

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE TANQUES DE LAVADO DE TECHO CÓNICO FIJO CON PAREDES DEFLECTORAS INTERNAS PARA LA EMPRESA PEC

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JORGE EDUARDO ANDRADE PABÓN

jandrade_20_1@hotmail.com

DIRECTOR: ING. LUIS RICARDO SOTO AYMAR

ricardo.soto@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2014

© Escuela Politécnica Nacional (2014)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Jorge Eduardo Andrade Pabón, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jorge Eduardo Andrade Pabón

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Eduardo Andrade Pabón.

Ing. Ricardo Soto
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primero a Dios y a la Virgen de Las Lajas por darme la familia que tengo y por la ayuda para poder conseguir este logro. A mi Madre Beatriz por todo el amor que me ha brindado, por inculcarme valores fundamentales para ser una persona de bien, por darme la oportunidad de estudiar y enseñarme que las cosas se consiguen con sacrificio. A mi ñaño y ñaña, Carlos Manuel y Anita, por ser los mejores hermanos del mundo les quiero mucho nunca lo olviden. También un agradecimiento muy especial a la Jessita, Doña Delia y Don Guillo por cuidarle a mi hija mientras yo estaba estudiando. Al Ingeniero Ricardo Soto director de este proyecto, gracias por la paciencia y la ayuda prestada. A PEC Cía. Ltda. en especial al Andy, al Juan Ca y al Santi por permitirme desarrollar los conocimientos adquiridos en la empresa. A mis abuelitos, que desde el cielo seguro que me echaron una manito. A mis tías, tíos, primas y primos por estar conmigo durante todo mi crecimiento. A los panas de la poli en especial al Gabo, el Waldo, el Guagua Loco, el Chino, el Zura y el Cabezón por la amistad y la ayuda para poder llegar a conseguir este logro personal.

A todos los que nombre y de los que me olvido sinceramente Muchas Gracias.

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a las personas más importantes que tengo en mi vida, mi madre Beatriz, que con su amor y paciencia ha sido un pilar fundamental y apoyo constante para conseguir esta meta. Mi hermano Carlos Manuel, un ejemplo a seguir tanto en lo personal como en lo profesional. Mi hermana Anita Cristina, la consentida de la casa. A la Jessita, mi gran amor que ha sabido apoyarme en mis triunfos y fracasos. Y a mi pequeña hija Victoria, toda una inspiración para seguir consiguiendo triunfos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
INTRODUCCIÓN	V
1 GENERALIDADES	1
1.1 TANQUES DE LAVADO	1
1.2 TANQUES DE LAVADO CON PAREDES DEFLECTORAS INTERNAS	2
1.2.1 PARTES DE UN TANQUE DE LAVADO	3
1.2.1.1 Cuerpo del Tanque.....	3
1.2.1.2 Deflectores Internos.....	5
1.2.1.3 Línea de Alimentación.....	6
1.2.1.4 Línea de descarga de petróleo	7
1.3 DESHIDRATACIÓN DE CRUDOS.....	7
1.3.1 EMULSIONES.....	7
1.3.1.1 Tipos de Emulsiones.....	7
1.3.2 TRATAMIENTO DE LA EMULSIÓN	8
1.3.2.1 Adición de Químicos	8
1.3.2.1.1 Prueba de Botella.....	9
1.3.2.2 Tiempo de Asentamiento	10
1.3.2.3 Coalescencia.....	11
1.3.2.4 Consideraciones de Separación por Gravedad.....	11
1.3.2.5 Viscosidad	13
1.3.2.6 Efectos del Calor	14
1.3.2.7 Dimensión de la Gota de Agua y el Tiempo de Retención.....	14
1.4 MATERIALES PARA EL TANQUE	15
1.4.1 MATERIALES PARA EL CUERPO DEL TANQUE.....	17
1.4.2 MATERIALES PARA LÁMINAS DEL TECHO, ESTRUCTURA METALICA SOPORTANTE, TUBERIA, BRIDAS, PERNOS Y ELECTRODOS..	18

2	DISEÑO DEL TANQUE SEGÚN API 650	21
2.1	DISEÑO DEL FONDO DEL TANQUE Y ANILLO ANULAR	21
2.1.1	DISEÑO DE LA PLACA ANULAR	23
2.2	CÁLCULO DE ESPESORES PARA EL CUERPO DEL TANQUE.....	24
2.2.1	MÉTODO DEL PUNTO FIJO O DE UN PIE.....	25
2.2.2	MÉTODO DE PUNTO VARIABLE	26
2.3	ANILLOS DE REFUERZO.....	29
2.3.1	ANILLO SUPERIOR O ÁNGULO TOPE.....	29
2.3.1.1	Condiciones para presión interna menor o igual a 18 kPa (manométrica). 32	
2.3.2	VIGAS INTERMEDIAS	34
2.3.3	CARGAS DE VIENTO	36
2.3.3.1	Cálculo del M_{Pi}	37
2.3.3.2	Cálculo del M_w	37
2.3.3.3	Cálculo del M_{DL}	38
2.3.3.4	Cálculo de M_F	38
2.3.4	CARGAS Y DISEÑO POR SISMO.....	38
2.3.4.1	Cálculo del Momento de Volcado (M).....	39
2.3.4.1.1	Factores de Momento de Volcado	41
2.3.5	RELACIÓN DE ANCLAJE.....	47
2.3.5.1	Requerimientos de Plancha Anular	48
2.3.5.2	Compresión del Cuerpo	49
2.3.6	DISEÑO DE ANCLAJE.....	49
2.3.6.1	Pernos de Anclaje	49
3	DISEÑO INTERNO Y DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TANQUE DE LAVADO	51
3.1	DISEÑO INTERNO DEL TANQUE DE LAVADO.....	51

3.1.1	PROCESO DE DISEÑO GENERAL.....	51
3.1.2	DISEÑO DE DEFLECTORES INTERNOS O BAFLES	57
3.1.2.1	Seccionamiento Vertical de Deflectores Internos o Bafles.....	58
3.1.2.2	Modulación de Bafles	58
3.1.2.3	Conformación de Bafles	60
3.1.2.4	Selección de Perfiles para el Marco Exterior.....	61
3.1.2.5	Apoyos de Bafles.....	63
3.1.2.5.1	Apoyos del Bafle a las Paredes y Estructura del Techo del Tanque...66	
3.2	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TANQUE DE LAVADO	69
3.2.1	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS	69
3.2.1.1	Clasificación de Techos Fijos de Acuerdo al Estándar API 650.....	69
3.2.1.2	Conceptos y Definiciones para Tanques de Techo Cónico.....	70
3.2.1.2.1	Generalidades	70
3.2.1.2.2	Esfuerzos Permisibles (Perfiles Laminados en Caliente)	71
3.2.2	TIPO DE ESTRUCTURA SOPORTANTE	72
3.2.3	ANÁLISIS DE CARGAS	74
3.2.4	CÁLCULOS ESTRUCTURALES (FUERZAS, MOMENTOS, ESFUERZOS, DEFORMACIONES). PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA ESTRUCTURA CON PERFILES LAMINADOS EN CALIENTE SEGÚN AISC...75	
3.2.4.1	Diseño de Correas.....	76
3.2.4.1.1	Análisis para lámina del techo.....	76
3.2.4.1.2	Procedimiento de diseño de las correas de la estructura con una columna central.....	78
3.2.4.2	Diseño de Columnas.....	82
3.2.4.2.1	Diseño de Columnas Compuestas por dos Canales o Columnas Armadas	83
3.2.4.2.2	Diseño de columnas de sección tubular	85
3.2.4.3	Diseño de Bases.....	86
3.2.4.4	Diseño de las Cartelas.....	92
3.2.4.4.1	Definición geométrica de las Cartelas	93
3.2.4.4.2	Procedimiento de diseño de Cartelas	94

