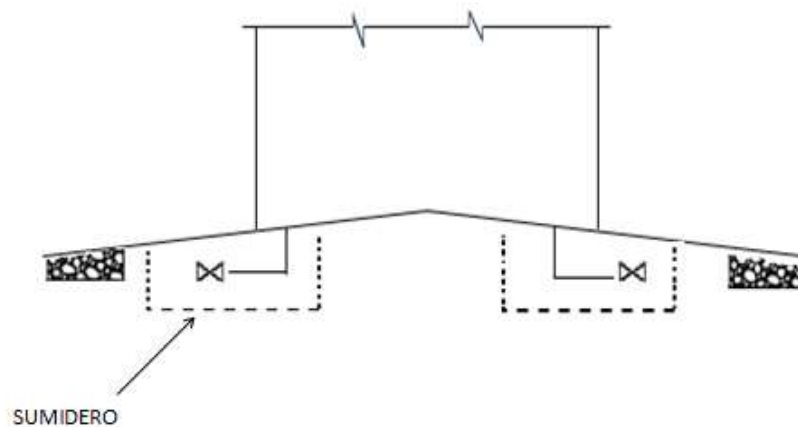


Fuente: elaboración propia.

1.4.2. **Fondo con pendiente hacia afuera**

Es el más utilizado en la industria para tanques relativamente grandes, especialmente en la industria del petróleo debido a que tiene un mejor drenaje y es ideal para sustancias con mayor densidad que el agua.

Figura 8. **Fondo con pendiente hacia afuera**

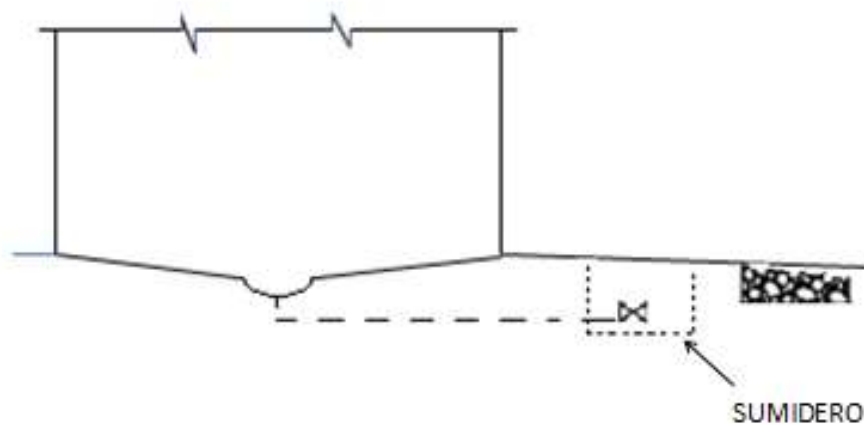


Fuente: elaboración propia.

1.4.3. Fondo con pendiente hacia adentro

Es ideal para productos refinados donde el material almacenado tiene el mínimo contacto con el agua. Recomendable para tanques mayores de 6 metros de diámetro. El drenado es completo, lo que facilita el cambio frecuente de material almacenado.

Figura 9. Fondo con pendiente hacia adentro

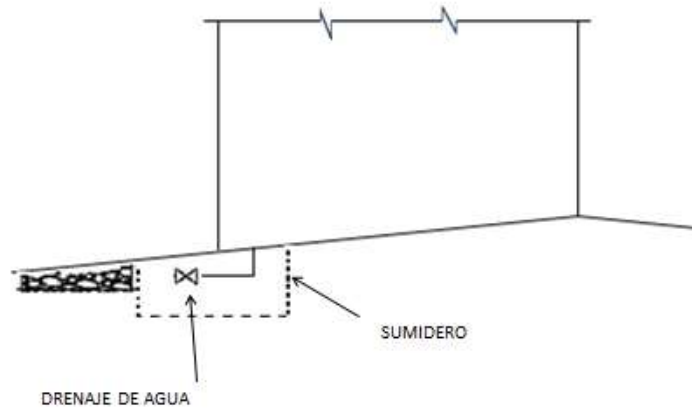


Fuente: elaboración propia.

1.4.4. Fondo con pendiente simple

Es ideal para tanques de diámetro menor a 30 m donde sea requerido el drenaje completo de agua. Las conexiones del fondo son visibles para inspeccionar y para realizar mantenimiento. Su instalación es más costosa que el fondo de pendiente hacia abajo o hacia arriba por el costo de la base y la instalación del casco. Debido a que su pendiente es de poca profundidad, podrían provocarse problemas de sedimentación que forman paquetes de agua imposibles de drenar.

Figura 10. **Fondo con pendiente simple**



Fuente: elaboración propia.

1.5. **Códigos aplicables**

Los códigos son un conjunto de especificaciones que se deben seguir para garantizar la seguridad de una obra civil que se pretende construir. Es de suma importancia respaldarse en ellos para garantizar un correcto funcionamiento. En muchos países del mundo, el diseño y cálculo para tanques de almacenamiento están basados en las normas API. En este trabajo también se estudiará la norma AWWA-D100, debido a que al tener usos similares se puede determinar una comparación costo beneficio para la fabricación del cascarón de los tanques.

La norma API propone tanques que generalmente son utilizados en la industria petrolera para almacenaje de petróleo y sus derivados. Por otro lado, para la norma AWWA D-100 son utilizados únicamente para el almacenamiento de agua.

Ambos códigos hacen referencias a otras normas, principalmente en la utilización de materiales, soldadura, análisis sísmico, entre otros. Entre estas se pueden mencionar:

- ASTM American Society for Testing Materials
- AISC American Institute of Steel Construction
- ASCE American Society of Civil Engineers
- ASME American Society of Mechanical Engineers
- AWS American Society of Welding
- NFPA National Fire Protection Association
- AGIES Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica

Estas normas se aplican de manera indistinta a especificaciones, códigos, métodos, prácticas recomendadas, definiciones de términos, clasificaciones y símbolos gráficos que han sido aprobados.

1.6. Material por almacenar

El agua es el material más destacado y utilizado para el almacenamiento, ya que es vital para la supervivencia y economía en todo el mundo. En los tanques de almacenamiento el agua puede tener diferentes usos:

1.6.1. Agua potable

Es el agua natural proveniente de fuente superficiales, como ríos, lagunas, fuentes subterráneas, pozos, entre otros. Debe ser previamente desinfectada y potabilizada. Es muy utilizada para el consumo humano, principalmente en viviendas, servicios públicos, hospitales, centros de salud, edificios públicos, edificios educativos, comercio e industria, entre otros. En la minería se ocupa como reserva para abastecer de agua a toda una planta o sectores específicos de ella.

1.6.2. Agua de proceso

El uso de agua en los procesos de industrias es uno de los recursos más utilizados, tales como calefacción, enfriamiento, elaboración de productos, limpieza y aclarado, entre otros.

1.6.3. Efecto del agua en los tanques de acero

Las propiedades químicas del agua son uno de los factores importantes que se deben considerar para analizar el impacto que tiene sobre por material del tanque que esté en contacto con el agua, principalmente por la corrosión. Según la norma ASTM, la corrosión se define como la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades; en otras palabras, al ocurrir la corrosión en las planchas de acero puede que este pierda su capacidad de resistencia, debido a la reducción el espesor en sus paredes. Esto puede generar costos de operación y mantenimiento y, al mismo tiempo, un alto impacto en el medio ambiente.

1.7. Placas comerciales para la fabricación de tanques

Existe una variedad en las características de los tipos de aceros utilizados para la fabricación de los tanques de almacenamiento, como espesores y dimensiones de las planchas. Los más comercializados se presentan a continuación:

- A-36. Acero estructural

Acero al carbón utilizado en todo tipo de construcciones estructurales. Es fabricado con un punto mínimo de cadencia de 36,000 psi. Según API 650 solo se usan para espesores iguales o menores de 38 milímetros, para AWWA D-100 es permitido hasta espesores menores de 60 milímetros.

- A-131. Acero estructural

Es muy utilizado para el fondo de los tanques de almacenamiento dependiendo del espesor por utilizar. En el mercado se pueden encontrar en grados como:

- Grado A espesores menores o iguales a 12,7 milímetros.
- Grado B espesores menores o iguales a 25,4 milímetros.
- Grado C espesores menores o iguales a 38 milímetros.
- Grado EH36 espesores menores o iguales a 44,5 milímetros.

- A-283. Placas de acero al carbón con bajo y medio esfuerzo a la tensión

Están diseñadas para cubrir propósitos generales y son de menor costo y resistencia. Entre sus características sobresalientes se puede mencionar su facilidad de rolado y soldado.

- A-285. Placas de acero al carbón para recipientes a presión con bajo y medio esfuerzo a la tensión.

Este tipo de placa están diseñadas especialmente para recipientes estacionarios, calderas, o calentadores. Con espesores hasta de 50,8 milímetros

con un excelente rolado y facilidad de soldado. Su punto mínimo de cedencia es de 30 000 PSI.

- A-516. Placa de acero al carbón para temperaturas de servicio moderado.

Se utilizan especialmente en lugares donde se requiera una excelente dureza. Es un material de alta calidad y de un costo elevado. Se utilizan cuando se requiere un esfuerzo alto a la tensión.

1.8. Soldadura

La soldadura es uno de los procesos más utilizados para unir planchas de acero de los tanques, que logran conformar una estructura completamente sólida y rígida en un tiempo considerable. Las normas API y AWWA se auxilian del código ASME que da los requerimientos de unión y soldado para las planchas de estos tanques. Algunas ventajas de utilizar soldaduras para unir las planchas de acero se mencionan a continuación:

- Es más económica de utilizar en comparación con los tanques remachados o atornillados, debido a que es posible ahorrar un considerable porcentaje en el peso del acero utilizado.
- Tiene una zona de aplicación más amplia que los remaches o tornillos por el espacio que la soldadura ocupa en la estructura.
- Las estructuras soldadas son más rígidas.
- La soldadura permite que las estructuras sean continuas, es decir, la vuelve una sola pieza debido a que las juntas soldadas son tan fuertes.
- Permite corregir errores durante el montaje.
- La aplicación de soldadura no es ruidosa.

Con la soldadura se asegura la continuidad de cada pieza que pueda proporcionar una transmisión uniforme de los esfuerzos entre las planchas de acero. Para la soldadura de filete la transmisión de esfuerzos es de forma indirecta, debido a que, para transmitir el esfuerzo de una plancha de acero a otra, esta se le obliga a desviarse de su trayectoria normal. Pero para la soldadura a tope la transmisión es directa

Los procesos de soldadura para los tanques API y AWWA relacionados con el código ASME son:

- OFW: soldadura con oxígeno y combustible
- SMAW: soldadura de arco con electrodo revestido
- SAW: soldadura de arco sumergido
- GMAW: soldadura de arco con electrodo metálico y gas de protección
- FCAW: soldadura de arco con electrodo de corazón de fundente
- GTAW: soldadura de arco con electrodo de tungsteno y gas de protección
- PAW: soldadura de arco con plasma
- ESW: soldadura con electro-escoria
- LBW: soldadura por rayo láser
- Soldadura de pernos
- Soldadura por fricción continua o por inercia
- Soldadura por resistencia

1.8.1. Tipos de juntas

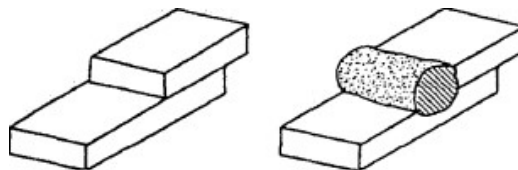
Estos tipos de tanques son diseñados de tal forma que todas las uniones de soldadura sean verticales, horizontales y paralelas, para el cuerpo, fondo y techo si es necesario. Los tipos de junta relacionados con el código ASME para las normas API y AWWA son:

- Junta a traslape
- Junta a tope
- Filete
- Doble filete

1.8.1.1. Juntas a traslape

Es la unión de dos piezas de metal solapadas o traslapadas, que se unen por fusión mediante soldadura de puntos, de filete, de tapón o de agujero alargado. La soldadura de filete son las que se aplican a los miembros de acero donde exista un traslape. Tiene una forma de triángulo y por lo general la mayoría de las conexiones usadas en el tanque se sueldan por esta forma.

Figura 11. Juntas a traslape

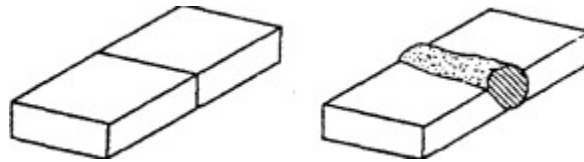


Fuente: INDURA. Manual de códigos, normas y especificaciones. p. 8.

1.8.1.2. Juntas a tope

Son utilizadas cuando los miembros que se conectan están alineados en el mismo plano. Al utilizarlas implicaría un ensamble perfecto de los miembros por conectar. Son utilizadas en conexiones como empalmes de columna y las conexiones de patines de vigas a columnas, tuberías, envolvente y el anillo anular del tanque de almacenamiento.

Figura 12. **Juntas a tope**



Fuente: INDURA. Manual de códigos, normas y especificaciones. p. 9.

Es aplicada entre los planos de las superficies de las dos partes. Pueden ser simples, cuadradas o escuadradas, biseladas, en V, de ranuras de una sola J, de ranura de una sola U, o dobles.

Figura 13. **Tipos de ranuras para juntas a tope**



Fuente: Ing. Preminger Rubiano. *Símbolos estándares para soldadura.*

<https://es.slideshare.net/oscarlvargas77/simbologia-a2493>

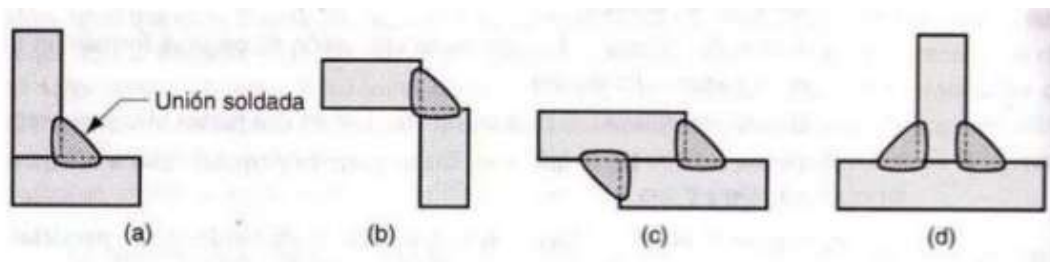
Consulta: enero 2017.

1.8.1.3. Juntas de filete

Son utilizadas para rellenar los bordes de las placas creadas mediante uniones de esquinas, sobrepuestas y en T. Se utiliza un metal de relleno para proporcionar una sección transversal de aproximadamente un triángulo. Las soldaduras de filete pueden ser sencillas o dobles (soldar en uno o ambos lados).

El tamaño del filete está determinado por la norma AWS como la longitud de los catetos formados por el triángulo de la soldadura y las piezas por soldar.

Figura 14. Tipos de unión soldadura de filete



Fuente: Natalia Urrego. *Generalidades de soldaduras y diseño de juntas*.

<https://es.slideshare.net/nurrego/generalidades-de-soldadura-y-diseño-de-juntas>. Consulta: enero 2018.

- Unión de esquina con filete interno
- Unión de esquina con filete externo
- Unión de traslape con filete doble
- Unión en T con filete doble

Las líneas punteadas muestran los bordes originales de cada parte.

1.9. Accesorios

Los accesorios son los elementos extras que se debe considerar para el funcionamiento del tanque según las especificaciones del cliente. Entre los mínimos requeridos se mencionan:

1.9.1. Boquillas

Son espacios perforados en la pared del tanque con distintas finalidades:

- Pueda tener llegada de líneas de tuberías para la descarga o succión de producto por almacenar.
- Conectar instrumentos capaces de monitorear el tanque desde un cuarto de control.
- Entrada de hombre para inspección y limpieza.
- Venteo o respirador a fin de dejar circular aire para eliminar una posible sobrepresión.
- Drenaje para limpiar los residuos de mayor densidad generados por el producto que contiene el tanque.

1.9.2. Escalera

Son estructuras metálicas que generalmente son helicoidales o verticales, con altura y longitud dependiendo la altura del tanque; generalmente están instaladas en la parte exterior del tanque, algunas pueden estar dentro del mismo, pero no se recomiendan en climas fríos donde se pueda formar hielo. Son esenciales para llegar a la superficie del tanque y así verificar el comportamiento del líquido almacenado. Las escaleras verticales son utilizadas internamente en tanques de techo flotante y acceso externo en tanques pequeños.

Figura 15. **Tanque vertical con escalera vertical**



Fuente: Talleres Godoy, Argentina. <http://buenos-aires.all.biz/tanque-vertical-bajo-norma-api-g115924#.WC48VPhDIU>. Consulta: enero de 2017.

Las escaleras helicoidales son utilizadas para acceder a los tanques externamente. Son de fácil fabricación e instalación y son montadas en el perímetro del casco que va del fondo hasta el nivel del techo.

Figura 16. **Tanque vertical con escalera helicoidal**



Fuente: Mikel Martínez De Osaba. http://es.123rf.com/photo_29680516_tanques-de-almacenamiento-de-color-blanco-con-escaleras.html. Consulta: enero de 2017.

1.9.3. Plataformas y barandas

Su objetivo es brindar la protección y seguridad al personal encargado de realizar las inspecciones y reparaciones en la superficie del tanque. Es importante que el material de las plataformas sea antideslizante para evitar accidentes.

2. APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE NORMAS

2.1. Consideraciones

Para comparar acertadamente los costos en la fabricación de cualquier obra civil es importante hacer todos los estudios preliminares que puedan afectar al proceso del mismo. También es importante contar con el diseño de la obra que influirá de lleno en el presupuesto final.

Por lo antes mencionado, se debe contar con un diseño que cumpla con las especificaciones propuestas, tanto por el usuario como por el cumplimiento de las normas propuestas para garantizar el funcionamiento de la estructura.

El tipo de tanque que se propone será vertical de fondo plano y sin techo, construido con láminas de acero soldadas y apoyado sobre una cimentación, con capacidad de 500 m³. A continuación se detallará el diseño del cascarón del tanque basado en la norma API-650 y AWWA D-100:

2.2. Datos para diseño del tanque

Los requerimientos para el tanque vertical es que cumpla con un almacenaje de 500 m³.

A continuación, se detalla toda la información para el tanque. Tomar en cuenta que algunos datos serán asumidos:

Tabla I. **Datos para diseño del tanque**

Material	
Acero estructural	A-36 M
Peso específico de acero estructural	7 850 Kg/m ³
Tamaño planchas de acero	1,8 m x 6,0 m
Contenido	
Líquido por almacenar	Agua
Peso específico agua	1 000 Kg/m ³
Dimensiones del tanque	
Altura	10 m
Diámetro	8 m
Perímetro	25,13 m
Capacidad exacta	502,65 m ³

Fuente: elaboración propia.

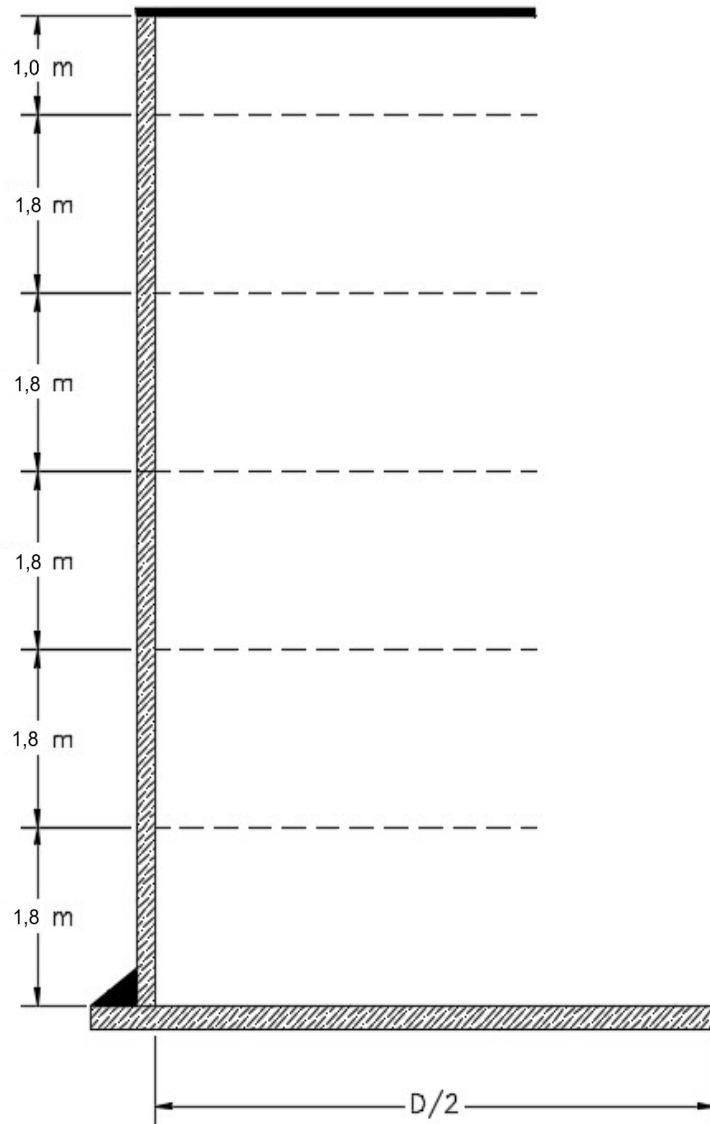
2.2.1. Cantidad de anillos

Es la cantidad de anillos que necesitará el tanque para cubrir la altura deseada. Está dado por:

$$\#Anillos = \frac{\textit{altura}}{\textit{ancho de placa}} = \frac{10 \textit{ m}}{1,80 \textit{ m}} = 5,55 \textit{ anillos} \cong 6 \textit{ anillos}$$

Para reducir el desperdicio de material, se trabajarán los primeros 5 anillos con planchas de 1,80 metros de ancho y el último, de 1 metro de ancho.

Figura 17. **Distribución de anillos del tanque**



Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Corrosión permisible

La corrosión es una parte importante que se debe asumir para el diseño de estos tanques, ya que se podría producir por exceso de humedad y causar

oxidaciones en la pared del tanque. Según la norma ASME para el acero es 1,6 mm como máximo.

2.3. Norma API-650

Esta norma está diseñada para la construcción de tanques de acero soldado que garantizan la seguridad del usuario y obtener costos razonables con base en sus requerimientos. Cubre estándares para materiales, diseño, fabricación, montaje y pruebas para estos tipos de tanques. Generalmente, estos son utilizados en la industria petrolera para el almacenaje de petróleo y sus derivados. Se utilizan también en empresas o industrias donde se necesiten grandes cantidades de almacenaje de agua siempre y cuando no exceda una temperatura de operación no mayor de 93°C (200°F) y que no se utilizan para servicio de refrigeración.

2.3.1. Chequeos de espesores del cuerpo

La norma API-650 establece que se deben hacer dos chequeos para el espesor de los anillos del cuerpo, que son por condiciones de diseño y fuerza hidrostática. Este método es llamado “método de un pie”, y considera una sección transversal ubicada a un pie por debajo de la unión entre cada anillo.

Están dados por los siguientes parámetros:

- Espesor por condiciones de diseño

$$Td = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{Sd} + Ca$$

Donde:

Td= espesor por condiciones de diseño en milímetros.

D= diámetro nominal del estanque en metros.

H= altura del nivel del líquido de diseño en metros.

G= densidad relativa del líquido por almacenar.

Sd= esfuerzo permisible por condiciones de diseño en Mp (ver tabla II).

Ca= corrosión admisible en milímetros.

- Espesor por fuerza hidrostática

$$T_t = \frac{4,9D(H - 0,3)}{S_t}$$

Donde:

Tt= espesor por condiciones de fuerza hidrostática en milímetros.

D= diámetro nominal del estanque en metros.

H= altura del nivel del líquido de diseño en metros.

G= densidad relativa del líquido a almacenar.

St= esfuerzo permisible por fuerza hidrostática en Mpa (ver tabla II).

2.3.1.1. Esfuerzos máximos permisibles

Los esfuerzos máximos permisibles de diseño y de prueba hidrostática están dados por la siguiente tabla cuando se consideren las especificaciones por ASTM. Para este diseño se tomará como base el material ASTM A-36.

Tabla II. **Esfuerzos permisibles de tipos de acero según ASTM**

Tipo	Grado	Mínimo Esfuerzo Fluencia (Sy)	Máximo Esfuerzo Tensión (ST)	Esfuerzo de Diseño (Sd)	Esfuerzo por prueba hidrostática (St)
		Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
A 131	A,B,CS	235	400	157	171
A 131	EH 36	360	490	196	210
A 283	C	205	380	137	154
A 285	C	205	380	137	154
A 36	-	250	400	160	171
A 516	380	205	380	137	154
A 516	415	220	415	147	165
A 516	450	240	450	160	180
A 516	485	260	485	173	195
A 537	1	345	485	194	208
A 537	2	415	550	220	236
A 573	400	220	400	147	165
A 573	450	240	450	160	180
A 573	485	290	485	193	208
A 633	C,D	345	485	194	208
A 662	B	275	450	180	193
A 662	C	295	485	194	208
A 678	A,B,CS	345	485	194	208
A 678	B	415	550	220	236
A 737	B	345	485	194	208
A 841	Class1	345	485	194	208

Fuente: código API-650-07. Tabla 5, 2ª. p.12.

2.3.2. Diseño del fondo

El tanque propuesto estará apoyado sobre una cimentación, por lo que será de fondo plano. Este deberá de ser fabricado con planchas de acero para el cual la norma API indica:

- Todas las láminas del fondo deberán tener un espesor nominal no menor de 6,35 mm, excluyendo la corrosión permitida.

- Las láminas rectangulares del fondo deben tener un ancho mínimo de 1 800 mm.
- Se debe de considerar al menos 50 mm de proyección del fondo más que el diámetro exterior del tanque.
- La placa anular del fondo no debe de tener un ancho radial menor a 600 mm (24 plg).

La placa anular es un anillo que bordea la placa del fondo, es donde deberán ir soldadas las planchas del manto del tanque.

El espesor por utilizar para el fondo del tanque deberá ser de 6,35 mm según lo indica API-650 07

2.3.3. Diseño del cuerpo

Según la norma API-650, el espesor mínimo de la capa del cuerpo está dado por el diámetro nominal del tanque. La capa del cuerpo es la encargada de resistir la carga hidrostática que deberá ser mayor a la calculada por condiciones de diseño y por condiciones de prueba hidrostática.

Tabla III. **Espesores para el cuerpo del tanque**

Diámetro nominal del tanque (Ver nota 1)		Espesor nominal de lámina (Ver nota2)	
(m)	(ft)	(mm)	(in)
< 15	< 50	5	3/16
15 hasta < 36	50 hasta < 120	6	1/4
36 hasta 60	120 hasta 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Fuente: código API-650-07. Traducido al español, Colombia 2007. p. 25.

Con referencia a las notas 1 y 2 de la norma API-650:

Nota 1: el diámetro nominal del tanque es el diámetro de la línea media de las láminas del anillo inferior del cuerpo.

Nota 2: el espesor nominal de la lámina se refiere al cuerpo del tanque como es construido. Los espesores especificados están basados en los requerimientos de montaje.

- Chequeo por condiciones de diseño

$$T_d = \frac{4,9(8)(10 - 0,3)1}{160} + 1,6 = 3,98 \text{ mm}$$

- Chequeo por prueba hidrostática

$$T_t = \frac{4,9(8)(10 - 0,3)}{171} + 1,6 = 3,82 \text{ mm}$$

La capa del cuerpo será calculada con base en el espesor por condiciones de diseño, el cual fue el mayor.

2.3.3.1. Paredes del cuerpo

Debido a que los espesores calculados por las condiciones de diseño son más críticos, se utilizará la misma para determinar los espesores del tanque en cada anillo.

Anillo # 1

El espesor del primer anillo es el calculado anteriormente, el cual fue de 3,98 mm, pero según tabla III el espesor mínimo será de 5 mm (4,76 mm comercial).

Anillo # 2

$$Td = \frac{4,9(8)(9 - 0,3)1}{160} + 1,6 = 3,73 \text{ mm}$$

Anillo # 3

$$Td = \frac{4,9(8)(7,2 - 0,3)1}{160} + 1,6 = 3,29 \text{ mm}$$

Anillo # 4

$$Td = \frac{4,9(8)(5,4 - 0,3)1}{160} + 1,6 = 2,85 \text{ mm}$$

Anillo # 5

$$Td = \frac{4,9(8)(3,6 - 0,3)1}{160} + 1,6 = 2,41 \text{ mm}$$

Anillo # 6

$$Td = \frac{4,9(8)(1,8 - 0,3)1}{160} + 1,6 = 1,97 \text{ mm}$$

Debido a que los espesores de planchas de los demás anillos son menores a 5mm, se trabajarán todos a 5mm según norma API.

Tabla IV. **Espesores calculados según api 650**

Anillo	Td (mm)	Tt (mm)	t final (mm)
1	3,98	3,83	5
2	3,73	3,60	5
3	3,29	3,18	5
4	2,85	2,77	5
5	2,41	2,36	5
6	1,97	1,94	5
Fondo	6mm		

Fuente: elaboración propia.

2.3.4. Cargas por sismo

La norma API indica que las cargas de sismo generan un momento de volteo que pueden provocar que el tanque se mueva con el contenido o que se produzca un oleaje del líquido dentro del tanque. Este dependerá del sitio donde será construido el tanque.

2.3.4.1. Momento de volteo por sismo

El momento generado en el tanque por movimiento de la corteza terrestre, en función de la base del tanque está dado por:

$$M = Z * I * (C1 * Ws * Xs + C1 * Wr * Ht + C1 * W1 * X1 + C2 * W2 * X2)$$

Donde:

M= momento de volteo provocado en la base del tanque en Kg-m.

Z= factor de zona sísmica en función del lugar donde se instalará el tanque. Ver tabla de anexos.

I= factor de importancia, API considera 1,0 para todo tipo de tanque y como valor máximo de 1,25 para tanques que estén potencialmente en riesgo o esenciales para las personas.

C1, C2 = coeficientes laterales sísmicos.

Ws= peso total del cuerpo del tanque en kilogramos.

Xs= altura desde el fondo al centro de gravedad del tanque en metros.

Wr= peso total del techo, incluida la carga viva en kilogramos.

Ht= altura total del cuerpo del tanque en metros.

W1= peso de la masa efectiva contenida que se mueve conforme al cuerpo del tanque en kilogramos.

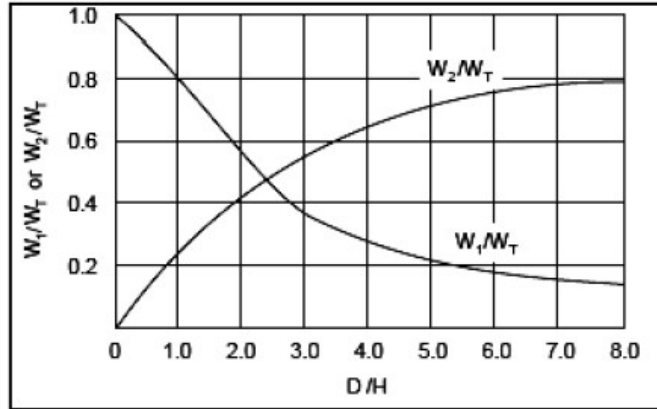
X1= altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad de W1 en metros.

W2= peso de la masa efectiva contenida en el tanque que se mueve en el primer oleaje.

X2= altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad de W2 en metros.

Los pesos efectivos de las masas se pueden calcular por:

Figura 18. Masas efectivas

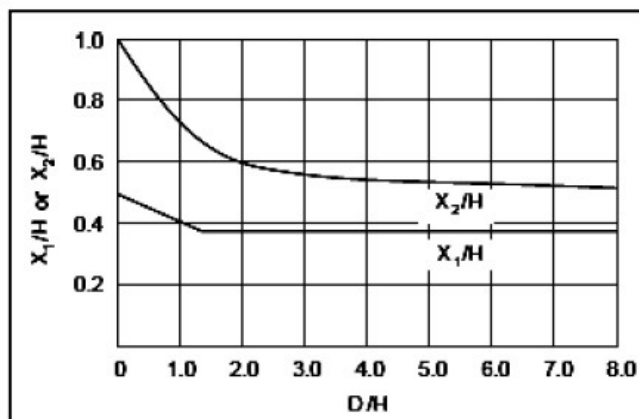


Fuente: API-650, apéndice E.

$$W1 = Wt * \frac{W1}{Wt} \quad W2 = Wt * \frac{W2}{Wt}$$

Las alturas X1 y X2 se determinan de manera similar al procedimiento anterior:

Figura 19. Centroides de fuerzas sísmicas



Fuente: API-650, apéndice E.

$$X1 = H * \frac{X1}{H} \qquad X2 = H * \frac{X2}{H}$$

C1 debe ser 0,6 veces el producto de Z*I*C2, cuando se cumple con:

$$T \leq 4,5 \quad C2 = \frac{0,3 * S}{T} \quad o \quad T > 4,5 \quad C2 = \frac{1,35 * S}{T^2}$$

Donde:

S= coeficiente de sitio que está en función del tipo de suelo (ver anexo), o por estudios geotécnicos.

T= periodo natural de ondas del primer oleaje en segundos, que se calcula mediante la siguiente expresión:

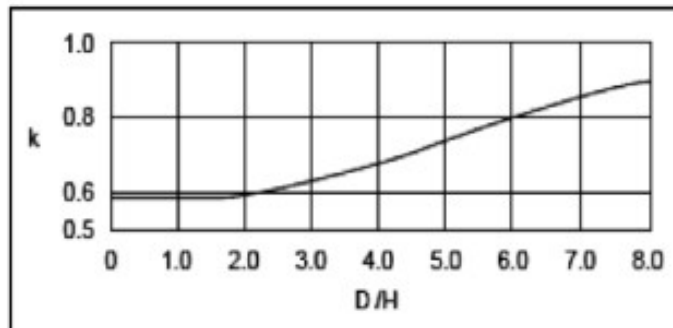
$$T = 1,81K * D^{0,5}$$

Donde:

D= diámetro del tanque en centímetros.

K= en función de la relación D/H (ver figura 20).

Figura 20. **Gráfica de factor K**



Fuente: API-650-07.