3.2.4.5	Diseño del Disco Central	97
3.2.4.6	Procedimiento de Cálculo del Disco.....	97
3.2.4.6.1	Determinación del radio exterior de la placa R_d	98
3.2.4.6.2	Determinación del radio interior de la placa r_d	99
3.2.4.6.3	Determinación del espesor de la placa.....	99
4	DESARROLLO DE LA HOJA DE CÁLCULO ELECTRÓNICA	101
4.1	COMPOSICIÓN DEL LIBRO DE CÁLCULO.....	101
4.2	PROCEDIMIENTO DE USO DEL LIBRO DE CÁLCULO.....	102
5	REQUISITOS PARA EL MONTAJE.....	123
5.1	MONTAJE Y SOLDADURA DEL FONDO DEL TANQUE	124
5.2	MONTAJE DE LAS BASES DE LAS COLUMNAS DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TECHO	126
5.3	MONTAJE DE LA COLUMNA SOPORTANTE PARA EL TECHO.....	126
5.4	MONTAJE Y SOLDADURA DEL CUERPO DEL TANQUE	128
5.5	PREFABRICACIÓN Y MONTAJE DE DEFLECTORES INTERNOS (BAFLES).....	131
5.5.1	PREFABRICACIÓN DE DEFLECTORES INTERNOS (BAFLES)	131
5.5.2	MONTAJE DE DEFLECTORES INTERNOS (BAFLES).....	134
5.5.2.1	Requerimientos Previos	134
5.5.2.2	Montaje de Patas o Elementos de Apoyo	135
5.5.2.3	Montaje de Bafles.....	138
5.5.2.4	Montaje de Amarres	141
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
6.1	CONCLUSIONES.....	145

6.2	RECOMENDACIONES.....	146
7	BIBLIOGRAFÍA.....	147
	ANEXOS	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Dimensiones de planchas de acero ASTM A283 – Gr C y ASTM A36	18
Tabla 1. 2. Grados aceptables de material (a) Propiedades Mecánicas	19
Tabla 1. 3. Grados aceptables de material (b) Propiedades Químicas	19
Tabla 2. 1. Selección de espesor de plancha para anillo anular.....	24
Tabla 2. 2. Ángulos recomendados con respecto al diámetro para tanques con techo cónico soportado	31
Tabla 2. 3. Clasificación de los perfiles de suelo.....	40
Tabla 2. 4. Factores de modificación de respuesta para métodos ASD	41
Tabla 2. 5. Mapeado máximo considerado para aceleraciones sísmicas en periodos cortos	42
Tabla 2. 6. Factor de Importancia (I) y clasificación de grupo de uso sísmico	42
Tabla 2. 7. Mapeado máximo considerado para aceleraciones sísmicas en periodos de 1 segundo	44
Tabla 2. 8. Relación de anclaje	48
Tabla 3. 1. Esfuerzos admisibles madera guayacán pechiche	65
Tabla 3. 2. Múltiplo del diámetro recomendado para construcción de tanques	73
Tabla 3. 3. Momento y cortante del elemento 1 para diferentes valores de carga.....	88
Tabla 3. 4. Estandarización de las bases de columnas	91
Tabla 3. 5. Valores de d_{car} y ϕ para correas tipo Canal y tipo Ala Ancha I.....	94
Tabla 3. 6. Resistencia del electrodo.....	96
Tabla 3. 7. Espesor mínimo t en pulgadas de material, para balancear la carga de tensión y cortante inducida por soldaduras de filete de penetración normal	96
Tabla 3. 8. Valor del ancho del patín de correas Tipo Canal C y Ala Ancha WF o Perfil I	99
Tabla 3. 9. Cálculo de la relación R_d/r_d , para $R_d < 381$ mm.....	100
Tabla 3. 10. Cálculo de la relación R_d/r_d , para $R_d > 381$ mm.....	100
Tabla 4. 1. Datos generales del ejemplo ilustrativo	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Vista en planta de un tanque de tratamiento cilíndrico que incorpora deflectores internos que establecen flujo horizontal.....	1
Figura 1. 2. Esquema de un tanque de lavado	4
Figura 1. 3. Zonas en un tanque de lavado.....	4
Figura 1. 4. Ventaja del uso de los deflectores para reducción de diámetro del tanque	6
Figura 1.5. Microfotografía de una emulsión en petróleo crudo.....	7
Figura 1. 6. Procedimiento para la realización de la prueba de botella	10
Figura 1.7. Efecto del tiempo sobre la coalescencia. Arriba: Emulsión sin químicos. Abajo: Emulsión con demulsificador adicionado.....	10
Figura 1. 8. Clasificación de Materiales. API 650.....	17
Figura 2. 1. Unión cuerpo-fondo del tanque	22
Figura 2. 2. Arreglo de planchas para placa anular	23
Figura 2. 3. Niveles y volúmenes de un tanque de almacenamiento según API 650	26
Figura 2. 4. Detalle de junta de comprensión: Techo-ángulo-cuerpo.....	30
Figura 2. 5. Factor K_s , D/H vs K_s , para cálculo del periodo T	44
Figura 3. 1. Vista de planta de un tanque de lavado con flujo horizontal con baffles	54
Figura 3. 2. Tanque con las paredes deflectoras internas calculadas.....	56
Figura 3. 3 Baffle típico - División por secciones.....	58
Figura 3. 4. Esquema de modulación de Baffles	59
Figura 3. 5. Módulo típico.....	60
Figura 3. 6. a) Presión hidrostática en el baffle al momento del llenado del tanque, b) presión hidrostática en el baffle cuando el tanque ya está lleno	61
Figura 3. 7. Corte Inferior de una Pared Típica de Baffle.....	64
Figura 3. 8. Apoyo de baffle.....	66
Figura 3. 9. Corte lateral y superior de una pared típica de baffle.....	67
Figura 3. 10. Vista de planta de los Amarres de Baffles en un tanque	68
Figura 3. 11. Estructura tipo a utilizarse	73
Figura 3. 12. Análisis para la lámina del techo de ancho unitario.....	76
Figura 3. 13. Propiedades de Inercia.....	78