- Cálculo de momento de volteo
 - Según AGIES 2010 (anexos) para la capital de Guatemala, una zona sísmica 4 el factor $Z=0,55$
 - Factor de importancia $I= 1$, puesto que el tanque a fabricar será solo para almacenamiento de agua.
 - Altura de centroide del tanque $X_s= 5,0$ m
 - Relación $D/H=0,8$
 - Cálculo de peso de diseño del cuerpo

Tabla V. **Peso total del cuerpo**

Peso específico A-36				7 850 kg/m ³	
Plancha	Espesor (m)	Perímetro	Altura	Es*per*Al	Peso (kg)
1	0,005	25,15	1,80	0,23	1776,74
2	0,005	25,15	1,80	0,23	1776,74
3	0,005	25,15	1,80	0,23	1776,74
4	0,005	25,15	1,80	0,23	1776,74
5	0,005	25,15	1,80	0,23	1776,74
6	0,005	25,15	1,00	0,13	987,08
Suma					9870,77

Fuente: elaboración propia.

$W_s = \text{área del cuerpo} * \text{espesor del cuerpo} * \text{peso específico del material}$

$$W_s = 9870,77 \text{ kg}$$

- Cálculo de peso de líquido contenido

$W_t = \text{volumen de líquido} * \text{peso específico de líquido}$

$$W_t = \frac{\pi * D^2}{4} * H * \gamma$$

$$W_t = \frac{\pi * 8^2}{4} * 10 * 1000 = 502\,654,82 \text{ kg}$$

- Cálculo de masas efectivas:

$$\frac{D}{H} = \frac{8}{10} = 0,8$$

Según figura 18

$$\frac{W_1}{W_t} = 0,85 \quad y \quad \frac{W_2}{W_t} = 0,2$$

Entonces

$$W_1 = 0,85 * 502\,654,82 = 427\,256,60 \text{ kg}$$

$$W_2 = 0,2 * 502\,654,82 = 100\,530,96 \text{ kg}$$

- Cálculo de alturas desde el fondo del tanque:

$$\frac{D}{H} = \frac{8}{10} = 0,8$$

Según figura 19

$$\frac{X_1}{H} = 0,45 \quad y \quad \frac{X_2}{H} = 0,75$$

Entonces

$$X_1 = 0,45 * 10 = 4,5 \text{ m}$$

$$X_2 = 0,75 * 10 = 7,5 \text{ m}$$

- Cálculo de coeficientes laterales C1 y C2

Según figura 20

para una relación $\frac{D}{H} = 0,8$ el valor de $K = 0,6$

- Cálculo del periodo natural

$$T = 1,81K * D^{0,5} = 1,81 * 0,6 * 8^{0,5} = 3,07 \text{ seg}$$

Según S =D que es un suelo firme y rígido

$$T \leq 4.5 \quad C2 = \frac{0.3 * 1.5}{3.07} = 0.147$$

$$C1 = 0.6 \text{ segun API - 650}$$

Entonces, el momento de volteo que se puede provocar por un sismo será de:

$$M = 0,55 * 1 * (0,6 * 9\,870,77 * 5 + 0,6 * 427\,256,60 * 4,5 + 0,147 * 100\,530,96 * 7,5)$$

$$M = 711\,722,28 \text{ Kg} - m$$

$$M = 697\,4878,30 \text{ N} - m$$

2.3.4.2. Chequeo por compresión en el cuerpo del tanque

El tanque puede presentar fallas en la pared por compresión longitudinal debido al sismo, por lo que es necesario asegurarnos que estará estable al producirse estas fuerzas. De lo contrario se deberá tomar en cuenta:

- Incrementar diámetro y reducir altura del tanque.
- Anclar el tanque.
- Distribuir más peso a la estructura. Por ejemplo, aumentando sus espesores.

Chequeo para tanques no anclados:

$$\frac{M}{D^2 * Wt} < 1,57$$

Cuando el valor es mayor de 1,57 el estanque es totalmente inestable

$$\frac{711722,28 \text{ Kg} - m}{8^2 * 9870,77 \text{ kg}} = 1,13 < 1,57$$

Se concluye que el tanque soportara los esfuerzos de compresión al ocurrir un sismo. El tanque es totalmente estable, no necesitará anclaje.

2.3.5. Cargas por viento

Es importante garantizar que el tanque no se volcará tanto por las fuerzas producidas por sismo como por viento. Estos tipos de tanques están sujetos a grandes presiones de viento que causan un momento de volteo. La norma API

650 requiere que la velocidad mínima del viento sea de 100 MPH (160 km/h) que puede causar diferentes presiones en función del área por afectar. En la siguiente tabla se muestra las presiones especificadas por API 650 para la velocidad mínima de viento.

Tabla VI. **Presiones de diseño para velocidad de 100 MPH (160 km/h)**

Tipo de superficie	Presión	
	lb/pie2	Kpa
Superficies verticales planas	30	1.4
Áreas proyectadas de superficies cilíndricas	18	0.86
Áreas proyectadas de superficies cónicas o de doble curva	15	0.72

Fuente: API 650. p.51.

Si existe una velocidad mayor se ajustan las presiones del viento con la siguiente ecuación de proporción:

$$f = \left(\frac{V}{160} \right)^2$$

El momento de volteo producido por proyección de pared está dado por:

$$M_w = P_v * \frac{H^2 * D}{2} *$$

El tanque requiere anclaje si $M_w > \frac{2}{3} * \left(\frac{W_t * D}{2} \right)$

Donde:

Mw= momento producido por el viento en kg-m.

Pv= presión del viento en kg/m².

D= diámetro del tanque en m.

H= altura del tanque en m.

W= peso muerto del tanque en kg.

- Chequeo por viento

$$M_w = 0,86 * \frac{1000}{9,8} * \frac{8 * 10^2}{2} = 35102,04 \text{ KG} - M$$

$$M_w > \frac{2}{3} * \left(\frac{Wt * D}{2} \right)$$

$$M_w > \frac{2}{3} * \left(\frac{9870,77 \text{kg} * 8 \text{m}}{2} \right) = 26322,05 \text{ kg} - m$$

$$35102,04 \text{ kg} - m > 26322,05 \text{ kg} - m$$

Por lo que concluye que el tanque resistirá el volteo producido por las fuerzas del viento y no necesitará anclaje.

2.4. Norma AWWA D-100

La norma AWWA no es comúnmente utilizada en Guatemala. Propone el diseño y fabricación para tanques de almacenamiento. Es similar a la norma API-650, debido a que estos también son de placas soldadas.

Estas estructuras son utilizadas únicamente para el almacenamiento de agua, que puede ser potable o de procesos, que trabaje a presión atmosférica a una temperatura no mayor de 199,4 °F y no menor a 5 °F, que no necesiten servicio de refrigeración.

2.4.1. Diseño del cuerpo

Los espesores de las placas del cuerpo se deben calcular con base en la siguiente ecuación:

$$t = \frac{2,6 * Hp * D * G}{s * E}$$

Donde:

t= espesor requerido en pulgadas

Hp= altura del nivel de diseño del líquido, en ft.

D= diámetro nominal del estanque, en ft.

G= gravedad específica del líquido, para agua 1,0.

s= esfuerzo permitido de diseño, en lb/in².

E= eficiencia de la junta, (ver tabla VII).

Tabla VII. Tipo de eficiencia de juntas

Type of Joint	Efficiency—percent	
	Tension	Compression
Double-groove butt joint with complete joint penetration	85	100
Double-groove butt joint with partial joint penetration and with the unwelded portion located substantially at the middle of the thinner plate	85 $\frac{Z^*}{T}$	100 $\frac{Z^*}{T}$
Single-groove butt joint with suitable backing strip or equivalent means to ensure complete joint penetration	85	100
Transverse lap joint with continuous fillet weld on each edge of joint	75	75
Transverse lap joint with continuous fillet weld on one edge of joint and an intermittent full thickness fillet weld on the other edge of joint	75 $\frac{(1+X)^\dagger}{2}$	75 $\frac{(1+X)^\dagger}{2}$
Transverse lap joint with fillet weld, or smaller, on either or both edges of the joint; welds either continuous or intermittent	75 $\frac{(XW_1 + YW_2)^\ddagger}{2t}$	75 $\frac{(XW_1 + YW_2)^\ddagger}{2t}$

Fuente: AWWA D-100-05, tabla 14, p.27.

Tabla VIII. **Esfuerzo permisible de diseño, S.**

Item	Class	Maximum Unit Stress	
		<i>psi</i>	(<i>MPa</i>)
Plates in tank shell	1,2*	15,000	(103.4)
Structural steel, built-up structural members, structural details	0	12,000	(82.7)
	1	15,000	(103.4)
	2	18,000	(124.1)
Tension rings	1,2	15,000	(103.4)
Bolts and other nonupset threaded parts [†]		15,000	(103.4)
Anchor bolts [‡]			
Mild steel [§]		15,000	(103.4)
High-strength steel ^{**}			
1 3/4 in. to 2 1/2 in. diameter		31,250	(215.5)
2 1/2 in. to 4 in. diameter		28,750	(198.3)
Bracing rods with swedged (upset) or welded, enlarged stub ends having threads with root area greater than the rod area [†]	1	15,000	(103.4)
	2	18,000	(124.1)
Cast steel		11,250	(77.6)

Fuente: AWWA D-100-05, tabla 4, p.13.

Tabla IX. **Espesor mínimo de placas en contacto con agua**

Nominal Shell Diameter, <i>D</i> <i>ft (m)</i>	Nominal Shell Height, <i>H</i>	Minimum Shell Thickness			
		Ground-Supported Tanks		Other Tanks	
		<i>in.</i>	(<i>mm</i>)	<i>in.</i>	(<i>mm</i>)
<i>D</i> ≤ 20 ft (6.1 m)	All	3/16	4.76	1/4	6.35
20 ft < <i>D</i> ≤ 50 ft (6.1 m < <i>D</i> ≤ 15.2 m)	<i>H</i> ≤ 48 ft (14.6 m)	3/16	4.76	1/4	6.35
	<i>H</i> > 48 ft (14.6 m)	1/4	6.35	1/4	6.35
50 ft < <i>D</i> ≤ 120 ft (15.2 m < <i>D</i> ≤ 36.6 m)	All	1/4	6.35	1/4	6.35
120 ft < <i>D</i> ≤ 200 ft (36.6 m < <i>D</i> ≤ 61.0 m)	All	5/16	7.94	5/16	7.94
200 ft < <i>D</i> (61.0 m < <i>D</i>)	All	3/8	9.52	3/8	9.52

Fuente: AWWA D-100-05, tabla 15, p.30.

2.4.1.1. Paredes del cuerpo

Anillo #1

$$t = \frac{2,6 * 32,81 * 26,25 * G}{15000 * 0,75} = 0,1990 \text{ in} = 5,05 \text{ mm} = 5,05 \text{ mm} + 1,6 = 6.65 \text{ mm}$$

Anillo #2

$$t = \frac{2,6 * 29,53 * 26,25 * G}{15000 * 0,75} = 0,1791 \text{ pulg} = 4,55 \text{ mm} + 1,6 = 6,15 \text{ mm}$$

Anillo #3

$$t = \frac{2,6 * 23,62 * 26,25 * G}{15000 * 0,75} = 0,1433 \text{ pulg} = 3,64 \text{ mm} + 1,6 = 5,24 \text{ mm}$$

Anillo #4

$$t = \frac{2,6 * 17,72 * 26,25 * G}{15000 * 0,75} = 0,1075 \text{ pulg} = 2,73 \text{ mm} + 1,6 = 4,33 \text{ mm}$$

Anillo #5

$$t = \frac{2,6 * 11,81 * 26,25 * G}{15000 * 0,75} = 0,0716 \text{ pulg} = 1,82 \text{ mm} + 1,6 = 3,42 \text{ mm}$$

Anillo #6

$$t = \frac{2,6 * 5,91 * 26,25 * G}{15000 * 0,75} = 0,0359 \text{ pulg} = 0,91 \text{ mm} + 1,6 = 2,51 \text{ mm}$$

Tabla X. **Espesores calculados según AWWA-D100**

Anillo	t (mm)	t comercial (mm)
1	6,65	7,94
2	6,15	6,35
3	5,24	6,35
4	4,33	4,76
5	3,43	4,76
6	2,51	4,76
Fondo	7,0 mm	

Fuente: elaboración propia.

2.4.2. Diseño del fondo

La norma AWWA especifica que para el espesor del fondo se deberá tomar la altura del tanque más la del fondo para tanques elevados incluyendo corrosión permitida. Debido a que el tanque por diseñar será de fondo plano, se utilizará el mismo espesor de plancha del primer anillo.

2.4.3. Cargas por sismo

Según AWWA D-100 en su sección A.13.5, el cálculo del periodo del sistema se puede determinar usando API 650. Los análisis por sismo son similares a los indicados en la norma API.

2.4.3.1. Momento de volteo por sismo

El momento de volteo provocado por sismo se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$M = \left[\frac{18ZI}{R_w} \right] * [0,14 (W_s * X_s + W_r * H_t + W_1 * X_1) + S * C_1 * W_2 * X_2]$$

Donde:

M= momento de volteo provocado en el fondo del manto, en lb*ft.

R_w= coeficiente de reducción de fuerza según tabla XI.

W_s= peso total del tanque, en lb.

X_s= altura desde el fondo al centro de gravedad del tanque, en ft.

H_t= altura total del cuerpo del tanque, en ft.

X₁= altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad de W₁, en ft.

X₂= altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad en W₂, en ft.

S= factor de amplificación por sitio.

C₁= se determina según la siguiente relación.

$$\text{Para } T < 4,5; C_1 = \frac{1}{6T} \quad \text{si } T \geq 4,5; C_1 = 0,75/T^2$$

T= periodo del sistema

Tabla XI. **Coeficiente de reducción de fuerza R_w**

Estructura	R _w
Estanques elevados con barras cruzadas	4.0
Estanques elevados con un pedestal	3.0
Estanque con fondo plano sin anclas	4.5
Estanque con fondo plano anclados	3.5

Fuente: Isidro Gómez. *Cálculo de estanques para almacenamiento de agua, análisis comparativo de las normas API 650 y AWWA D-100.* p. 60.

$$\text{Si } \frac{M}{D^2 * W_t} > 1,54 \text{ el tanque deberá anclarse.}$$

2.4.4. Cargas por viento

Se podrá utilizar la misma referencia de API para analizar las cargas por viento, exceptuando cuando la velocidad del viento sea mayor a 100MPH. Para tanques con una altura mayor de 125 ft de nivel de líquido, la velocidad aumentada será:

$$V_h = \left(\frac{H}{33}\right)^{\frac{1}{7}} * V_{33} \geq 100 \text{ mph}$$

Donde:

V_h= velocidad media en altura, en MPH.

V₃₃= velocidad promedio a 33 ft de altura (altura típica donde se mide la velocidad en aeropuertos), en mph.

H= altura medida entre la altura del techo y la altura mínima de nivel de líquido para aplicar esta fórmula (125 ft), en ft.

Nota: los chequeos por sismo y viento para el tanque diseñado por medio de la norma AWW-100 son similares a los de la norma API-650. Se concluye ambos tanques soportaran los esfuerzos producidos por sismo y por viento.

2.5. Resumen de diseños

En la siguiente tabla se muestran los espesores finales que serán cotizados para la comparación de costos del tanque.

Tabla XII. **Resumen de espesores para tanque de 500m³**

API				AWWA			
Anillo	Espesor diseño (mm)	Espesor comercial (in)	Espesor comercial (mm)	Anillo	Espesor diseño (mm)	Espesor comercial (in)	Espesor comercial (mm)
1	5	3/16	4,76	1	7	5/16	7,94
2	5	3/16	4,76	2	6	1/4	6,35
3	5	3/16	4,76	3	6	1/4	6,35
4	5	3/16	4,76	4	5	3/16	6,35
5	5	3/16	4,76	5	5	3/16	6,35
6	5	3/16	4,76	6	5	3/16	6,35
Fondo	6mm	1/4	6,35	Fondo	7 mm	5/16	7,94

Fuente: elaboración propia.

3. FACTORES DE CONSIDERACIÓN PARA COSTOS DE FABRICACIÓN

3.1. Costos

En cada proyecto es importante estudiar todos los gastos por realizarse para la ejecución de una obra civil. Es de suma importancia tomar en cuenta las consideraciones mínimas para evitar problemas futuros que podrían afectar el presupuesto y, por consiguiente, al constructor en la ejecución de un proyecto.

3.1.1. Qué son costos

Los costos son el valor monetario de los insumos que se requiere para ejecutar una obra o un servicio de principio a fin y que cumpla con los requerimientos de seguridad. Incluye el diseño y ejecución de la obra para satisfacer a un cliente.

3.1.2. Tipos de costos

Existen dos tipos de costos para el desglose de las actividades y materiales:

3.1.2.1. Costos directos

Son todos los gastos que influyen en el proyecto. Están vinculados física y directamente con la producción; incluye los materiales, mano de obra, herramientas, maquinaria y equipo, entre otros. Estos costos pueden ser muy

variables, dependiendo la calidad que quiera ofrecer cada constructor, ya que al utilizar materiales normados y mano de obra calificada se podrán obtener resultados más confiables y satisfactorios.

3.1.2.2. Costos indirectos

Son los gastos que no tienen nada que ver con el proyecto, pero inciden en él, los incluyen todos los gastos de administración, alquileres, imprevistos, utilidad e impuestos, entre otros.

Estos tipos de costos pueden variar entre diferentes constructores, pero puede mantenerse un mismo porcentaje en largos periodos que pueden beneficiar o perjudicar a cualquier empresa al ofrecer un presupuesto.

3.2. Factores básicos por considerar para elaborar un presupuesto de tanques verticales de acero

Entre los más importantes a considerar están:

3.2.1. Localización y ubicación

Tiene como función analizar los posibles lugares donde se puede ubicar el proyecto, con el fin de establecer la ubicación que ofrecerá los máximos beneficios y mejores costos. En esta decisión se debe de tomar algunos aspectos importantes que pueden influir considerablemente en el presupuesto:

- Para estudio de factibilidad:
 - Vías de comunicación y medios de transporte.

- Normas y regulaciones específicas de la zona.
- Disponibilidad de recursos: mano de obra, materias primas, servicios y comunicaciones.
- Costos de transporte de insumos y de productos.
- Para construir el tanque:
 - Tipo de suelo, para determinar si el tanque necesitará una cimentación especial o estará apoyado sobre el terreno mismo.
 - Condiciones climáticas: la temperatura puede afectar el acero considerablemente, principalmente en el montaje de la estructura
 - Zona sísmica, para fines de análisis y diseño de la estructura.
 - Altitud del terreno: dependerá del uso para el que se requiera el tanque.

3.2.2. Temperatura del lugar

Aunque es difícil establecer las propiedades físicas y mecánicas del acero debido a que estas varían con los ajustes en su composición y los diversos tratamientos térmicos, químicos o mecánicos que tienen en su elaboración, es importante tomar en cuenta el clima y temperatura a la cual estará expuesto el acero. Este se puede encoger o estirar y puede ocasionar errores graves en el montaje de las estructuras, especialmente para lograr un diámetro uniforme a lo largo de su altura.

3.2.3. Diseño

El diseño debe estar estrictamente apegado a las normas establecidas. Existen diferentes normas para construcción y diseño de estos tipos de tanques.

Se podrá elegir la que mejor se ajuste a los requerimientos del cliente y a su presupuesto; en el diseño de un tanque se debe tomar en cuenta:

- El peso del tanque y su contenido
- Condiciones extremas de presión y vacío
- Propiedades del material en función del líquido por contener
- Cargas adicionales: escaleras, plataformas, conexiones de tubería, etc.
- Cargas ocasionadas por sismos
- Cargas de empuje ocasionadas por el viento
- Aislamiento y recubrimiento
- Esfuerzos de corte, tensión y compresión
- Considerar anillos de refuerzo por viento, especialmente en tanques sin techo.

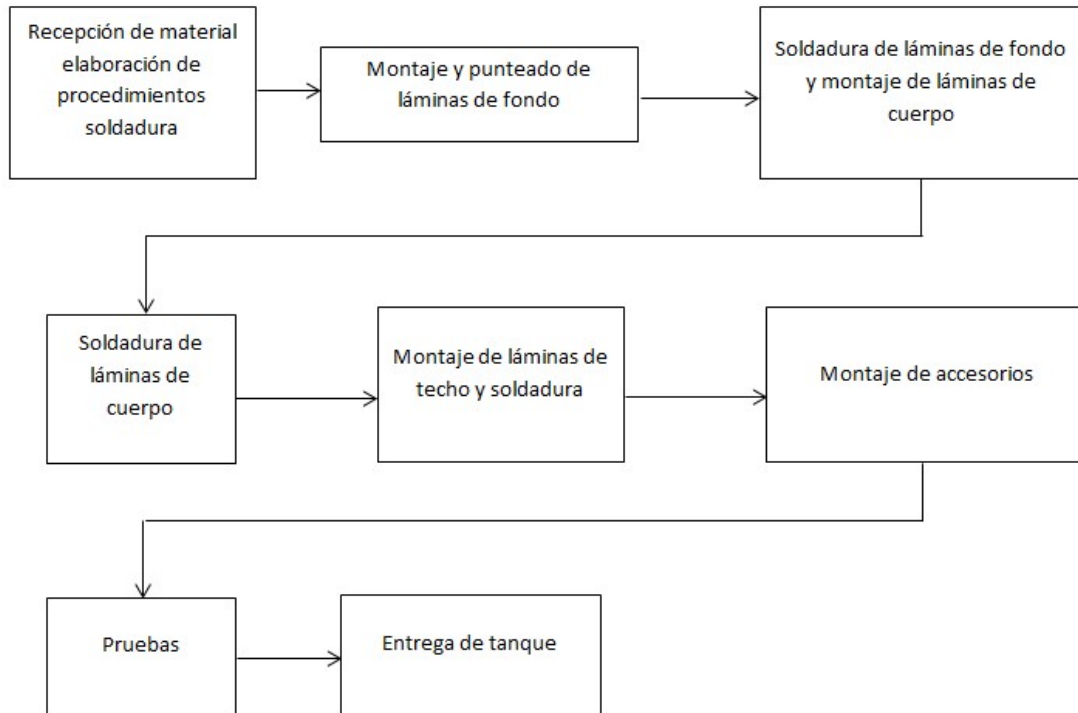
3.2.3.1. Presión manométrica a la que estará sometido el tanque

Los tanques de almacenamiento pueden tener un incremento en su presión interna, lo que puede causar peligro en la estructura del depósito cuando poseen techos. Es importante considerar las boquillas de venteo para que la sobrepresión no afecte el tanque y pueda expulsarla.

3.2.4. Conocimientos básicos de construcción

El contratista deberá proporcionar toda la mano de obra, material, herramientas y equipos necesarios para la construcción del tanque. Es importante que la persona encargada de elaborar el presupuesto del proyecto tenga conocimientos sobre la fabricación y montaje de estas estructuras, lo que ayudará a realizar una correcta planificación del proyecto.

Figura 21. **Procedimiento básico de construcción**



Fuente: Felix Roberto Ismael. *Diseño y simulación de un tanque de techo fijo para almacenar petróleo de 3.000 bls. de capacidad*, Quito Ecuador, diciembre 2011. p. 108.

Los tanques verticales se pueden construir de dos maneras:

- Tipo tradicional: de abajo hacia arriba, de la siguiente manera:
 - El fondo del tanque se monta sobre una base armada con planchas de acero que se sueldan entre sí.
 - Los anillos se montan mediante soldadura vertical, a partir de planchas de acero de hasta 3 m de ancho.
 - Los siguientes anillos se sueldan encima del anterior mediante soldadura horizontal.
 - El techo es lo último que se instala.

- Tipo jack-up: de arriba hacia abajo, de la siguiente manera:
 - Similar al tradicional, el fondo del tanque se monta sobre una base armada con planchas de acero que se sueldan entre sí.
 - A lo largo del perímetro del fondo se instala un sistema de gatos hidráulicos.
 - Se arma el techo por separado y se eleva mediante una grúa. Paralelamente, el cuerpo que irá unido al techo se suelda mediante soldadura vertical y se monta sobre los gatos hidráulicos. Se suelda el techo al anillo montado y el conjunto se eleva con los gatos hidráulicos.
 - Se arman los anillos siguientes y se van elevando con los gatos hidráulicos. Se sueldan a los anteriores mediante soldadura horizontal, y así sucesivamente hasta soldar el anillo inferior al piso del tanque.

3.2.4.1. Materiales

Los materiales utilizados para la fabricación deben de ser nuevos y libres de defectos. Deberán ser aprobados por el ingeniero a cargo. No es permitido reutilizar materiales que se hayan utilizado para la fabricación parcial o total de algún otro equipo y deben cumplir con los requerimientos citados en las normas API y AWWA.

Algunos materiales de uso común en la fabricación y montaje de estos tipos de tanques son:

- Planchas de acero al carbono, especificación ASTM A-283, ASTM-A-285 Grado C y ASTM-A36.
- Electrodo recubierto, E-6010 y E-7018 para material estructural, tubería y conexiones.

- Material estructural (perfiles) ASTM A-36.
- Tuberías ASTM A-106 Grado B, ASTM A-53 Grado B.
- Conexiones ASTM A-234 WPB.
- Tornillería ASTM A-307 Grado B.
- Espárragos ASTM A-193 Grado B-7.
- Tuercas ASTM A-194 Grado 2H.
- Válvulas de compuerta y válvulas de check ASTM-A216 WCB, ASTM-A-105.
- Empaques de micarta o fibra sintética dieléctrica.
- Drenes, mangueras flexibles.
- Recubrimientos: todos los recubrimientos estarán de acuerdo al tipo de servicio. Los recubrimientos más ampliamente usados son los derivados asfálticos, las pinturas y las gomas.

3.2.5. Tiempo de construcción

Es importante garantizar al comprador el tiempo en el que se le entregará el proyecto terminado cuando este lo exija. Es importante realizar un cronograma de actividades en el cual el supervisor de la obra sea el responsable de cumplir con los objetivos para cada renglón de trabajo.

El tiempo de construcción dependerá de las dimensiones del tanque por construir. La ventaja de utilizar planchas de acero es que el proceso de construcción es mucho más rápido en comparación con el concreto, debido a que el acero no sufre retracción o fluencia. Por tanto, puede asumir carga de inmediato y ponerse en funcionamiento al finalizar el montaje del mismo.

3.2.6. Funcionalidad

Mientras el tanque esté en funcionamiento su durabilidad estará afectada a lo largo del tiempo. Se debe de considerar que esta generará costos periódicamente de mantenimiento.

3.2.7. Durabilidad

Es una propiedad importante e indispensable en todos los proyectos, por lo que se debe garantizar que el tanque tenga la capacidad y calidad de resistir las condiciones de servicio. El ACI-2010 define la durabilidad como la habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro.

La corrosión es la mayor desventaja de los aceros ya que se oxida con facilidad, lo que puede provocar grietas superficiales en la estructura. Garantizar la durabilidad de una estructura está en función de la vida útil de la misma. Entre los factores más importantes para lograrla se puede mencionar:

- Óptima selección de materiales.
- Programas de mantenimiento.
- Un diseño eficiente. La persona encargada deberá tener conocimiento de las condiciones de servicio para un correcto diseño.
- Proceso constructivo y supervisión de cada etapa de fabricación y montaje.

3.2.8. Calidad

Es el punto más importante que se debe tener en cuenta en todos los proyectos elaborados por profesionales, ya que es el indicador más importante para medir la eficiencia de cualquier profesional. Esto se traduce en términos de riesgos, costo y beneficios. El tanque deberá garantizarse contra materiales defectuosos, mano de obra, diseño y fallas durante la operación normal.

3.2.9. Planificación

Esta fase permitirá definir los propósitos y elegir estrategias para la ejecución de los objetivos del proyecto. El objetivo de esta fase es asegurar que se han considerado todos los recursos, evaluados todos los riesgos que puedan existir en las actividades por desarrollar durante la construcción.

3.2.9.1. Actividades particulares

Entre las actividades más importantes que serán necesarias para la construcción del tanque y objeto de la planificación se puede mencionar:

- Trabajos preliminares.
- Excavación, relleno y nivelación del sitio.
- Cimentación (armado del acero refuerzo, encofrado de concreto, colado y curado del concreto, desencofrado, entre otros.)
- Relleno y compactación.
- Construcción del fondo y cuerpo del cilindro.
- Preparación de superficies y revestimiento.
- Pruebas y desinfección.
- Acoples e instalación de tuberías y válvulas.

3.2.10. Planos de taller

Antes de comenzar con la fabricación de las partes, se debe contar con los respectivos planos de taller. En estos deben estar detallados los materiales, soldadura por utilizar y modos de armado de los elementos que conformarán el tanque. Los planos deberán mostrar de forma clara y legible las formas, dimensiones, detalles, conexiones y accesorios por utilizar, incluyendo la identificación de la soldadura.

3.3. Aceros utilizados en la construcción de tanques

El acero tiene una vida útil casi ilimitada. Al termina la vida útil de una estructura, puede ser desmontada y reutilizada en nuevos usos o ser reaprovechada para reciclaje. Actualmente, el acero es uno de los materiales más utilizados en la construcción, ya que posee una gran resistencia, es dúctil; es decir, tiene la capacidad de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión. Esto permite que la sección transversal de los elementos que conformen una estructura puede tener una sección trasversal menor en el caso de las estructuras construidas en concreto.

Otras ventajas de los aceros es que las estructuras pueden ser preparadas previamente en taller, por lo que se entrega prácticamente prefabricado en obra. Se necesita solo realizar un mínimo de operaciones para terminar.

En Guatemala, estos tipos de acero se pueden encontrar con el nombre de lámina negra, que es de clasificación de acero A-36.

3.3.1. Lámina negra y placa

Son planchas de acero obtenidas por laminación en caliente. Se comercializan en espesores desde 1,35 mm hasta 2 pulgadas. Son utilizadas en estructuras de construcción, fabricación de vigas y columnas, platinas, paredes de tanques, maquinaria, entre otros.

3.4. Fabricación y montaje

Luego de determinar los requerimientos de proceso operativo, capacidad del tanque y el sitio de instalación, así como contar con los documentos de aprobación ante las autoridades correspondientes, se podrá proceder con la fabricación y montaje del tanque vertical.

La fabricación y el montaje tienen diferentes etapas de construcción en las que influye la mano de obra y contar con el equipo necesario. Esto puede generar un incremento considerable en los costos, por lo que se analiza lo más básico:

3.4.1. Compra de materiales

Es muy importante contar con los planos de diseño como de taller, revisar si los materiales por adquirir son los especificados y que no posean imperfecciones que puedan afectar la funcionalidad o apariencia del tanque en el proyecto. El acero y el material para soldadura (electrodos) se compran por unidad de peso. Las dimensiones de las planchas metálicas nunca serán iguales por lo que se deben de trabajar en taller previamente.

3.4.2. Trabajos de taller

El trabajo de taller es donde se preparan todas las piezas que conformarán la estructura. Se hace preensamblado de algunas piezas para luego ser transportados al lugar del proyecto. En algunos casos, cuando los requerimientos del tanque lo exijan, el taller puede ser instalado en el lugar. Entre los principales trabajos realizados en taller está el corte y rolado de planchas metálicas, por lo que es importante seleccionar e indicada cada una de las planchas que pasarán los procesos de corte y rolado en base a los planos de diseño.

3.4.2.1. Corte y biselado de planchas

Debido a que las planchas de acero adquiridas tendrán variación en cuanto a sus dimensiones, estas deben ser cortadas para poder adaptarlas a dimensiones iguales. Tienen forma rectangular y ángulos rectos en sus esquinas para facilitar el proceso de montaje.

Las planchas del fondo deberán ser cortadas de tal manera que las orillas sobresalgan por lo menos 50 mm de la orilla exterior de la soldadura que une al fondo con las placas del cuerpo del tanque. Deberán tener un ancho mínimo de 1,8 m. Las planchas del cuerpo del tanque tendrán un ancho de 1,8 m por 6 m de longitud. Los espesores de cada plancha estarán indicados por los planos de diseño para cada anillo según las normas API y AWWA.

Se debe identificar cada una de las planchas requeridas para conformar el fondo y cuerpo del tanque, con número de anillo y posición que le corresponda a cada una. Todas las planchas deben estar libres rebabas y sin filo que pueda ocasionar algún accidente al personal.

Para el proceso de corte y biselado se debe utilizar un sistema de corte semiautomático donde se pueda fijar las medidas y ángulo de biselado de acuerdo con los procedimientos de soldadura establecidos y las dimensiones requeridas.

En la tabla XIII se detallan las presiones óptimas de oxígeno y acetileno para corte con boquilla HA-311.

Figura 22. **Sistema de corte semiautomático**



Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*, Guayaquil Ecuador. p. 150.

Tabla XIII. **Corte para boquillas HA-311-acetileno**

Boquilla	Material	Acetileno		oxigeno		Velocidad de corte mm./min
		Presión (KPA)	Flujo (m3/h)	Presión (KPA)	Flujo (m3/h)	
HA 311-1	1 a 3	30-80	0.1	50-250	1.3	Máx. 100
HA 311-2	3 a 10	30-80	0.3	100-250	1.6	950 - 430
HA 311-3	10 a 25	30-80	0.4	155-410	3.6	580 - 350
HA 311-4	25 a 50	30-80	0.5	155-410	6.8	500 - 300

Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*, Guayaquil Ecuador. p. 150.

3.4.2.2. Rolado de planchas

Consiste en dar la forma curva a cada plancha que corresponde al diámetro del tanque, por medio de una máquina roladora con personal calificado para estos trabajos.

Figura 23. **Máquina para rolado de planchas metálicas**

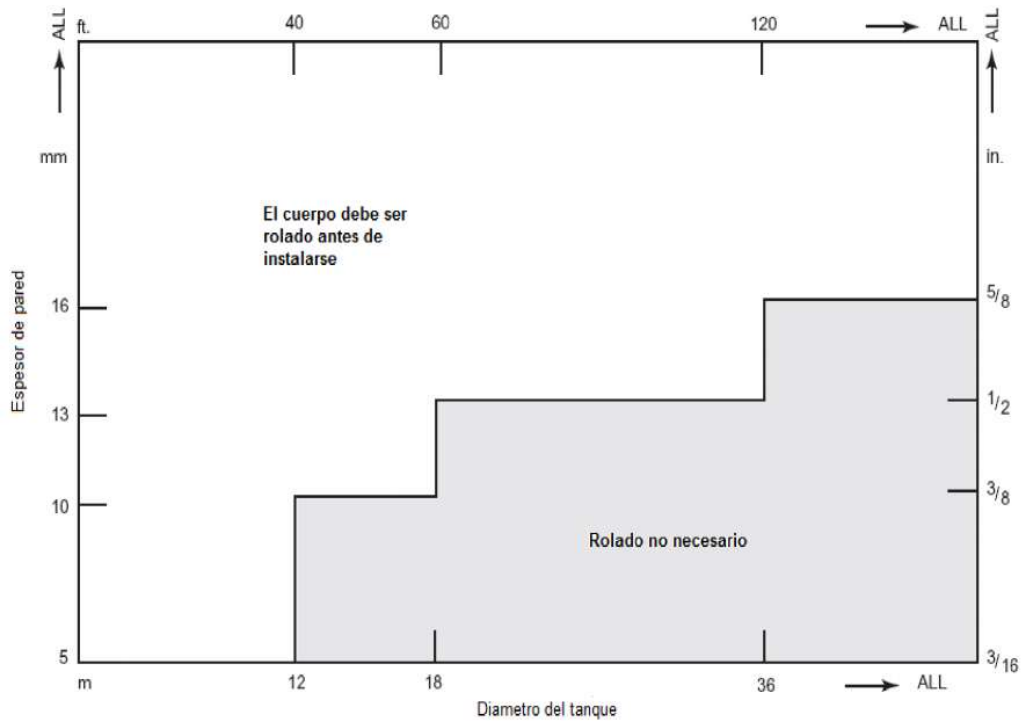


Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*, Guayaquil Ecuador. p. 151.