Figura 3. 14. Disposición de áreas y cargas en las correas del techo	80
Figura 3. 15. Vista Superior de una columna armada.....	84
Figura 3. 16. Vista superior de una columna de sección tubular.....	85
Figura 3. 17. Geometría de la base de una columna armada.....	87
Figura 3. 18. Geometría de la base de una columna circular	87
Figura 3. 19. Diagramas de cortante y momento del elemento (1)	88
Figura 3. 20. Disposición de las cartelas sobre el tanque.....	92
Figura 3. 21. Esquema de carga sobre las cartelas	92
Figura 3. 22. Geometría de la cartela para correas tipo canal	93
Figura 3. 23. Geometría de la cartela para correas tipo ala ancha I.....	93
Figura 3. 24. Disposición del disco de la columna central.....	97
Figura 3. 25. Esquema de cálculo para Disco Central	98
Figura 4. 1. Lugar donde se deben ingresar los datos de diseño	103
Figura 4. 2. Selección de materiales	103
Figura 4. 3. Ingreso de dato ancho efectivo del canal de flujo w	104
Figura 4. 4. Verificación del diseño del proceso	104
Figura 4. 5. Ingreso de diámetro y altura del tanque	105
Figura 4. 6. Diseño del fondo del tanque	106
Figura 4. 7. Peso planchas del fondo del tanque	106
Figura 4. 8. Cálculo del número de anillos del tanque.....	107
Figura 4. 9. Cálculo de espesores	107
Figura 4. 10. Peso del cuerpo del tanque	108
Figura 4. 11. Selección espesor para el techo del tanque.....	108
Figura 4. 12. Cálculo de altura no rigidizada	109
Figura 4. 13. Altura transformada del cuerpo	109
Figura 4. 14. Condiciones para viga intermedia.....	110
Figura 4. 15. Selección de perfil de viga intermedia	111
Figura 4. 16. Selección ángulo estructural para anillo superior	112
Figura 4. 17. Condiciones para presión interna.....	113
Figura 4. 18. Restricción de presión de falla.....	113
Figura 4. 19. Criterios para anclajes por viento.....	114
Figura 4. 20. Relación de anclaje.....	114

Figura 4. 21. Anclajes mecánicos	115
Figura 4. 22. Zona sísmica y factor de importancia.....	115
Figura 4. 23. Coeficientes de aceleración de sitio base F_a y F_v	116
Figura 4. 24. Factores de respuesta de modificación de los métodos ASD	117
Figura 4. 25. Número de correas para el techo	117
Figura 4. 26. Selección de perfil estructural para correas	118
Figura 4. 27. Selección de tipo de columna a utilizarse.....	118
Figura 4. 28. Perfiles para bases de columnas.....	119
Figura 4. 29. Selección de la resistencia del electrodo para soldar la cartela al cuerpo del tanque	119
Figura 4. 30. Disco central de columna	120
Figura 4. 31. Cálculo de la carga total que soporta el deflector	120
Figura 4. 32. Perfil para marco exterior de deflector.....	121
Figura 4. 33. Apoyos de deflectores internos.....	122
Figura 5. 1. Vista del anillo de hormigón previo al montaje de un tanque	124
Figura 5. 2. Montaje de las planchas del fondo del tanque	124
Figura 5. 3. Traslape de planchas del fondo del tanque cuando no existen placas anulares	125
Figura 5. 4. Secuencia de soldadura para fondo y techo del tanque.....	125
Figura 5. 5. Soldadura de las placas del fondo del tanque	126
Figura 5. 6. Montaje de columna central.....	127
Figura 5. 7. Columna central montada y sujeta con cables tensados	127
Figura 5. 8. Soldadura de las planchas del primer anillo al anillo del fondo del tanque ..	128
Figura 5. 9. Planchas utilizadas para centrar las planchas del cuerpo del tanque	129
Figura 5. 10. Ilustración donde se indica la ubicación de chicagos.....	129
Figura 5. 11. Cuerpo del tanque montado	130
Figura 5. 12. Vigas ensambladas a la columna central.....	131
Figura 5. 13. Mesas de trabajo para prefabricado de bafles	132
Figura 5. 14. Patas de apoyo de un baffle.....	137
Figura 5. 15. Detalle de patas de apoyo de un baffle	138
Figura 5. 16. Secuencia de Montaje de Módulos	139
Figura 5. 17. Paredes de bafles	141

Figura 5. 18. Detalle de amarres de baffle al techo.....	142
Figura 5. 19. Amarres transversales inferiores entre baffle y cuerpo del tanque	143
Figura 5. 20. Amarres transversales superiores entre baffle y cuerpo del tanque	144

RESUMEN

El objetivo principal del presente proyecto de titulación, es realizar el diseño de tanques de lavado de techo cónico, con paredes deflectoras internas o baffles, los cuales ayudan al proceso de separación del crudo del agua. Para lo cual se desarrolló una hoja de cálculo en la aplicación de Microsoft Excel, que permite realizar tanto el diseño mecánico como del proceso para tanques de capacidad C entre 500 y 18000 barriles, diámetro D entre 6 y 25 metros y altura H entre 3 y 10 metros. La hoja de cálculo es muy práctica y fácil de utilizar. Además, se desarrolló una segunda hoja de cálculo que permite diseñar tanques de almacenamiento de techo cónico para los diámetros y alturas ya mencionadas.

Cabe recalcar, la importancia que tiene el diseño del proceso, porque de este depende el dimensionamiento del tanque de lavado. Para lo cual, es muy importante realizar un análisis correcto, para poder determinar el ancho efectivo de flujo w y la longitud efectiva de separación L_{eff} , que permitan la separación del crudo.

Este trabajo de titulación se pudo realizar mediante una profunda investigación bibliográfica, que ayudó a despejar las dudas acerca del funcionamiento de este tipo de tanques que son muy utilizados en el Ecuador; la información existente de los mismos es cuidada muy celosamente por las principales constructoras que trabajan en el sector petrolero. El trabajo empieza realizando una breve descripción del funcionamiento, partes, materiales y normas aplicables para el diseño de este tipo de tanques en el capítulo 1. Luego se realiza un análisis pormenorizado de todo lo que recomienda el Estándar del American Institute of Petroleum API 650 para el diseño de tanques de almacenamiento, en el capítulo 2. En el capítulo 3, se realiza la descripción y análisis del diseño del proceso, dimensionamiento del tanque, diseño de deflectores internos y el diseño de la estructura soportante del techo del tanque bajo el estándar del American Institute of Steel Constructions. En el capítulo 4, se explica detalladamente la forma de utilizar la hoja de cálculo. Para finalizar, en el capítulo 5, se detallan las recomendaciones para realizar el correcto montaje de este tipo de tanques.

INTRODUCCIÓN

PEC Cía. Ltda. es una empresa joven, que tiene como objetivo ejecutar obras para el sector petrolero aplicando estándares de calidad internacional y poniendo especial atención al cuidado del medio ambiente. La empresa ofrece servicios de construcción de ductos terrestres, estaciones de bombeo, desarrollo de ingenierías globales, gerencia de proyectos, servicios especiales de reparación, mantenimiento de ductos, pruebas hidrostáticas, etc.

PEC Cía. Ltda. ha visto la importancia que tienen los tanques de lavado de techo cónico fijo en la industria petrolera, puesto que de existir errores en el diseño, accesorios o inspecciones y pruebas inadecuadas, pueden producirse muchos accidentes leves o graves.

Es por esto que la empresa se ha enfocado en buscar una forma de optimizar el tiempo al momento de realizar la ingeniería básica.

Este proyecto de titulación busca, ajustar el diseño de este tipo de tanques al estándar del American Institute of Petroleum API 650 y al American Institute of Steel Construccions AISC. También, Realizar un análisis del proceso de separación, y como éste afecta al dimensionamiento del tanque. Con la ayuda de la hoja de cálculo elaborada, se realizará un ejemplo práctico de cómo realizar el diseño de este tipo de tanques.

La hoja de cálculo presentará un completo resumen sobre los parámetros del diseño de tanques de lavado de techo cónico fijo como también de las paredes deflectoras internas.

Además se presentan las recomendaciones para realizar el correcto montaje de este tipo de tanques.