Por medio de una plantilla guía que contenga la forma de una sección perimetral del diámetro especificado, se podrá verificar la curvatura de la plancha.

Es importante tomar en cuenta que no todas las planchas de acero deben ser roladas para lograr el diámetro requerido. Estas decisiones pueden ser tomadas por la persona a cargo del proyecto con base en las especificaciones de API-650 establece una combinación de diámetros y espesores para las cuales se puede considerar no rolar las planchas. Estos son indicados en la siguiente figura.

Figura 24. **Consideraciones para rolado de planchas**



Fuente: código API-650, figura 6-1. p.6.

3.4.3. Transporte y almacenaje de materia prima

Los costos de transporte de la materia al lugar del proyecto estarán función de la cantidad y peso por transportar, como de la distancia a la que se encuentre el proyecto. Se deberá tener mucho cuidado al transportar las planchas, especialmente las roladas, ya que pueden perder su curvatura fácilmente. Es importante tomar en cuenta la superficie del terreno como las pendientes a las cuales puede estar sometido el camión transportador, ya que podría generar problemas para su llegada a proyecto.

Como en todo proyecto de construcción, es importante tomar en cuenta en los costos un área de bodega para proteger de la intemperie toda la materia prima, maquinaria y equipo que se utilizará en el proyecto. Se deberá tener precaución para almacenar las planchas de acero, cuidando que no pierdan su curvatura, de la misma forma para las planchas del fondo y techo, para que no sufran ningún desgaste o deformación. En algunos casos, dependiendo la situación del clima, se recomienda aplicar dos manos de pintura anticorrosiva a toda la superficie de la placa superior de cada torre donde estén apilados estos materiales. De igual manera deberá protegerse los bordes y biseles de las planchas.

Para la soldadura se deberá almacenar en un espacio seco y con control de temperatura (hornos para conservación de electrodos) de acuerdo con el tipo de electrodo, para protegerlos de la humedad.

3.4.4. Trabajos en campo

Antes de comenzar con cualquier trabajo de campo es necesario estudiar y analizar detalladamente los planos del proyecto, los cuales deberán permanecer

en la obra para cualquier consulta. Para un buen inicio de montaje del tanque, es importante contar con un lote completo de herrajes auxiliares para armados.

3.4.4.1. Soldadura

Un soldador es quien realiza la operación de soldadura de forma manual o semiautomática y controla las acciones de la soldadura. Según API-650 y AWWA D-100 los procedimientos y calificación de soldadura están de acuerdo con las especificaciones del código ASME.

Para desarrollar los procedimientos de soldadura se debe tomar en cuenta:

- Materiales por soldarse
- Materiales de aporte
- Procesos de soldadura que se utilizará
- Producción requerida

Para cada proceso y junta de soldadura se debe realizar un cupón de prueba, del cual se obtienen las probetas necesarias para realizar pruebas mecánicas de calidad (tracción, dobles y de impacto).

Para soldadura manual se utiliza comúnmente electrodos tipo E6010, E6013 y E7018. Estos deberán ser de bajo contenido de hidrógeno y adecuado para el material de la lámina que será soldada. Las tuberías, accesorios y perfiles estructurales de acero se recomienda electrodos tipo E6010 y E7018 o similar, según el requerimiento.

3.4.4.2. Montaje del fondo

El tanque puede estar apoyando directamente sobre el suelo siempre y cuando se haya hecho un estudio de suelos y este pueda resistir las cargas del tanque. Si no cumple se debe de mejorar las propiedades del suelo o bien podrá ser montado sobre un anillo de concreto. El anillo soportará el peso producido por el cuerpo y techo del tanque (si tuviera) y el fondo deberá descansar sobre una cama de arena limpia, compactada de por lo menos 75 mm de espesor.

Figura 25. **Cimentación anular del tanque**



Fuente: María Fernanda

Ramírez.<http://sample.virtualdiseno.com/suelos/index.php/experiencia/construccion>.

Consulta: enero 2018

Para iniciar el montaje del fondo se debe determinar el centro del tanque y marcarlo con un elemento resaltante. Una vez determinado el centro se colocan las planchas observando la orientación de acuerdo con los planos.

Por medio de una grúa se colocan las láminas desde un extremo hacia otro y una vez posicionadas se marcan para asegurar el traslape, que no deberá ser menor de 30 mm, por lo que comúnmente se trabaja de 40 mm.

Luego se deben ubicar los topes para limitar el movimiento de la lámina que quedará traslapada por encima de la anterior. Este procedimiento se debe seguir hasta llegar al centro. Después de pasar por el centro, las láminas deben ir quedando traslapadas por debajo. Se recomienda puntear las placas entre sí para sostenerlas en su lugar. Para esto se deberá contar con grúa o montacargas.

Figura 26. **Traslapes**



Traslape exterior



Traslape interior

Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*. Guayaquil Ecuador, p. 166.

Se debe construir con las planchas de acero traslapadas hacia la dirección del drenaje. En caso de que no se indique, el fondo debe tener una pendiente del 1 % desde el centro del tanque hacia el perímetro del cuerpo.

Luego de haber distribuido las planchas del fondo y asegurado unas a otras con puntos de soldadura, se procede a iniciar con la soldadura general del fondo.

Figura 27. **Montaje del fondo**



Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*. Guayaquil Ecuador, p. 164.

Las placas del fondo que queden bajo el anillo inferior del cuerpo del tanque deben estar traslapadas y ajustadas de manera que el cuerpo del tanque se apoye uniformemente sobre ellas. Esta soldadura se debe aplanar sobre matriz para facilitar que el primer anillo quede a un solo nivel.

Figura 28. **Soldadura de orilla del fondo**



Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*. Guayaquil Ecuador, p. 165.

La soldadura general del fondo se debe iniciar desde la plancha central del tanque con las juntas transversales, dejando sin soldar las planchas de la orilla del perímetro. Luego se sueldan las juntas longitudinales también dejando las orilleras sueltas y por último se sueldan estas.

Las juntas soldadas deben ser examinadas con líquidos penetrantes o con la prueba de cámara de vacío con el fin de tener la certeza de que por estas no hay ninguna fuga.

3.4.4.3. Montaje del cuerpo del tanque

Las planchas de acero deben estar preparadas de manera que los anillos queden perfectamente verticales. Las juntas no deben ser colineales. Deben estar separadas por una distancia mínima de 5 veces el espesor de la plancha más gruesa de la junta o a una separación de 1/3 de longitud de placa.

Cada plancha es movilizada una por una hasta su sitio de montaje por medio de una grúa, que se debe tener permanentemente en el sitio. Es importante que, al armar el primer anillo, las juntas verticales no coincidan con las juntas del fondo. También se deberá tomar en cuenta en que una lámina del primer anillo no deberá ser montada para que este espacio sea utilizado como entrada y salida de personas y equipo de trabajo.

Figura 29. **Montaje del cuerpo**



Fuente: María Fernanda Ramírez.

<http://sample.virtualdiseno.com/suelos/index.php/experiencia/construccion>

Consulta: enero 2018.

La primera lámina del anillo por montarse debe ser la que tenga la entrada de hombre o las boquillas de carga y descarga, con el fin de que estas puedan servir para determinar la orientación del casco. Esta primera lámina debe ser soportada con puntales, con cuidado de constatar el radio interior del tanque. Este trabajo se realiza colocando guías unidas al fondo para evitar que se corran al momento de montar las otras planchas.

Luego se siguen montando las demás planchas con cuidado para mantener la tolerancia que indican los planos para soldaduras verticales. La tolerancia para esta soldadura se mantiene con espaciadores asegurados mediante cuñas. Una vez colocada cada lámina se verifica nuevamente el diámetro, perímetro y verticalidad, para poder iniciar el proceso de soldadura que permite que las planchas formen un solo anillo.

Figura 30. **Espaciadores para soldadura**



Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*. Guayaquil Ecuador, p. 169.

Las planchas montadas que constituyen los anillos del cuerpo del tanque deberán estar soldadas interna y externamente. La soldadura deberá aplicarse de abajo hacia arriba. La aplicación de las soldaduras verticales siempre deberá ser antes que las horizontales, pero en ambos casos se inicia por la parte exterior; este proceso hace que las láminas en sus juntas verticales se deformen temporalmente hacia adentro. Para corregir esto se debe limpiar las soldaduras de escorias con disco-esmeril por la parte interior del tanque y se procede a soldar la parte interna en sus juntas verticales. Las láminas regresarán nuevamente a su puesto, conservando la forma cilíndrica.

Figura 31. **Soldadura interna del cuerpo**



Fuente: Galo Enrique Jiménez Pazmiño. *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 200 toneladas de aceite de palma basado en la norma API-650-07*. Guayaquil Ecuador, p. 172.

3.4.4.4. Limpieza e inspección

Todos los materiales y trabajos de fabricación deben estar estrictamente sujetos a inspección y supervisión, en el taller y en el lugar de operación del tanque. Una vez instalado y soldado el anillo inferior del fondo, es importante inspeccionar todas las costuras del fondo y las que conecten con el cuerpo del tanque, verificando que estén correctamente selladas.

La limpieza e inspección de las soldaduras deberá hacerse simultáneamente con el avance de la soldadura. Los documentos del tanque (planos, procedimientos de soldadura, memorias de cálculo, entre otros), deben estar a disposición de la persona encargada del proyecto.

3.5. Últimas pruebas

Para todo trabajo en donde se haya utilizado soldadura, es común e importante realizar una inspección visual de todo el trabajo en busca de residuos de escoria, rebabas de soldadura y otros defectos tales como orificios y falta de llenado que puedan afectar el funcionamiento del tanque. La inspección visual se aplica también a todas las soldaduras interiores y exteriores del cuerpo del tanque, así como a los accesorios y las juntas entre el cuerpo y el fondo.

Las pruebas que deberán ser controladas son las de verticalidad y redondez. Los requerimientos mínimos están especificados en ambas normas y en ninguna existe alguna variación; otra prueba importante antes de finalizar es la prueba hidrostática, ya que con esta se asegura de que en el tanque no existan pequeños orificios o fugas que puedan afectar el funcionamiento.

Si la soldadura no cumpliera con los criterios de aceptación, se deberá reparar antes de la prueba hidrostática con las siguientes consideraciones:

- Cualquier efecto debe ser removido por medios mecánicos.
- Las rastrilladuras del arco debe ser reparadas puliendo y resoldando.
- La soldadura debe ser pulida a ras con la plancha.
- Las soldaduras de reparación se deben inspeccionar visualmente para verificar que no tienen defectos.

3.5.1. Verticalidad

La máxima desviación de la verticalidad desde la parte superior del cuerpo y el fondo no deberá exceder $1/200$ de la altura total del cuerpo del tanque. Este

criterio también debe de ser aplicado a las columnas de soporte de tanques con techo. Se deben de tomar un mínimo de 8 mediciones de verticalidad.

3.5.2. Redondez

Los radios de los anillos del cuerpo medidos a 300 mm arriba del fondo tomando 4 mediciones como mínimo, no excederán las tolerancias indicadas en la siguiente tabla:

Tabla XIV. Tolerancia de redondez

Tank Diameter m (ft)	Radius Tolerance mm (in.)
< 12 (40)	± 13 (1/2)
From 12 (40) to < 45 (150)	± 19 (3/4)
From 45 (150) to < 75 (250)	± 25 (1)
≥ 75 (250)	± 32 (1 1/4)

Fuente: API 650-07, p. 7.

3.5.3. Pruebas radiográficas

Se deberá realizar pruebas radiográficas para las soldaduras a tope del cuerpo del tanque. Según API-650 y AWWA D-100, las siguientes consideraciones son de acuerdo al código para un tanque con espesores menores a 10 mm.

- Juntas verticales del cuerpo

Se toma un examen radiográfico en los primeros 3 m de soldadura terminada de cada tipo y espesor soldada por cada soldador. Posteriormente se toma un examen radiográfico a cada 30 m de soldadura. Al menos el 25 % de los exámenes seleccionados deben quedar en los cruces entre las juntas verticales y las juntas horizontales.

- Juntas horizontales del cuerpo

Se debe tomar un examen radiográfico en los primeros 3 m de soldadura terminada de cada tipo y espesor, sin importar el número de soldadores. Después se toma un espesor radiográfico cada 60 m de soldadura.

Cada radiografía debe de tener una longitud mínima de 150 mm de soldadura. La aceptación de las radiografías está de acuerdo a ASME VII párrafo UW-51(b), donde indica los criterios para espesores menores a 10 mm.

3.5.4. Prueba hidrostática

Esta prueba se realiza con el fin de verificar y controlar que los asentamientos del tanque producidos por el producto por almacenar, no vayan a deformarse o colapsar el mismo.

Para realizar esta prueba, el tanque debe estar completamente limpio y libre de basura, residuos de soldadura, entre otros. Debe llenarse el tanque hasta el anillo de coronamiento, con agua limpia a una temperatura no mayor de 40° y no menor de 18°C. Luego de realizar esta prueba el tanque debe ser vaciado completamente para luego hacer una última inspección.

3.6. Accesorios para la fabricación de la estructura

A continuación, se detallan los accesorios principales:

3.6.1. Escaleras y plataformas

- Todos los tanques deben tener por lo menos una escalera y plataforma con barandas de seguridad en el techo para permitir el acceso a la inspección cuando este se encuentre en funcionamiento.
- Los tanques de hasta 6 metros de altura deben suministrarse con escalera vertical (marina) con guardas de seguridad.
- El piso de las plataformas debe ser de placa antideslizante o de rejilla.
- Todos los accesorios deben ser de acero galvanizado.

3.6.2. Boquillas

Es importante tomar en cuenta la instalación de las boquillas en los tanques, las más utilizadas son para:

- Entrada de producto
- Salida de producto
- Venteos
- Entrada de hombre en el techo (no aplica para este caso).
- Todas las conexiones de 1 ½ in de diámetro y mayores deben ser bridadas y las conexiones menores de 1 ½ in deben ser coplas roscadas.

3.7. Acabados y pintura

La preparación de superficies antes de pintar el tanque deberá ser “limpiándolo a chorro” (ver tabla XV). Posteriormente, todas las superficies en cuestión deberán soplarse con aire comprimido o limpiarlas al vacío con fin el de quitar toda traza de los productos utilizados, extraer los abrasivos de todas las cavidades y esquinas.

Tabla XV. **Sistemas para preparación de superficie**

Sistema de Revestimiento	Preparación de la Superficie	Tipos de Revestimiento Aceptables
Interior Tanques de Acero	SSPC SP10 Limpieza a chorro de metal casi blanco	Sur Eticoat Fondo Enlace Epóxico-Poliámida Código 9255-720
Exterior Tanques de Acero	SSPC SP6 Limpieza a chorro de metal comercial	Sur Eticoat Primario Universal (Epóxico) Código 9273-600/625-900 series

Fuente: PEMEX. http://www.bvsde.org.ni/Web_textos/Enacal/Enacal0028/cap13.pdf. p.95
consulta: 2 de marzo de 2017.

La primera mano deberá aplicarse lo más pronto posible después de que se hayan aprobado las operaciones de preparación y limpieza. El espesor total de pintura deberá cumplir con un rango mínimo de espesor de 12 a 15 milímetros en estado seco. No deberá utilizarse dentro del tanque pinturas, imprimadores o diluyentes que sean perjudiciales al agua potable.

La pintura deberá ser aplicada por personal experimentado, sobre superficies completamente limpias, libres y secas, para formar una capa delgada pero uniforme sobre todas las superficies. Se recomienda dejar un tiempo de secado de 24 horas por cada capa por aplicarse.

Se deberá tomar las medidas y precauciones necesarias para proveer ventilación adecuada cuando se esté trabajando en el interior del tanque para así extraer los vapores y evitar daños a los trabajadores o la posibilidad de que se acumulen gases volátiles. Cada trabajador, cuando esté dentro del tanque y se esté aplicando pintura epóxica, debe estar protegidos con máscaras con alimentación de aire.

3.7.1. Pinturas epóxicas

La pintura epóxica es un revestimiento no-tóxico, impermeabilizante y anticorrosivo, fabricado a base de resina epóxica, prácticamente libre de solventes. Su uso es recomendado para una amplia gama de aplicaciones, entre las cuales destacan el almacenaje de alimentos y de agua potable, ya que sus propiedades satisfacen estos especiales requerimientos. El proceso de revestimiento se realiza mediante proyección de pintura, pudiendo ser interno, externo o sobre ambas superficies.

4. ANÁLISIS DE COSTOS PARA TANQUES VERTICALES DE ACERO

En este capítulo se analizarán los costos para la fabricación del cascarón de cada tipo de tanque, los cuales estarán representados por medio de tablas con base en los diseños calculados del capítulo 2.

Tabla XVI. Resumen de espesores para tanque de 500m³

API				AWWA			
Anillo	Espesor diseño (mm)	Espesor comercial (in)	Espesor comercial (mm)	Anillo	Espesor diseño (mm)	Espesor comercial (in)	Espesor comercial (mm)
1	5	3/16	4,76	1	7	5/16	7,94
2	5	3/16	4,76	2	6	1/4	6,35
3	5	3/16	4,76	3	6	1/4	6,35
4	5	3/16	4,76	4	5	3/16	6,35
5	5	3/16	4,76	5	5	3/16	6,35
6	5	3/16	4,76	6	5	3/16	6,35
Fondo	6mm	1/4	6,35	Fondo	7 mm	5/16	7,94

Fuente: elaboración propia.

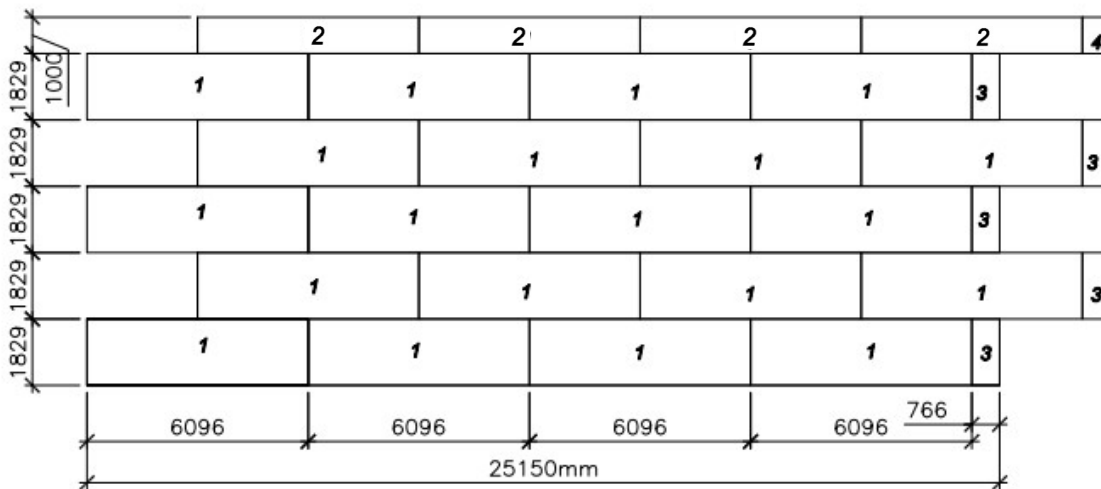
4.1. Cuantificación de planchas de acero

En las siguientes tablas se muestra la cantidad en peso de las planchas necesarias para la fabricación del cascarón del tanque. Los precios de las planchas de acero están dados en quetzales/libra, y es de Q 3,00 por libra según dato de Multiperfiles S.A. de Guatemala, mes de septiembre en el año 2018 (ver anexos I).

4.1.1. Según diseño API-650

Para la norma API, se tiene un perímetro de 25 150 mm (25,15 m), y si las planchas por cuantificar tienen un tamaño de 1 829 mm x 6 096 mm (6x20 pies), se podrá distribuir de la siguiente manera:

Figura 32. Distribución de planchas para norma API



Fuente: elaboración propia.

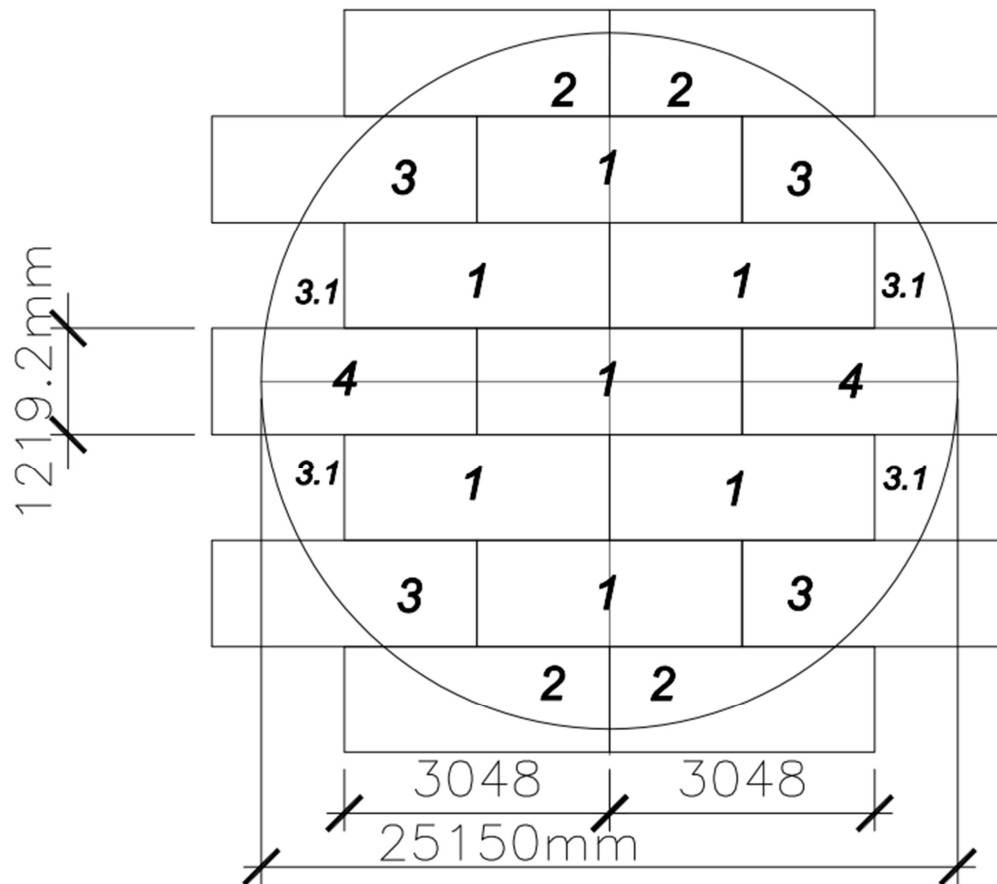
1. 4,76 mm x 1 829 mm x 6 096 mm = 20 unidades
2. 4,76 mm x 1 000 mm x 6 096 mm = 4 unidades
3. 4,76 mm x 1 829 mm x 766 mm = 5 unidades
4. 4,76 mm x 1 000 mm x 766 mm = 1 unidad

Se necesitarán 25 planchas, las cuales deberán ser 24 enteras (1 y 2) y una extra para cortar para los pedazos faltantes (3 y 4).

Para el fondo se cuantificaron 17 planchas de 1 219,2 mm X 3 048 mm (4 x 8 pies) con el fin de obtener el menor desperdicio. Se utilizarían 7 planchas

enteras (1), 10 que se necesitarían cortar para dar la forma al cilindro (2, 3, 4). Con las porciones sobrantes se podrá completar el fondo y así evitar desperdicio (3.1).

Figura 33. **Distribución de planchas del fondo**



Fuente: elaboración propia.

La siguiente tabla hace referencia al peso total de la estructura principal del cascarón del tanque.

Tabla XVII. Distribución de peso para tanque API-650

Norma	Seccion	Plancha	Cant.	Peso unitario (Lb)	Peso total (Lb)	Peso total (Lb)
A P I	Cuerpo	4,76 mm x 1 829 mm x 6 096 mm	25	918,7	22968,5	43798,3
	Fondo	6,35 mm x 1 219,2 mm x 3 048 mm	17	1225,3	20829,8	

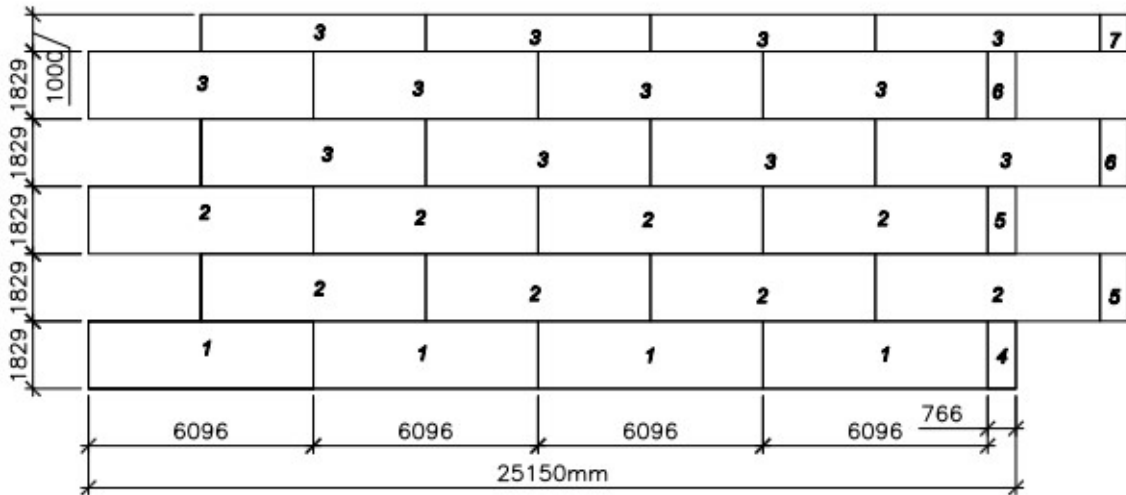
Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Según diseño AWWA D-100

Para la norma AWWA, hay 3 diferentes espesores distribuidos en los 6 anillos. Esto podrá generar un mayor desperdicio específicamente para este tamaño de tanque, por lo que dependerá del diseño y cuantificador el buscar el menor desperdicio posible.

Las planchas para la cuantificación tienen un tamaño de 1 829mm x 6 096mm (6 x 20 pies) y quedará distribuido de la siguiente manera:

Figura 34. **Distribución de planchas para norma AWWA**



Fuente: elaboración propia.

1. 7,94 mm x 1 829 mm x 6 096 mm = 4 unidades
2. 6,35 mm x 1 829 mm x 6 096 mm = 8 unidades
3. 4,76 mm x 1 829 mm x 6 096 mm = 8 unidades
4. 4,76 mm x 1 000 mm x 6 096 mm = 4 unidades
5. 7,94 mm x 1 829 mm x 766 mm = 1 unidad
6. 6,35 mm x 1 000 mm x 766 mm = 2 unidades
7. 4,76 mm x 1 829 mm x 766 mm = 2 unidades
8. 4,76 mm x 1 000 mm x 766 mm = 1 unidad

Se necesitarían 28 planchas para el cuerpo del tanque, las cuales se dispondrá de 24 planchas enteras (1, 2, 3 y 4) y con las 4 restantes se podrán utilizar porciones de planchas para cerrar la circunferencia del cilindro (5, 6, 7 y 8), y así generar el menor desperdicio.

Las planchas del fondo fueron distribuidas de la misma forma que en el diseño anterior, cambiando solo el espesor 7,94 mm (ver figura 33).

La siguiente tabla hace referencia al peso total de la estructura principal del cascarón del tanque.

Tabla XVIII. Distribución de peso para tanque AWWA D-100

Norma	Seccion	Plancha	Cant.	Peso unitario (Lb)	Peso total (Lb)	Peso total (Lb)
A W W A	Cuerpo	7,94 mm x 1 829 mm x 6 096 mm	5	1531,7	7658,4	56668,1
	Cuerpo	6,35 mm x 1 829 mm x 6 096 mm	9	1225,3	11027,5	
	Cuerpo	4,76 mm x 1 829 mm x 6 096 mm	13	918,7	11943,6	
	Fondo	7,94mm x 1 219,2 mm x 3 048 mm	17	1531,7	26038,6	

Fuente: elaboración propia.

4.2. Costos unitarios para corte de planchas metálicas

Los equipos necesarios para realizar los procesos de corte para las láminas de 7,94 mm, 6,35 mm y 4,78 mm se describen en las siguientes tablas, con sus costos unitarios.

Tabla XIX. Equipo corte (4,78 mm)

Descripción	Cantidad	Costo diario (Q/día)	Rendimiento (ton/día)	Costo unitario (Q/ton)
Puente grua 5 ton	1	Q. 797,60	10,61	Q. 75,17
Pulidoras	1	Q. 7,40	10,61	Q. 0,70
Equipo de oxicorte	1	Q. 206,75	10,61	Q. 19,49
Herramientas menores	1	Q. 5,92	10,61	Q. 0,56
			Total	Q. 95,92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Equipo corte (6,35 mm)

Descripción	Cantidad	Costo diario (Q/día)	Rendimiento (ton/día)	Costo unitario (Q/ton)
Puente grúa 5 ton	1	Q. 797,60	8,59	Q. 92,85
Pulidoras	1	Q. 7,40	8,59	Q. 0,86
Equipo de oxicorte	1	Q. 206,75	8,59	Q. 24,07
Herramientas menores	1	Q. 5,92	8,59	Q. 0,69
			Total	Q. 118,47

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Equipo corte (7,94 mm)

Descripción	Cantidad	Costo diario (Q/día)	Rendimiento (ton/día)	Costo unitario (Q/ton)
Puente grúa 5 ton	1	Q. 797,60	6,57	Q. 121,40
Pulidoras	1	Q. 7,40	6,57	Q. 1,13
Equipo de oxicorte	1	Q. 206,75	6,57	Q. 31,47
Herramientas menores	1	Q. 5,92	6,57	Q. 0,90
			Total	Q. 154,90

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Consumibles

Las siguientes tablas indican el consumo de oxígeno, acetileno, tiempo y velocidad de cada proceso en que se realiza según cada espesor de lámina, según tabla XIII (pág. 69).

Para el tanque con el diseño API se cuantificaron los metros necesarios de corte para cada plancha por medio del programa Autocad y así poder calcular los demás elementos de la tabla.

Tabla XXII. Corte (consumibles boquilla HA-311-2)

Norma	Sección	Corte (m)	Velocidad (mm/min)	Tiempo (hrs)	Consumo oxígeno (m3)	Consumo acetileno (m3)
A P I	Cuerpo (4,76 mm)	403,25	825	8,15	13,03	2,44
	Fondo (6,35 mm)	89,22	700	2,12	3,40	0,64

Fuente: elaboración propia.

Por seguridad se aumenta a un 5 % de desperdicio en oxígeno y acetileno, los costos de consumibles al utilizar oxicorte según serán:

Tabla XXIII. Resumen de consumibles según tanque API

Oxicorte	Consumo	Unidad	Rendimiento	Pedido	Costo unitario	Costo Total
Oxígeno	17,26	m3	U/10 m3	2,00	Q. 350,00	Q. 700,00
Acetileno (1.11 kg/m3)	3,59	kg	U/6 kg	1,00	Q. 1 200,00	Q. 1 200,00
Discos de pulir	25,00	u	25 mt / u	20	Q. 35,00	Q. 700,00
TOTAL						Q. 2 600,00

Fuente: elaboración propia.

Para el tanque con el diseño AWWA se cuantificaron las siguientes cantidades:

Tabla XXIV. Corte (consumibles boquilla HA-311-2)

Norma	Sección	Corte (m)	Velocidad (mm/min)	Tiempo (hrs)	Consumo oxígeno (m3)	Consumo acetileno (m3)
A W W A	Cuerpo (7,94 mm)	68,59	575	1,99	3,18	0,60
	Cuerpo (6,35 mm)	137,18	700	3,27	5,23	0,98
	Cuerpo (4,76 mm)	197,48	825	3,99	6,38	1,20
	Fondo (7,94 mm)	89,22	575	2,59	4,14	0,78

Fuente: elaboración propia.

Por seguridad se aumenta a un 5 % de desperdicio en oxígeno y acetileno. Los costos de consumibles al utilizar oxicorte serán:

Tabla XXV. Resumen de consumibles según tanque AWWA

Oxicorte	Total	Unidad	Rendimiento	Pedido	Costo unitario	Costo Total
Oxígeno	19,87	m3	U/10 m3	2,00	Q. 350,00	Q. 700,00
Acetileno (1.11 kg/m3)	4,14	kg	U/6 kg	1,00	Q. 1 200,00	Q. 1 200,00
Discos de corte	25,00	u	25 mt / u	20	Q. 35,00	Q. 700,00
					TOTAL	Q. 2 600,00

Fuente: elaboración propia.

4.3. Costos unitarios para rolado de planchas metálicas

En las siguientes tablas se muestran los costos unitarios para el proceso de rolado de las planchas según cada espesor.