CAPÍTULO 1

1 GENERALIDADES

1.1 TANQUES DE LAVADO

Los Tanques de lavado son muy utilizados en la industria petrolera para el proceso de deshidratación del crudo, es decir, es un tanque de que se usa al final del proceso de deshidratación, antes del transporte del crudo a los tanques de almacenamiento.

Existen diferentes tipos de tanques de lavado, cuyo diseño depende del tipo de crudo a tratar. El tanque de lavado con paredes deflectoras internas o baffles que es el que se va a estudiar en este proyecto de titulación, es conocido como un tratador de flujo horizontal, los cuales no son muy comunes pero muy utilizados en la industria petrolera ecuatoriana (Figura 1. 1). El principio de separación es la diferencia de gravedad entre el crudo y el agua.

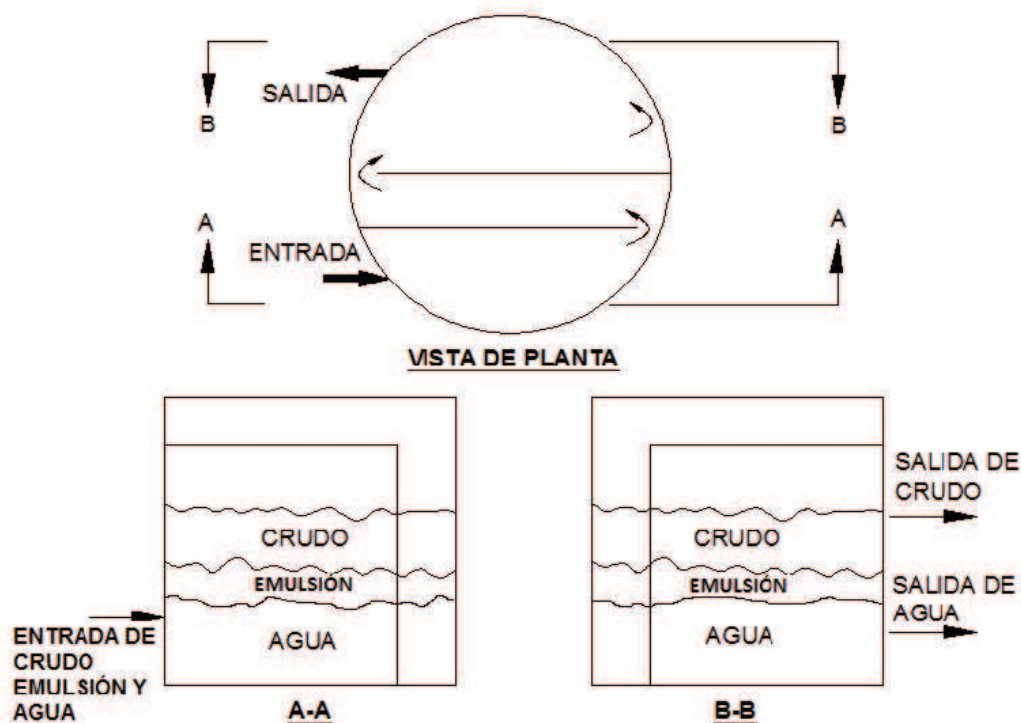


Figura 1. 1. Vista en planta de un tanque de tratamiento cilíndrico que incorpora deflectores internos que establecen flujo horizontal

Fuente: Stewart y Arnold, 2009

1.2 TANQUES DE LAVADO CON PAREDES DEFLECTORAS INTERNAS

Son recipientes sometidos a una presión cercana a la atmosférica que reciben un fluido multifásico (petróleo crudo, agua y gas) y son utilizados en la industria petrolera para completar el proceso de deshidratación de crudo en forma continua.

Por lo general, antes de entrar a un tanque de lavado, las emulsiones son sometidas a un proceso de separación gas-líquido en separadores convencionales. Durante este proceso se libera la mayor parte del gas de la solución, por lo que al tanque de lavado solo ingresa una cantidad relativamente pequeña.¹

Consiste de un tanque cilíndrico que tiene incorporado paredes deflectoras internas. Las paredes deflectoras internas establecen un patrón de flujo horizontal en el tanque cilíndrico, que es más eficiente para la separación por gravedad. Los sistemas o paredes deflectoras en los tanques de lavado son utilizados para que exista una ruta directa entre la entrada y la salida de la emulsión, no existan zonas muertas y pase por todas las regiones como se muestra en la Figura 1. 1.²

El tiempo que debe pasar la emulsión en el tanque de lavado para que el petróleo y el agua se separen adecuadamente, es una de las variables o parámetros más importantes a tener en cuenta. Este parámetro es conocido como el tiempo de retención. Usualmente se requiere que el petróleo a la salida del tanque de lavado, posea un promedio de agua igual o inferior a 1%. Los tiempos de retención varían entre 4 y 36 horas. De esta variable se hablará más adelante específicamente en el capítulo 3, ya que es esencial para dimensionar el tanque de lavado¹.

Los sistemas deflectores son generalmente para tanques de diámetros menores a 30 metros, es por eso que en este proyecto de titulación se ha puesto como restricción el diámetro y la altura máxima del tanque ($D_{m\acute{a}x}$ entre 6 y 25 metros y $H_{m\acute{a}x}$ entre 3 y 10 metros).

¹ Villavicencio, E. (2012). Recolección. Transporte y Distribución del Gas Natural y el Crudo. Tomo IV, 4ta. Edición. Santa Cruz: U Virtual. Pág. 208-209.

² Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 9.

El funcionamiento de un tanque de lavado con paredes deflectoras internas, es el siguiente:

El petróleo crudo, la emulsión y agua entran en el tanque de lavado y debe seguir la trayectoria del flujo entre los deflectores. La separación tiene lugar en las áreas de flujo rectas entre los deflectores. Por diferencia de densidades el agua se deposita en la parte baja del tanque, permitiendo que el petróleo crudo alcance el nivel más alto y rebose; para luego ser transferido al tanque de almacenamiento de petróleo crudo. La turbulencia junto con altas velocidades de flujo evita la separación en las esquinas, donde el flujo cambia de dirección.

1.2.1 PARTES DE UN TANQUE DE LAVADO

Se considerará las partes más importantes, que constituyen un tanque de lavado:

- Cuerpo del tanque.
- Deflectores internos.
- Línea de alimentación.
- Línea de descarga de petróleo.
- Línea de descarga de agua.

1.2.1.1 Cuerpo del Tanque

El cuerpo del tanque, es la parte principal de un tanque de lavado, ya que en su interior se realiza el proceso de deshidratación. Para el diseño de todas las partes que constituyen el cuerpo del tanque, se utilizará el estándar API 650 que es el apropiado, para el tipo de tanque de lavado que se va a tratar en este proyecto de titulación³.

³ Aguirre, E. y Vivas, Y. (2005). Elaboración del Manual de Operaciones de la Estación de Flujo Elías II (EEF-11), Ubicada en el Campo Socorro Oeste, Estado Anzoátegui. Caracas: UCV. Pág. 41.

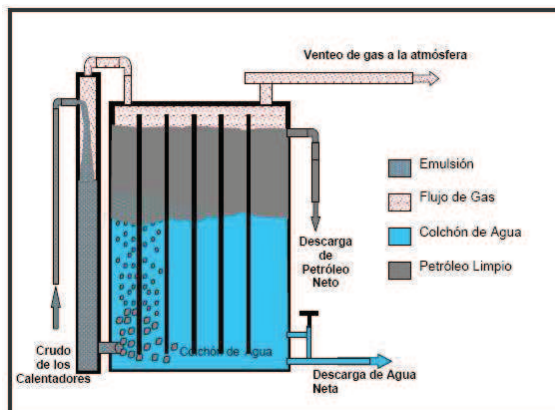


Figura 1. 2. Esquema de un tanque de lavado

Fuente: Aguirre y Vivas, 2005

El estándar API 650 contiene el diseño, fabricación, erección o montaje, inspección, y soldadura para tanques de almacenamiento de petróleo con techo fijo y techo flotante. Se tomará en cuenta al tanque de techo fijo cónico que es el adecuado para el tanque de lavado. El estándar API 650 está formado por 10 secciones, de las cuales se utilizaron las siguientes:

- Sección 3. Definiciones.
- Sección 4. Materiales.
- Sección 5. Diseño.
- Sección 7. Erección

Los fluidos en un tanque de lavado se agrupan en 4 zonas como se indica en la siguiente figura:

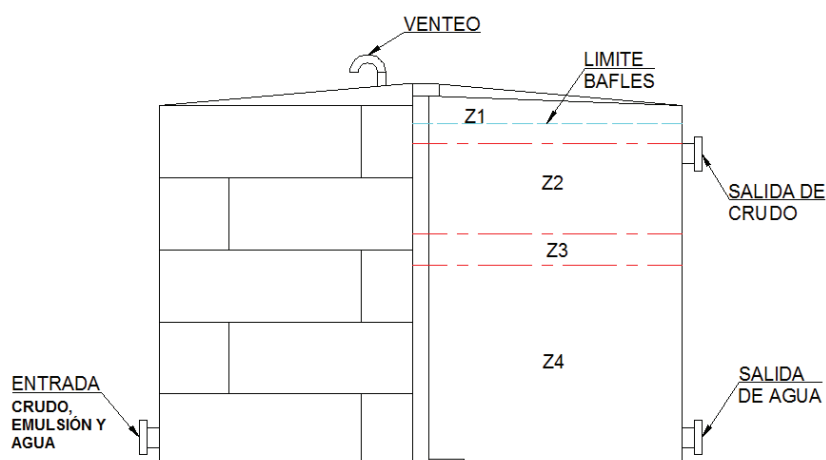


Figura 1. 3. Zonas en un tanque de lavado

Fuente: el Autor

- Z1, formada por una mínima cantidad de gas.
- Z2, formada por crudo deshidratado.
- Z3, formada por emulsión.
- Z4, formada por agua de lavado.

Es importante destacar, que estas capas no poseen linderos definidos, sino que sus límites se mezclan entre sí.

La formación de emulsiones se tratará más adelante.

1.2.1.2 Deflectores Internos

Un deflector interno o baffle, constituye una sección o pared armada con estructura metálica, que forma parte de un separador de productos de hidrocarburo, que se instalan al interior de tanque.

Básicamente se utilizan para incrementar el tiempo de retención del crudo sin aumentar el diámetro del tanque, lo que ayuda a reducir costos, también direcciona el flujo dentro del tanque lo que hace posible que el fluido, en el interior del tanque, entre en contacto con un número mayor de zonas y se mejore la separación crudo-agua, aún sin incrementar el tiempo de retención⁴.

Las principales funciones de los deflectores son las siguientes:

- Evitar a la canalización de la emulsión y, por lo tanto, mejorar la separación crudo-agua.
- Minimizar los problemas de turbulencia.
- Orientar el sendero óptimo que deben seguir los fluidos dentro del tanque.
- Reducir el grado de inestabilidad térmica, debido a diferencias de temperatura dentro del tanque.

Para explicar un poco de lo que se tratará en el Capítulo 3 y las ventajas que tienen los deflectores internos, se va a suponer que se tiene un tanque sin deflectores internos como el que se indica en la Figura 1. 4b, con un diámetro D igual a la longitud efectiva de separación L_{eff} y una altura H . En el otro lado, un

⁴ Aguirre, E. y Vivas, Y. (2005). Elaboración del Manual de Operaciones de la Estación de Flujo Elías II (EEF-11), Ubicada en el Campo Socorro Oeste, Estado Anzoátegui. Caracas: UCV. Pág. 38 y 39.

tanque de lavado con deflectores internos como el que se indica en la Figura 1. 4a, cuya longitud efectiva de separación L_{eff} es igual al sumatorio de $L_1+L_2+L_3+L_4$ y el diámetro es igual a $D/3$. El tiempo de retención es igual para los dos tanques

Según se observa en la Figura 1. 4, el crudo dentro del tanque sin deflectores sigue una sola trayectoria sin aprovechar todos los espacios dentro del tanque, mientras que el tanque con deflectores internos si lo hace y con el mismo tiempo de retención. Esto implica una reducción en el diámetro del tanque y por lo tanto una reducción de costos, y una mejor separación. Es por esto que a los tanques de lavado con deflectores internos habitualmente se los coloca antes de los tanques de almacenamiento.

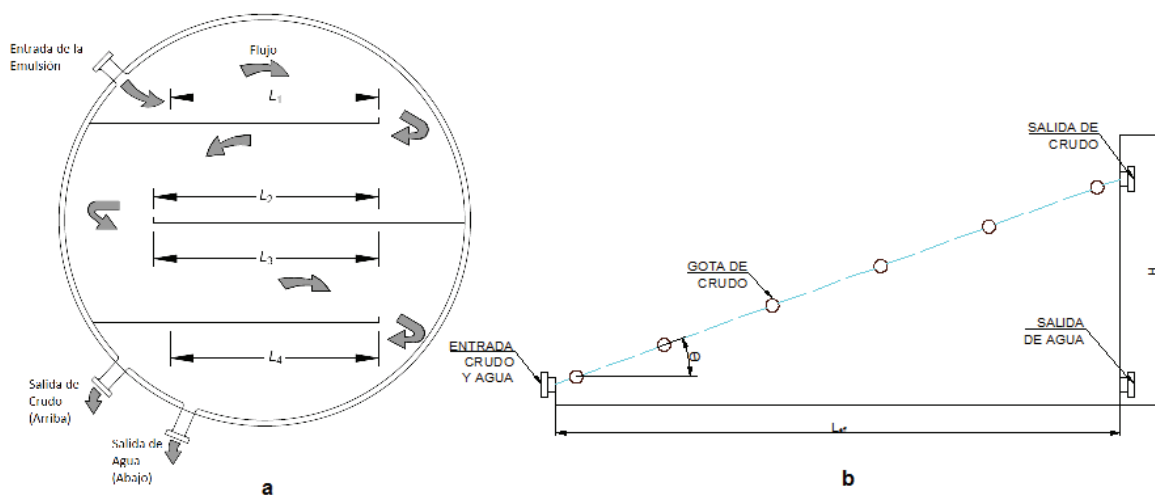


Figura 1. 4. Ventaja del uso de los deflectores para reducción de diámetro del tanque
Fuente: el Autor

1.2.1.3 Línea de Alimentación⁴

Es la parte por donde el petróleo crudo, agua y emulsión ingresa al tanque, el recorrido de esta línea puede presentar las opciones siguientes:

- Del separador gas-líquido, la emulsión pasa a uno o varios calentadores, y de allí se envía al tanque de lavado. Esta opción se puede aplicar a crudos pesados y extra pesados.
- Del separador gas-líquido, la línea que contiene la emulsión se une con otra que transporta agua caliente. Luego la mezcla emulsión-agua caliente se envía al tanque de lavado. Esta opción se puede aplicar a crudos pesados y medianos.