Tabla XXVI. Equipo rolado (4,78 mm)

Descripción	Cantidad	Costo diario (Q/día)	Rendimiento (ton/día)	Costo unitario (Q/ton)
Puente grúa 5 Ton	1	Q. 797,57	15,43	Q. 51,69
Roladora	1	Q. 1 829,25	15,43	Q. 118,55
Herramientas menores	1	Q. 5,92	15,43	Q. 0,38
			Total	Q. 170,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Equipo rolado (6,35 mm)

Descripción	Cantidad	Costo diario (Q/día)	Rendimiento (ton/día)	Costo unitario (Q/ton)
Puente grúa 5 Ton	1	Q. 797,57	20,85	Q. 38,25
Roladora	1	Q. 1 829,25	20,85	Q. 87,73
Herramientas menores	1	Q. 5,92	20,85	Q. 0,28
			Total	Q. 126,27

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Equipo rolado (7,94 mm)

Descripción	Cantidad	Costo diario (Q/día)	Rendimiento (ton/día)	Costo unitario (Q/ton)
Puente grúa 5 Ton	1	Q. 797,57	26,27	Q. 30,36
Roladora	1	Q. 1 829,25	26,27	Q. 69,63
Herramientas menores	1	Q. 5,92	26,27	Q. 0,23
			Total	Q. 100,22

Fuente: elaboración propia.

Nota: Los costos unitarios para los trabajos de rolado fueron calculados asumiendo que la empresa constructora tenga el equipo necesario para el desarrollo del trabajo; de lo contrario, se debe subcontratar otra empresa que realice dicho trabajo como Alfasa, Fisa o Conmetal, las cuales se encuentran en el mercado guatemalteco.

Para la cuantificación final se tomará en cuenta el promedio de los precios del mercado para Guatemala en noviembre 2018.

4.4. Cuantificación de la soldadura

Para determinar la cantidad de soldadura que se necesitará para la fabricación del cuerpo de cada tanque, se adopta el diseño de junta a tope con penetración completa para las soldaduras horizontales y verticales y de traslape para las soldaduras del fondo.

Para la soldadura de los elementos que conforman el tanque, deberán tener un esfuerzo de tensión menor de 550 MPa (80 Ksi) y también los electrodos de soldadura por electrodo revestido (SMAW) deberán ser de acuerdo a las clasificaciones de series E6011 y E7018 cuando se requiera, para trabajos con aceros de S_y de 30 a 60 Ksi, tal y como especifica la norma API Y AWWA.

4.4.1. Según diseño API-650

API-650 establece que el espesor de soldadura no debe de ser mayor a 12,7mm (1/2 in) y no deberá ser menor que el espesor nominal de la lámina más delgada.

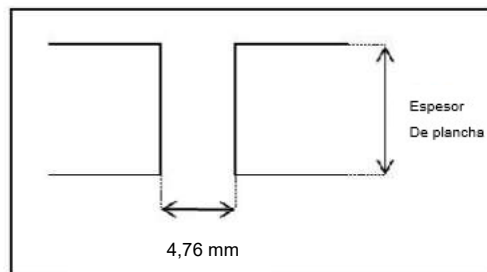
Tabla XXIX. **Tamaño mínimo de filete de soldadura**

Nominal Thickness of Shell Plate		Minimum Size of Fillet Weld	
(mm)	(in.)	(mm)	(in.)
5	0.1875	5	$\frac{3}{16}$
> 5 to 20	> 0.1875 to 0.75	6	$\frac{1}{4}$
> 20 to 32	> 0.75 to 1.25	8	$\frac{5}{16}$
> 32 to 45	> 1.25 to 1.75	10	$\frac{3}{8}$

Fuente: API-650-2007, p.5.

Para el cálculo de las juntas verticales se consideran 4,76 mm de espesor mínimo de soldadura por 4,76 mm del espesor de la plancha. Por tanto, dicho trabajo se puede realizar utilizando una pasada con electrodo E6011, que es de alta penetración.

Figura 35. **Diseño de junta vertical a tope**



Fuente: elaboración propia.

De esta manera se considera el área donde se depositará la soldadura.

$$\text{Área de junta vertical} = 4,76 \text{ mm} \times 4,76 \text{ mm}$$

$$\text{Área de junta vertical} = 22,66 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área de junta vertical} = 0,00002266 \text{ m}^2$$

Tomando en cuenta que por cada anillo hay 5 juntas verticales de 1,8 m y cinco juntas verticales de 1,0 m para el último anillo, son 50 m de longitud de soldadura.

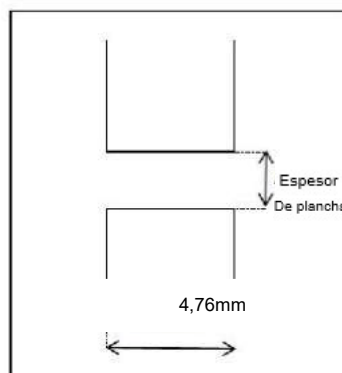
Entonces, el volumen requerido de material de soldadura para las juntas verticales J_v será:

$$J_v = 0,00002266 \text{ m}^2 \times 50 \text{ m}$$

$$J_v = 0,001133 \text{ m}^3$$

Para el cálculo de las juntas horizontales se consideran 4,76 mm de espesor mínimo de soldadura por 4,76 mm del espesor de la plancha.

Figura 36. **Diseño de junta horizontal a tope**



Fuente: elaboración propia

De esta manera se considera el área donde se depositará la soldadura.

$$\text{Área de junta vertical} = 4,76 \text{ mm} \times 4,76 \text{ mm}$$

$$\text{Área de junta vertical} = 22,66 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área de junta vertical} = 0,00002266 \text{ m}^2$$

Tomando en cuenta que habrá 5 soldaduras perimetrales para la construcción del tanque, se obtiene 125,75 m de longitud de soldadura.

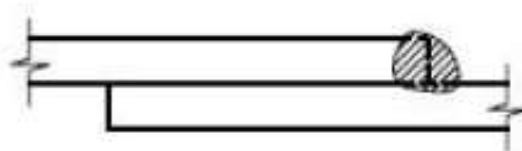
Entonces el volumen requerido de material de soldadura para las juntas horizontales J_h será:

$$J_h = 0,00002266 \text{ m}^2 \times 125,75 \text{ m}$$

$$J_h = 0,00289495 \text{ m}^3$$

Para diseño de las juntas del fondo se consideró una junta traslapada sin bisel, como se muestra en la figura 37.

Figura 37. **Diseño de junta plana de filete traslapada**



Fuente: Felix Roberto Ismael. *Diseño y simulación de un tanque de techo fijo para almacenar petróleo de 3.000 bls. de capacidad*, Quito Ecuador, diciembre 2011. p. 102.

Para el cálculo se consideró un triángulo isósceles de 6,35 mm de longitud por catetos, equivalente al espesor de la plancha.

Por lo tanto, el área de la junta será de 20,16 mm² equivalentes a 0,00002016 m², tomando en cuenta que habrá 2 juntas perimetrales para la soldadura entre el fondo y el primer anillo, más las soldaduras de las planchas del fondo, se obtiene una longitud de 114,38 m.

Entonces el volumen requerido para las juntas del fondo será:

$$J_f = 0,00002016 \text{ m}^2 \times 114,38 \text{ m}$$

$$J_f = 0,0023058008 \text{ m}^3$$

Se debe tomar en cuenta que el cuerpo del tanque deberá ir soldado por dentro y por fuera, por lo que el para el volumen de las juntas se obtiene:

$$V = J_v + J_h + J_f$$

$$V = (0,001133 \text{ m}^3 + 0,00289495 \text{ m}^3) * 2 + 0,0023058008 \text{ m}^3$$

$$V = 0,0103617 \text{ m}^3$$

Adicionalmente, se considera la densidad de los electrodos de $7\,850 \text{ kg/m}^3$, por lo que se obtiene un peso teórico de $81,34 \text{ kg}$.

Tomando en cuenta que la eficiencia del proceso SMAW para la deposición de electrodos es de 75% se tendrá un peso aproximado de $108,45 \text{ kg}$, equivalente a $239,09 \text{ lb}$ (240 lb) de electrodo.

Una segunda forma de cuantificar la soldadura sería por rendimiento. En una prueba de campo realizada se obtuvo que con un electrodo se puedan avanzar aproximadamente 14 cm . Esto podrá variar dependiendo la eficiencia del soldador.

Según tabla XXII se necesitan $492,47 \text{ m}$ para corte y para soldadura, entonces:

$$492,47 \text{ m} \times \frac{1 \text{ electrodo}}{0,14 \text{ m}} \cong 3\,518 \text{ electrodos}$$

Si una libra de electrodos contiene aproximadamente 16 electrodos E6011, entonces se necesitarían 220 lb de electrodos aproximadamente, sin tomar en cuenta el desperdicio.

4.4.1.1. Equipo

En la siguiente tabla se muestran los costos del equipo mínimo necesario para los trabajos de soldadura.

Tabla XXX. **Equipo de soldadura tanque API**

Descripcion	Cantidad	Unidad	Costo Diario (Q/Dia)	Dias	Costo
Maquina de soldar SMAW	2	u	115,2	20,00	Q. 4 608,00
Pulidoras	4	u	26,27	20,00	Q. 2 101,60
Andamios	8	torre	300/mes	..	Q. 2 400,00
Tubos de proceso	36	u	40/u	..	Q. 1 440,00
Herramientas menores	1	global	26,27	20,00	Q. 525,40
				Total	Q. 11 075,00

Fuente: elaboración propia.

4.4.1.2. Consumibles de soldadura

En la siguiente tabla se muestran los costos de consumibles empleados en el proceso de soldadura para el tanque con especificaciones API-650.

Tabla XXXI. Consumibles de soldadura para tanque API

Descripcion	Unidad	Cantidad	Costo unitario(Q)	Costo (Q)
Electrodo E6011	lb	240	Q. 13,50	Q. 3 240,00
Disco de pulir	u	25	Q. 35,00	Q. 875,00
			Total	Q. 4 115,00

Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Según diseño AWWA D-100

AWWA establece que el espesor de soldadura no deberá ser menor que el espesor nominal de la lámina más delgada, según la siguiente tabla:

Tabla XXXII. Tamaño mínimo de filete de soldadura

Nominal Shell Diameter, D <i>ft (m)</i>	Nominal Shell Height, H	Minimum Shell Thickness			
		Ground-Supported Tanks		Other Tanks	
		<i>in.</i>	<i>(mm)</i>	<i>in.</i>	<i>(mm)</i>
$D \leq 20$ ft (6.1 m)	All	$\frac{3}{16}$	4.76	$\frac{1}{4}$	6.35
20 ft $< D \leq 50$ ft (6.1 m $< D \leq 15.2$ m)	$H \leq 48$ ft (14.6 m) $H > 48$ ft (14.6 m)	$\frac{3}{16}$ $\frac{1}{4}$	4.76 6.35	$\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$	6.35 6.35
50 ft $< D \leq 120$ ft (15.2 m $< D \leq 36.6$ m)	All	$\frac{1}{4}$	6.35	$\frac{1}{4}$	6.35
120 ft $< D \leq 200$ ft (36.6 m $< D \leq 61.0$ m)	All	$\frac{5}{16}$	7.94	$\frac{5}{16}$	7.94
200 ft $< D$ (61.0 m $< D$)	All	$\frac{3}{8}$	9.52	$\frac{3}{8}$	9.52

Fuente: AWWA D-100-05. Tabla 15, p.30.

Para el cálculo de las juntas verticales se consideran:

- Para el primer anillo: 6,35 mm de espesor mínimo de soldadura por 7,94 mm del espesor de la plancha.
- Para el segundo y tercer anillo: 6,35 mm de espesor mínimo de soldadura por 6,35 mm del espesor de la plancha.
- Para el cuarto, quinto y sexto anillo: 4,76 mm de espesor mínimo de soldadura por 4,76 mm del espesor de la plancha.

Para los requerimientos AWWA D-100, se necesitará un espesor más grande de soldadura para las planchas del fondo, del primero, segundo y tercer anillo. El volumen requerido se obtendrá con la misma cantidad de electrodo E6011 calculado para la norma API-65. Adicional se calculará el electrodo remate con electrodo E7018 para dichas planchas.

Según tabla XXIV se necesitan 294,99 m de soldadura E7018, entonces

$$294,99 \text{ m} \times \frac{1 \text{ electrodo}}{0,14 \text{ mt}} \cong 2107,07 \text{ electrodos}$$

Si una libra de electrodos contiene aproximadamente 14 electrodos E7018 entonces se necesitarían 150.5 lb de electrodos aproximadamente, sin tomar en cuenta el desperdicio.

La soldadura requerida para el tanque con diseño AWWA D-100 será:

- 240 lb de electrodo E6011
- 151 lb de electrodo E7018

4.4.2.1. Equipo

En la siguiente tabla se muestran los costos del equipo mínimo necesario para emplear los trabajos de soldadura.

Tabla XXXIII. **Equipo de soldadura tanque AWWA**

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Diario (Q/día)	Días	Costo
Maquina de soldar SMAW	2	u	115,2	25,00	Q. 5 760,00
Pulidoras	4	u	26,27	25,00	Q. 2 627,00
Andamios	8	torre	300/mes	..	Q. 2 400,00
Tubos de proceso	36	u	40/u	..	Q. 1 440,00
Herramientas menores	1	global	26,27	25,00	Q. 656,75
				Total	Q. 12 883,75

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.2. Consumibles de soldadura

En la siguiente tabla se muestran los costos de consumibles empleados en el proceso de soldadura para el tanque con especificaciones AWWA D-100:

Tabla XXXIV. **Consumibles de soldadura para tanque AWWA**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario(Q)	Costo (Q)
Electrodo E6011	lb	240	Q. 13,50	Q. 3 240,00
Electrodo E7018	lb	151	Q. 19,00	Q. 2 869,00
Disco de pulir	u	25	Q. 35,00	Q. 875,00
			Total	Q. 6 984,00

Fuente: elaboración propia.

4.5. Integración de costos

En las siguientes tablas se integran los costos necesarios para la fabricación del tanque, comparando la norma API-650 contra la AWWA-D100. Se hace énfasis en la diferencia que tienen los diseños.

Tabla XXXV. Integración de costos tanque API

No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Total
100	Estructura Principal				
101	Cuerpo	22 968,50	lb	Q. 3,00	Q. 68 905,50
102	Fondo	20 829,76	lb	Q. 3,00	Q. 62 489,28
200	Corte				
201	Consumibles	1,00	global	Q. 2 600,00	Q. 2 600,00
202	e=4.78mm	10,44	ton	Q. 95,91	Q. 1 001,30
203	e=6.35mm	9,47	ton	Q. 118,47	Q. 1 121,91
300	Rolado				
301	e=4.78mm	24,00	planchas	Q. 700,00	Q. 16 800,00
400	Soldadura				
401	Consumibles	1,00	global	Q. 4 115,00	Q. 4 115,00
402	Equipo	1,00	global	Q. 11 075,00	Q. 11 075,00
	Total				Q. 168 107,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Integración de costos tanque AWWA

No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Total
100	Estructura principal				
101	Cuerpo	30 629,54	lb	Q. 3,00	Q. 91 888,62
102	Fondo	26 038,56	lb	Q. 3,00	Q. 78 115,68
200	Corte				
201	Consumibles	1,00	global	Q. 2 600,00	Q. 2 600,00
202	e=4.78mm	5,43	ton	Q. 95,91	Q. 520,69
203	e=6.35mm	5,01	ton	Q. 118,47	Q. 593,83
204	e=7.94mm	15,32	ton	Q. 154,90	Q. 2 372,57
300	Rolado				
301	e=4.78mm	12,00	planchas	Q. 700,00	Q. 8 400,00
302	e=6.35mm	8,00	planchas	Q. 935,00	Q. 7 480,00
303	e=7.94mm	4,00	planchas	Q. 1 200,00	Q. 4 800,00
400	Soldadura				
401	Consumibles	1,00	global	Q. 12 883,75	Q. 12 883,75
402	Equipo	1,00	global	Q. 6 984,00	Q. 6 984,00
	Total				Q. 216 639,14

Fuente: elaboración propia.

4.6. Análisis y comparaciones generales

La mayor variación que existe para la fabricación de los tanques verticales en cuanto a la norma API-650 y AWWA D-100 está en los criterios de diseño de los mismos, pues en su fabricación, instalación, materiales, pruebas e inspección son bastante parecidas en lo que se refiere a tanques verticales, por lo que esta comparación de hará desde un punto de vista analítico.

La API propone un método de diseño llamado “Método de un pie” el cual consiste en calcular los espesores del tanque tomando el punto de diseño para que el anillo considerado se sitúe a 1 pie por encima de su parte más baja,

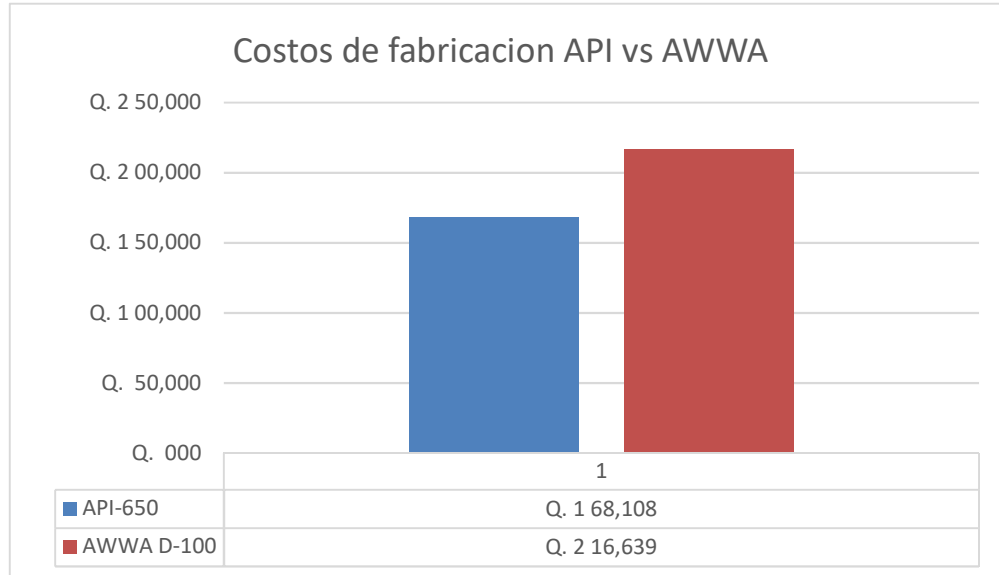
comparando los esfuerzos que son por prueba hidrostática y por condiciones de diseño. En cambio, para la norma AWWA depende más del esfuerzo proporcionado por la misma y la eficiencia de la junta. Para los esfuerzos máximos permisibles del material de acero por utilizar, la norma AWWA D-100 especifica un esfuerzo máximo de 15 000 psi, mientras que la API-650 proporciona la tabla 3-2 (Tabla II de este trabajo) donde están los esfuerzos permisibles en función del material especificado.