- Del separador gas-líquido, la emulsión va directamente al tanque de lavado, lo cual generalmente se aplica a crudos medianos-livianos.

1.2.1.4 Línea de descarga de petróleo

Es la parte por donde sale el petróleo o crudo ya deshidratado.

1.3 DESHIDRATACIÓN DE CRUDOS

La deshidratación de crudos es el proceso mediante el cual se separa el agua asociada con el crudo, ya sea en forma emulsionada o libre, hasta lograr reducir su contenido a un porcentaje previamente especificado. Generalmente, este porcentaje es igual o inferior al 1 % de agua⁵.

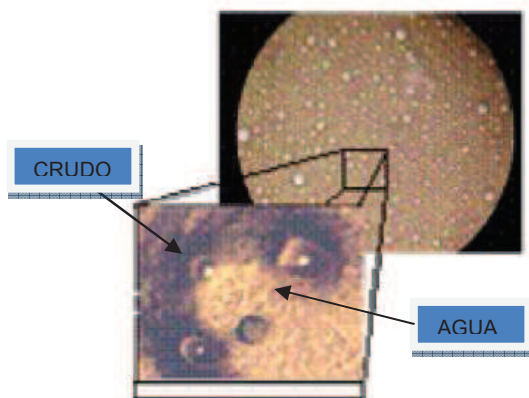


Figura 1.5. Microfotografía de una emulsión en petróleo crudo
Fuente: Marfisi y Salager, 2004

1.3.1 EMULSIONES

Una emulsión es una mezcla estable de agua y crudo que no se separa por gravedad sola. En el caso de una emulsión regular de crudo-aceite, es una dispersión de gotas de agua en aceite. El crudo es la fase continua y el agua es la fase dispersa.

1.3.1.1 Tipos de Emulsiones⁶

A las emulsiones se las puede tipificar de dos maneras:

La primera clasifica a las emulsiones de agua en aceite (W/O) como emulsiones directas y las emulsiones de aceite en agua (O/W) como emulsiones inversas.

⁵ Marfisi, S. y Salager, J. (2004). Deshidratación de Crudo: Principios y Tecnología. Mérida: Laboratorio FIRP. Pág. 3.

⁶ Marfisi, S. y Salager, J. (2004). Deshidratación de Crudo: Principios y Tecnología. Mérida: Laboratorio FIRP. Pág. 4.

Las emulsiones directas se clasifican en emulsiones duras y emulsiones suaves.

Una emulsión dura es muy estable y por lo tanto difícil de romper, principalmente porque las gotas dispersas son muy pequeñas. Mientras que, una emulsión suave es inestable y fácil de romper. Es decir, cuando existe un gran número de gotas de agua de gran diámetro, se separan fácilmente por la fuerza gravitacional.

Existen tres requisitos esenciales para formar una emulsión:

- Dos líquidos inmiscibles, como el agua y el crudo.
- Suficiente agitación para dispersar uno de los líquidos en pequeñas gotas en el otro.
- Un agente emulsionante para estabilizar las gotas dispersas en la fase continua.

1.3.2 TRATAMIENTO DE LA EMULSIÓN

El crudo emulsionado se extrae mediante uno o más procesos de tratamiento. El tratamiento se refiere a cualquier proceso diseñado para separar petróleo crudo de agua y contaminantes externos adheridos desde el depósito. Los Procesos de tratamiento de una emulsión requieren una combinación de lo siguiente:

- Adición de productos químicos,
- El tiempo de asentamiento,
- Coalescencia,
- Viscosidad,
- Efectos del calor,
- Dimensión de la gota y tiempo de retención.

1.3.2.1 Adición de Químicos

El propósito de los productos químicos de tratamiento es inducir la coalescencia (unión de gotas de agua), de modo que el crudo y el agua se separarán rápidamente. No hay sustancia química universal que romperá todas las emulsiones igual de bien. La determinación de la sustancia química

(desemulsionante) correcta a utilizar, es comúnmente realizada por un representante de ventas de químicos mediante una prueba de botella⁷.

- **Prueba de Botella**

Las pruebas de botella ayudan a determinar el tipo de sustancia química que puede ser más efectiva para romper la emulsión de campo. Los resultados de ésta prueba indican la menor cantidad de sustancia química necesaria para separar la mayor cantidad de agua de la emulsión W/O. Para el éxito de esta prueba se requiere seleccionar una muestra representativa de la corriente de producción de la emulsión, la cual debe reunir las siguientes características:⁸

- Ser representativa de la emulsión a ser tratada.
- Contener cantidades representativas de los químicos presentes en el sistema, tales como inhibidores de corrosión y parafinas.
- Debe ser fresca para evitar la estabilización por envejecimiento de la emulsión.
- Simular las mismas condiciones de agitación y calentamiento tanto como sea posible.

En la Figura 1. 6 se esquematiza el procedimiento para la aplicación de la prueba de botella, el cual consiste básicamente en preparar una serie de botellas graduadas y añadir 100 ml de la emulsión agua en crudo fresca o preparada en laboratorio, se dosifican diferentes concentraciones de la sustancia química a cada botella dejando una botella sin sustancia química (botella patrón), se homogeniza la mezcla y se colocan las botellas en un baño termostático a la temperatura deseada. Cada 30 min se lee el volumen de agua coalescida y se observa la calidad de la interfase, del agua separada y de las paredes del tubo. Con esta data se construye la gráfica de Porcentaje de agua separada en función del tiempo, así como la gráfica de estabilidad, que permite conocer el tiempo necesario para separar 1/2 ó 2/3 del volumen de fase acuosa. Tales gráficas permiten determinar la eficiencia de la sustancia química.

⁷ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 45-49.

⁸ Marfisi, S. y Salager, J. (2004). Deshidratación de Crudo: Principios y Tecnología. Mérida: Laboratorio FIRP. Pág. 20.

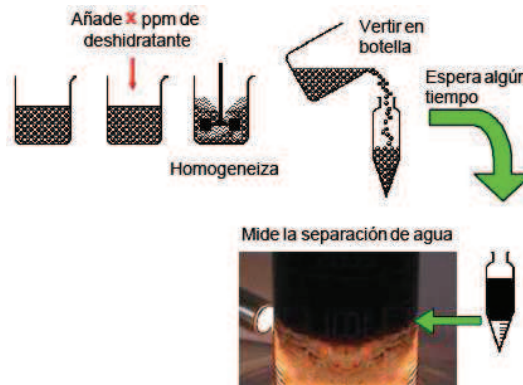


Figura 1. 6. Procedimiento para la realización de la prueba de botella
Fuente: Marfisi y Salager, 2004

1.3.2.2 Tiempo de Asentamiento

Después de la adición de químicos para el tratamiento, el tiempo de asentamiento es necesario para promover la sedimentación por gravedad de las gotas de agua coalicionadas. La Figura 1. 7 ilustra los efectos del tiempo en la coalescencia. El tiempo necesario para que el agua se asiente se ve afectado por la densidad diferencial del crudo y el agua, la viscosidad del crudo, el tamaño de las gotas de agua, y la estabilidad relativa de la emulsión⁷.

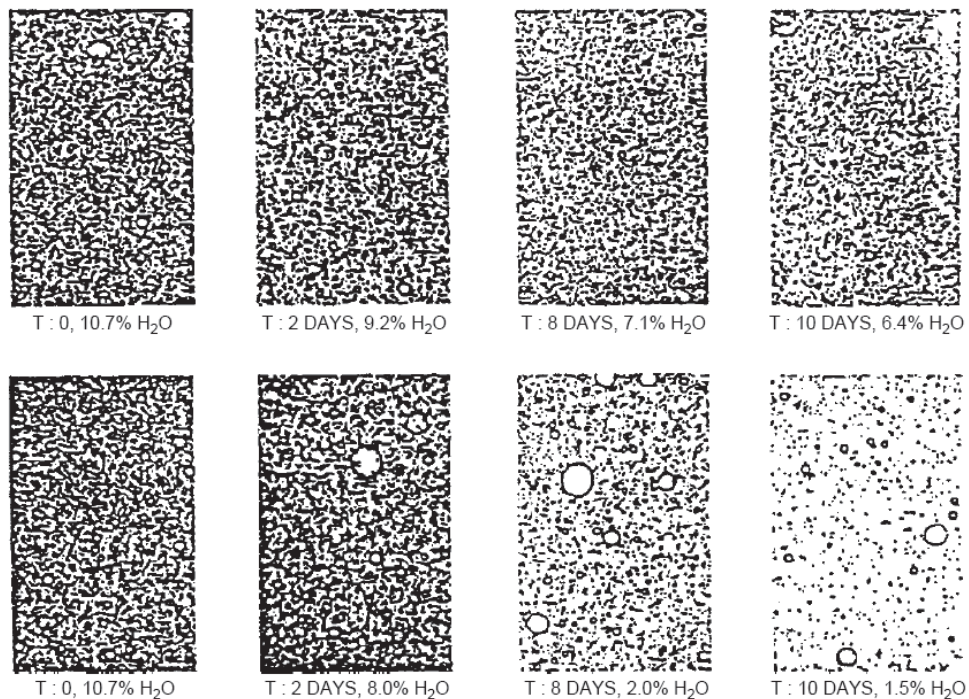


Figura 1. 7. Efecto del tiempo sobre la coalescencia. Arriba: Emulsión sin químicos.
Abajo: Emulsión con demulsificador adicionado
Fuente: Stewart y Arnold, 2009

1.3.2.3 Coalescencia

La coalescencia se define como un fenómeno irreversible en el cual las gotas pierden su identidad, el área interfacial se reduce y también la energía libre del sistema (condición de inestabilidad).

El proceso de coalescencia en sistemas de tratamiento depende del tiempo. En las dispersiones de dos líquidos inmiscibles, la coalescencia inmediata rara vez se produce cuando dos gotas chocan. Si el par de gotas está expuesto a las fluctuaciones de presión turbulenta, y la energía cinética de las oscilaciones inducidas en la coalescencia del par de gotas es mayor que la energía de adhesión entre ellas, el contacto se rompe antes de que la coalescencia se haya completado.

1.3.2.4 Consideraciones de Separación por Gravedad⁹

La separación del crudo depende de la gravedad de las gotas de agua separadas de la fase continua de crudo, debido a que las gotas de agua, son más pesadas que el volumen de crudo que desplazan. Sin embargo, la gravedad es una fuerza de fricción causada por el movimiento descendente de la gota de agua a través del crudo. Cuando las dos fuerzas son iguales, una velocidad constante se alcanza, que puede ser calculada a partir de la ley de Stokes como (la ley de Stokes se deriva en el volumen de separación gas-líquido y líquido-líquido).

$$V_t = 1.78 \times 10^{-6} * \frac{(\Delta SG)d_m^2}{\mu} \quad (1.1)$$

Donde

- V_t = velocidad descendente de la gota de agua en relación a la fase continua de aceite, (m / s),
- d_m = diámetro de la gota de agua, μm ,
- μ = viscosidad dinámica del crudo de fase continua, cent poise (cp).
- ΔSG = diferencia en la gravedad específica entre el crudo y el agua ($\Delta SG = SG_w - SG_o$).

⁹ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 61.

Varias conclusiones se pueden extraer de la ley de Stokes:

- Cuanto mayor sea el tamaño de una gota de agua, mayor será el cuadrado de su diámetro y, por lo tanto, mayor será la velocidad de descenso. Es decir, cuanto más grande es el tamaño de la gota, menos tiempo tardará la gota en depositarse en el fondo del recipiente y por lo tanto más fácil es para tratar el crudo.
- Cuanto mayor es la diferencia de densidad entre la gotita de agua y la fase de aceite, mayor será la velocidad de descenso. Esto es, mientras más ligero es el crudo, más fácil es de tratar el mismo. Si el peso bruto es 10 ° API y el agua es dulce, la velocidad de sedimentación es cero, ya que no hay diferencia de gravedad.
- Cuanto mayor sea la temperatura, menor es la viscosidad del crudo y, por lo tanto, mayor será la velocidad de descenso. Es decir, es más fácil de tratar el crudo a altas temperaturas que a temperaturas bajas (suponiendo un efecto pequeño sobre la diferencia de gravedad debido al aumento de temperatura).

También se puede determinar las velocidades de ascenso del crudo y la velocidad de descenso del agua. Esto se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

- Para calcular la velocidad de ascenso del crudo.

$$V_{ac} = \frac{g * D^2 * (\delta_w - \delta_o)}{\mu_o} \quad (1.2)$$

Dónde:

- g = gravedad, 981 cm/s²,
 - D = diámetro promedio da la gota, se puede asumir un valor de 0.0010 cm,
 - δ_w = densidad del agua en g/cm³,
 - δ_o = densidad del crudo en g/cm³,
 - μ_o = viscosidad cinemática del crudo en g/cm*s,
 - V_{ac} = velocidad de ascenso del crudo en m/s.
- Para calcular la velocidad de descenso del agua:

$$V_{da} = \frac{g * D^2 * (\delta_w - \delta_o)}{\mu_w} \quad (1.3)$$

Dónde:

- g = gravedad, 981 cm/s²,
- D = diámetro promedio da la gota, se puede asumir un valor de 0.0010 cm,
- δ_w = densidad del agua en g/cm³,
- δ_o = densidad del crudo en g/cm³,
- μ_w = viscosidad cinemática del agua en g/cm*s
- V_{da} = velocidad de descenso del agua en m/s.

1.3.2.5 Viscosidad

La viscosidad de la fase continua de crudo es extremadamente importante en el tamaño de un tratador. La ley de Stokes ecuación (1.1), que se utiliza para determinar la velocidad de sedimentación de una gota de agua a través de la solución de la fase continua de crudo, incluye la viscosidad del crudo. Como se analizó en el punto 1.3.2.4, a medida que la viscosidad del crudo aumenta, la velocidad de sedimentación de una gota dada disminuye. Esto requiere que el tamaño del tratador sea aumentado.

La viscosidad del crudo también afecta a la coalescencia de las gotas de agua. A medida que la viscosidad del crudo aumenta, hay más resistencia al movimiento aleatorio de las gotas de agua. Por lo tanto, las gotas no se mueven tan rápido o tan lejos. Esto disminuye la energía y la frecuencia de las colisiones de las gotas de agua. Por lo tanto, es más difícil de cultivar grandes gotas de agua en el recipiente. A medida que aumenta la viscosidad del crudo, también es más difícil el cizallamiento o separación de las gotas de crudo que se unen en la tubería que conduce al recipiente, y en la sección de lavado con agua del tanque. El efecto neto es que el aumento de la viscosidad del crudo aumenta el mínimo tamaño de la gota de agua que debe ser eliminada¹⁰.