Aunque ambos diseños incluyen en su ecuación la gravedad específica del líquido por almacenar, se puede decir que este no es un factor que pueda verse afectado en el diseño del tanque y, por consiguiente, tampoco afectará en los costos, ya que este valor para los derivados del petróleo suele ser menor a 1, por lo que reduciría los espesores finales requeridos del tanque.

El AWWA D-100 emplea una ecuación para calcular el espesor de planchas, la cual puede ser utilizada para tres tipos de clases de tanque: de fondo plano apoyado sobre terreno, apoyado sobre pedestales y tanques elevados; en cambio, el API-650 no tiene recomendaciones para los tanques que son apoyados sobre pedestales ni para los tanques elevados.

Aun así, al pensar en un tanque para almacenamiento de gasolina o algún derivado del petróleo, podremos pensar fácilmente que el tanque necesitará espesores mayores que puedan soportar las fuerzas hidrostáticas que produce el líquido almacenado en las paredes del tanque, y que nuestros costos aumentarán significativamente en comparación de un tanque que solo almacene agua. Por lo que en el presente trabajo se ha demostrado que la norma AWWA propone espesores más grandes que aumentan el peso de la estructura.

Figura 38. **Comparación de costos de fabricación**



Fuente: elaboración propia.

La norma AWWA requiere espesores más grandes en las planchas de acero, por lo que se necesitará una mayor cantidad del mismo y, por lo consiguiente, para la capacidad propuesta generaría un mayor desperdicio. Esto aumentará de igual forma los costos necesarios para su fabricación, transporte y montaje.

Figura 39. **Comparación de peso de la estructura**



Fuente: elaboración propia.

Para el tanque propuesto de 500m³ se ha obtenido como resultado que el tanque calculado bajo la norma API-650 es un 29 % más económico que el calculado bajo la norma AWWA D-100 para los costos de fabricación, lo que influye principalmente en las diferencias que existen en sus diseños.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que las normas API-650 y AWWA D-100 son bastante similares en sus condiciones de fabricación y montaje. Su principal diferencia está en los espesores de diseño que cada norma propone. Se demostró que los costos de fabricación de un tanque para almacenamiento de agua de 500 m³ bajo la norma API-650 fue de Q. 169 108,00 y para la norma AWWA D-100 un costo total de Q. 216 640,00. El tanque API es hasta un 29,87 % más económico para su fabricación.
2. Para el tanque vertical de 500 m³ propuesto, se determinó en el tanque con especificaciones API-650 una reducción significativa en costos. Además, se garantiza un menor porcentaje de desperdicio en materiales y optimización en el tiempo de fabricación debido a la reducción en el peso del tanque. Por tanto, resulta muy beneficioso para construcciones futuras, ya que se podrá proponer un tanque API para almacenaje de agua para diferentes usos.
3. La norma API propone un método de diseño llamado “Método de un pie” el cual consiste en calcular los espesores del tanque tomando el punto de diseño para que el anillo considerado se sitúe a 1 pie por encima de su parte más baja, comparando los esfuerzos que se generan por prueba hidrostática y por condiciones de diseño; en cambio, para la norma AWWA depende más del esfuerzo de diseño que propone la norma y del tipo de soldadura por utilizar (eficiencia de la junta).

4. Los tanques API son utilizados en la industria petrolera para almacenaje de combustibles, petróleo, gas, productos químicos, biocombustibles y agua (agua de procesos riego, potable, entre otros.), son de fondo plano. Los tanques AWWA son utilizadas únicamente para almacenaje de agua potable o de procesos que trabajen a presión atmosférica; pueden ser de fondo plano o cónico.
5. Se logró concretar un marco teórico para comprender las condiciones propuestas por cada norma, por lo que se concluye que los espesores de acero para cada tanque no dependen solo del líquido que se almacene, sino de la temperatura del mismo, ya que con esto solo varía el tipo de material por utilizar. A bajas temperaturas se requiere una alta resistencia a la fractura frágil y a altas temperaturas, tanto la corrosión como la expansión térmica son los factores más incidentes que se debe analizar.
6. Se demostró el por qué la norma API es la más utilizada en Guatemala y la mayor parte del mundo, por su simplicidad de diseño y bajo costo de fabricación; por el contrario, la AWWA es una norma americana utilizada únicamente para almacenamiento de agua y muy poco conocida en Guatemala.
7. Entre los costos directos más importantes que involucran la fabricación de los tanques de acero bajo las normas propuestas se puede mencionar los trabajos de taller como corte y rolado para las planchas metálicas, y los trabajos de campo de montaje de la estructura y soldadura necesaria.

RECOMENDACIONES

1. Antes de iniciar cualquier diseño, se recomienda al diseñador realizar una visita de campo para tomar en cuenta cualquier factor externo que pueda afectar a la estructura.
2. Que el encargado del proyecto proporcione al diseñador un estudio de suelos del lugar, para determinar si el tanque por diseñar podrá ser montado sobre el suelo o sobre un anillo de cimentación, ya que esto podría reducir costos al no necesitar una cimentación.
3. Que el tanque no contenga demasiados cambios en los espesores de las planchas de acero, para garantizar una reducción en el desperdicio de materiales.
4. Proteger la estructura del tanque contra la corrosión por medio de un equipo de pintura airless. Se recomienda un mantenimiento periódico para garantizar un mayor tiempo de vida de la estructura.
5. La soldadura del tanque deberá ser realizada y verificada por personal calificado que cuente con un certificado que lo acredite como soldador calificado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas de seguridad estructural de edificios y obras de infraestructura para la República de Guatemala*. Guatemala: AGIES, 2010. 75 p.
2. American Petroleum Insititute. API 650. 11ª ed. EEUU: API, 2007. 449 p.
3. Codigo Api 650 y 653. *Diseño, montaje y construcción de tanques soldados de acero*. Colombia: API 650.10ª ed. EEUU, 1998. 56 p.
4. American Water Works Association. *Tanques de acero soldados para almacenamiento de agua*. EEUU: ANSI/AWWA D-100, 1996. 140 p.
5. GÓMEZ CACERES, Isidro Antonio. *Cálculo de estanques para almacenamiento de agua, análisis comparativo de las normas API 650 y AWWA D-100*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca de Chile, 2007. 130 p
6. MARROQUÍN ORTIZ, Erwin Antonio. *Diseño estructural, fabricación y montaje de tanque vertical para almacenamiento de agua bajo código API-650*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 153 p.

7. CABEZAS FELIZ, Robero Ismael. *Diseño y simulación de un tanque de techo fijo para almacenar petróleo de 3.000 Bls de capacidad en la plataforma del pozo sachá 192, ubicada en la provincia de Orellana*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, 2011. 267 p.

ANEXOS

Anexo 1. **Tabla de precios unitarios de planchas de acero A-3**

DESCRIPCIÓN	Peso Lbs.
LAMINA NEGRA 1/4" x 3' x 6' ***	183.61
LAMINA NEGRA 1/4" x 3' x 8' ***	245.00
LAMINA NEGRA 1/4" MM x 4' x 8'	308.60
LAMINA NEGRA 1/4" x 4' x 8'	326.70
LAMINA NEGRA 1/4" x 4' x 10'	408.33
LAMINA NEGRA 1/4" x 4' x 20' ***	810.34
LAMINA NEGRA 1/4" x 6' x 20'	1,225.28
LAMINA NEGRA 1/4" x 8' x 20'	1,633.54
LAMINA NEGRA 5/16" x 4' x 8'	408.38
LAMINA NEGRA 5/16" x 4' x 10'	510.56
LAMINA NEGRA 5/16" x 6' x 20'	1,531.68
LAMINA NEGRA 5/16" x 8' x 20'	2,042.24
LAMINA NEGRA 3/8" x 3' x 6'	275.42
LAMINA NEGRA 3/8" x 3' x 8'	367.33
LAMINA NEGRA 3/8" MMx 4' x 8' (9.00MM)	462.89
LAMINA NEGRA 3/8" x 4' x 8'	490.20
LAMINA NEGRA 3/8" x 4' x 10'	612.47
LAMINA NEGRA 3/8" x 6' x 20'	1,837.91
LAMINA NEGRA 3/8" x 8' x 20'	2,450.31

Continuación de anexo 1.

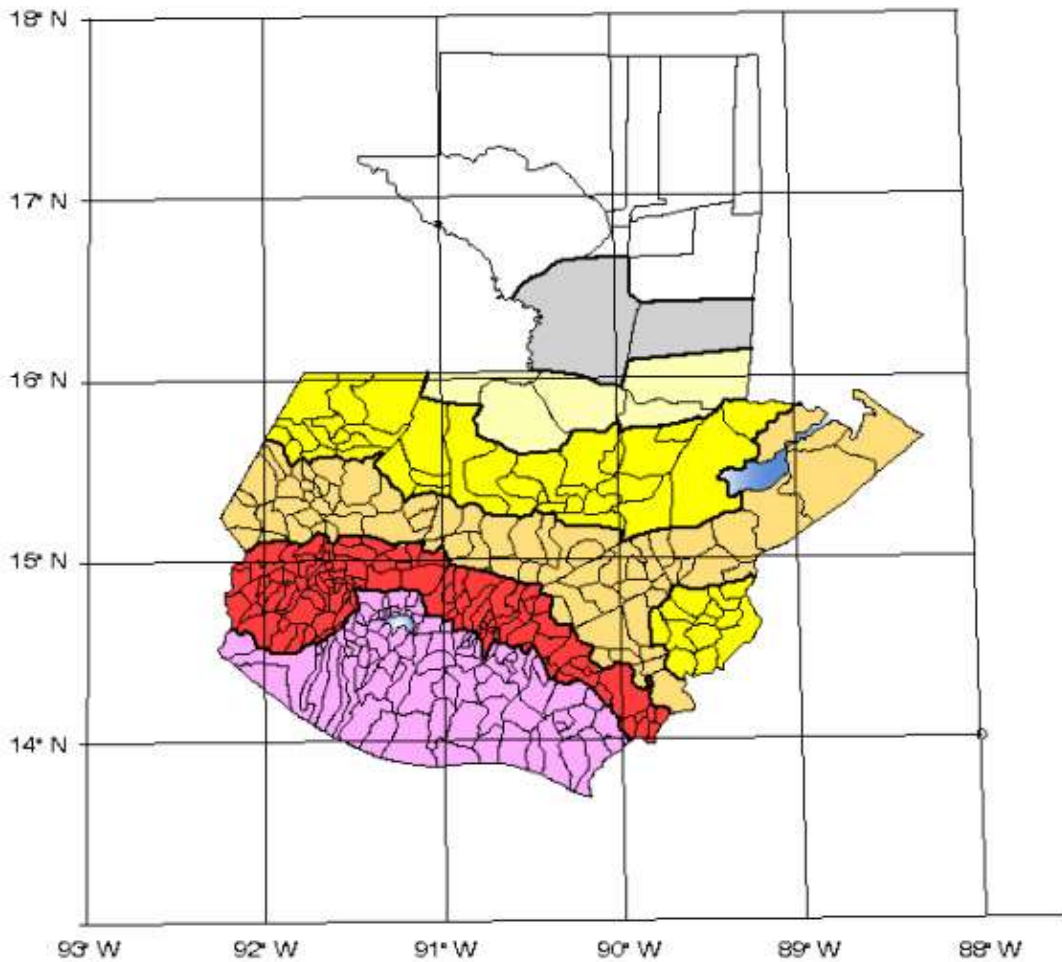
LAMINA NEGRA 1/2" x 3' x 6'	367.23
LAMINA NEGRA 1/2" x 3' x 8'	489.77
LAMINA NEGRA 1/2"MM x 4' x 8' (12MM)	617.19
LAMINA NEGRA 1/2" x 4' x 8'	653.55
LAMINA NEGRA 1/2" x 4' x 10'	816.63
LAMINA NEGRA 1/2" x 6' x 20'	2,450.55
LAMINA NEGRA 1/2" x 8' x 20'	3,266.83
LAMINA NEGRA 5/8" x 4' x 8'	817.00
LAMINA NEGRA 5/8" x 4' x 10'	1,020.78
LAMINA NEGRA 5/8" x 6' x 20'	3,063.18
LAMINA NEGRA 5/8" x 8' x 20'	4,085.00
LAMINA NEGRA 3/4" x 4' x 8'	980.20
LAMINA NEGRA 3/4" x 4' x 10'	1,225.25
LAMINA NEGRA 3/4" x 6' x 20'	3,675.82
LAMINA NEGRA 3/4" x 8' x 20'	4,899.75
LAMINA NEGRA 1" x 4' x 8'	1,306.90
LAMINA NEGRA 1" x 4' x 10'	1,632.98
LAMINA NEGRA 1" x 6' x 20'	4,901.10
LAMINA NEGRA 1" x 8' x 20'	6,532.99
LAMINA NEGRA 1/16" x 3' x 6'	43.37
LAMINA NEGRA 1/16" x 3' x 7'	50.61
LAMINA NEGRA 1/16" x 3' x 8'	57.85
LAMINA NEGRA 1/16" x 3' x 10' ***	67.53
LAMINA NEGRA 1/16" x 4' x 8' ***	77.15
LAMINA NEGRA 1/16" x 4' x 10'	96.45
LAMINA NEGRA 3/32" MM x 2x1 MTS	69.22
LAMINA NEGRA 3/32" MMx 4' x 8' (2.00MM)	102.87
LAMINA NEGRA 3/32" x 4' x 8'	122.50
LAMINA NEGRA 3/32"MM x 4' x 10' (2.00MM)	128.70
LAMINA NEGRA 3/32" x 4' x 10'	153.13

Continuación de anexo 1.

LAMINA NEGRA 1/8"MMX 2 X 1MTS	103.84
LAMINA NEGRA 1/8" x 3' x 6'	91.67
LAMINA NEGRA 1/8" x 3' x 8'	122.50
LAMINA NEGRA 1/8"MM x 4' x 8' (3.00MM)	154.30
LAMINA NEGRA 1/8" x 4' x 8'	163.30
LAMINA NEGRA 1/8" x 4' x 10'	204.17
LAMINA NEGRA 1/8" x 4'x 20' **	407.86
LAMINA NEGRA 1/8" x 6' x 20'	613.56
LAMINA NEGRA 3/16" MM x 2x1MTS	155.76
LAMINA NEGRA 3/16" x 3' x 6'	137.81
LAMINA NEGRA 3/16" x 3' x 8'	183.75
LAMINA NEGRA 3/16"MMx 4' x 8' (4.50MM)	231.45
LAMINA NEGRA 3/16" x 4' x 8'	245.10
LAMINA NEGRA 3/16" x 4' x 10'	306.25
LAMINA NEGRA 3/16" x 4' x 20' ***	612.15
LAMINA NEGRA 3/16" x 6' x 20'	918.74

Fuente: Multiperfiles, S.A. año 2018.

Anexo 2. Zonificación sísmica para la república de Guatemala



Fuente: AGIES 2010. p.14.

Anexo 3. Coeficiente de sitio Fa

Clase de sitio	Índice de sismicidad				
	2a	2b	3a	3b	4
AB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
D	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	1.7	1.2	1.0	0.9	0.9
F	se requiere evaluación específica -- ver sección 4.4.1				

Fuente: AGIES 2010. p.15.

Anexo 4. Coeficiente de sitio Fv

Clase de sitio	Índice de sismicidad				
	2a	2b	3a	3b	4
AB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.0	1.8	1.7	1.6	1.5
E	3.2	2.8	2.6	2.4	2.4
F	se requiere evaluación específica -- ver sección 4.4.1				

Fuente: AGIES 2010. p.15.

Anexo 5. Guía para clasificación de sitio

Clase de Sitio		V_{ps} todo el perfil	N_p todo el perfil	N_{nc} sector no-cohesivo	S_{uc} sector cohesivo
AB	Roca	750 m/s	No aplica	No aplica	No aplica
C	Suelo muy denso o roca suave	750 a 360 m/s	≥ 30	≥ 30	> 200 kPa
D	Suelo firme y rígido	360 a 180 m/s	30 a 5	30 a 5	200 a 50 kPa
E	Suelo suave	< 180 m/s	≤ 5	≤ 5	< 50 kPa
		Cualquier perfil de suelo con un estrato de 3.0 m o más con índice de plasticidad $IP > 20$; humedad $w \geq 40\%$ y $S_{uc} < 25$ kPa			
F	Suelo con problemas especiales	Véase NSE 2.1 Capítulo 5			

Fuente: AGIES 2010. p.21.