¹⁰ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 34.

1.3.2.6 Efectos del Calor

La adición de calor a la entrada de la corriente de la mezcla crudo-agua es el método tradicional de separación de fases. La adición de calor reduce la viscosidad de la fase de crudo, lo que permite velocidades de sedimentación más rápidas de acuerdo con la ley de Stokes de sedimentación que se indica en la ecuación (1.1).

La entrada de calor y por lo tanto el combustible requerido para el tratamiento del crudo dependerá de la elevación de la temperatura, cantidad de agua en el crudo, y velocidad de flujo¹¹.

Suponiendo que el agua libre se ha separado de la emulsión, el agua restante es menor al 10% del crudo, y el sistema de tratamiento está aislado para minimizar las pérdidas de calor, la entrada de calor requerida puede determinarse a partir de:

$$q = 16Q_o\Delta T [0.5(SG)_o + 0.1], \quad (1.4)$$

Donde

- q = Entrada de calor, (kW),
- Q_o = Caudal de aceite, (m³/h),
- ΔT = Incremento de temperatura, (°C),
- SG_o = Gravedad específica del petróleo en relación con el agua.

1.3.2.7 Dimensión de la Gota de Agua y el Tiempo de Retención¹²

El diámetro de las gotas de agua es el parámetro más importante para controlar la sedimentación de agua ya que si este término se aumenta en la ecuación (1.1) de sedimentación de la Ley de Stokes, creará un incremento mucho mayor de velocidad de sedimentación. Por lo tanto, en el dimensionamiento de un tanque de lavado, es necesario conocer o predecir un diámetro de gota de agua que debe separarse del aceite para cumplir una especificación de Sedimento Básico y Agua (BS & W) deseada.

¹¹ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 61.

¹² Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 59-60.

Sería extremadamente raro tener los datos de laboratorio acerca de la coalescencia de gotas de agua para un sistema dado. Se esperaría que el tamaño de gota de agua aumente con aumento en el tiempo de retención y con el aporte de calor. El calor excita el sistema, dando lugar a más colisiones de pequeñas gotas de agua. Se puede esperar que el tamaño de gota de agua disminuya con el aumento de la viscosidad del crudo, la cual, inhibe el movimiento de las partículas y disminuye la fuerza de colisión. El tratador representa un proceso dinámico, que no se puede simular adecuadamente por las pruebas de laboratorio estáticas, como la prueba de la botella.

El efecto de la temperatura sobre la distribución del tamaño de las gotas de agua es pequeño. La temperatura, sin embargo, tiene un gran efecto en la viscosidad del crudo, puesto que la temperatura y el tiempo de retención tienen efectos relativamente pequeños, una relación empírica se puede proponer sobre la distribución del tamaño de las gotas solo a la viscosidad del crudo.

1.4 MATERIALES PARA EL TANQUE

Es La sección 4 MATERIALES del estándar API 650, se describen las especificaciones para materiales, sujetas a modificaciones y limitaciones indicadas, en el caso de usar materiales cuyas especificaciones no se encuentren bien identificadas, dichos materiales deben satisfacer las pruebas indicadas en el apéndice N en sus diferentes ítems.

En el estándar API650 se establecen 6 grupos de materiales base. Los aceros para láminas desde el grupo I hasta IIIA son normalmente los más usados. Los aceros de los grupos IV a VI se utilizarán, siempre y cuando¹³:

- Se mantenga todo el criterio de diseño original para la más baja resistencia de entre los aceros de los grupos I hasta IIIA.
- Obtener previamente por escrito la aprobación del comprador o cliente para su uso, (se requiere de la aprobación ya que el costo de la plancha es alto).
- Asegurarse de que todos los requerimientos para el diseño, fabricación, montaje e inspección, para el material a ser sustituido reúnan las

¹³ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 4-1.

especificaciones para el más bajo esfuerzo de entre los aceros de los grupos I hasta IIIA. Estas especificaciones (deben incluir pero no son limitantes) son: Propiedades del material y métodos de proceso de producción, Niveles de esfuerzo aceptable, dureza, Procedimientos de soldadura. Alivio de esfuerzos térmicos, ensayos no destructivos.

Las láminas almacenadas son susceptibles a la corrosión, pero de acuerdo con el numeral 4.2.1.2.3 del Estándar API 650, se aceptarán aquellas láminas almacenadas que tengan una tolerancia en su espesor de hasta 0.3 mm (0.01 in) referidos al espesor de diseño o al espesor mínimo requerido.

El máximo espesor que pueden tener las láminas según API 650 es de hasta 45 mm (1.75 in) y podrán ser usadas únicamente para la fabricación de accesorios o bridas. (Estándar API 650 4.2.1.4). El fabricante debe elegir dentro de las diferentes opciones y calidades de láminas, los aceros recomendados en los ítems 4.2.2 (especificaciones de la American Society for Testing and Materials ASTM), 4.2.3 (especificaciones de la Canadian Standard Association CSA) 4.2.4 (especificaciones Internacional Organization for Standardization ISO) o 4.2.5 (Estándares nacionales). Ver anexo 1. Especificaciones y Propiedades Mecánicas para planchas.

El Estándar API 650 recomienda la unión de materiales por soldadura, las técnicas de soldadura son de fundamental importancia y los procesos de soldadura deben ser tal que la fuerza y dureza sean consistentes con el material de las placas a unirse. Todas las soldaduras realizadas o superficies defectuosas reparadas debe hacerse con electrodos de bajo hidrogeno que sean compatibles en composición química, fuerza, y calidad con el material de la placa¹⁴.

Se debe tomar en cuenta que si las láminas requieren de un tratamiento térmico, ensayo de impacto Charpy V-notch, o control de la dureza, debido a las deformaciones plásticas cuando se realiza el rollado de las láminas, se tiene que cumplir con las referencias indicadas en los ítems 4.2.7,2.2.8 y 4.2.9,2.2.10 del estándar respectivamente¹⁵.

¹⁴ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 4-4.

¹⁵ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 4-5.

De acuerdo con 4.2.9.1 de API 650, las láminas con espesores mayores a 1.5 in, tendrán que ser de acero calmado, fabricados con la práctica del grano fino y tratadas térmicamente mediante normalizado, normalizado y templado, o calmadas y templadas para luego realizar las pruebas de impacto según 4.2.10.2.

1.4.1 MATERIALES PARA EL CUERPO DEL TANQUE

La mínima temperatura de diseño permisible o la temperatura del sitio en donde se va a instalar el tanque es el criterio para la selección de los materiales que se va a usar para la construcción del cuerpo o paredes, como primera instancia, para ello se usa la Figura 1. 8 .En la misma se presenta la relación que tiene el espesor de plancha, ubicadas en las abscisas (máximo de hasta 1.5 in. incluido el espesor de corrosión) versus la temperatura de diseño del metal, ubicadas en las ordenadas, para los diferentes grupos.

Para seleccionar el grupo API, se utiliza la Figura 1. 8 se ingresa con la temperatura del metal especificado previamente por el comprador, que de acuerdo con 4.2.9.3 se asumirá en 8 °C Ti sobre la temperatura ambiente más baja en un día pésimo. En nuestro país por sus turísticas ambientales es apropiado el uso de los materiales base del grupo API I. son: especificaciones para aceros ASTM 283 grado C, A 285 grado C, A 131 grado A. A 36.

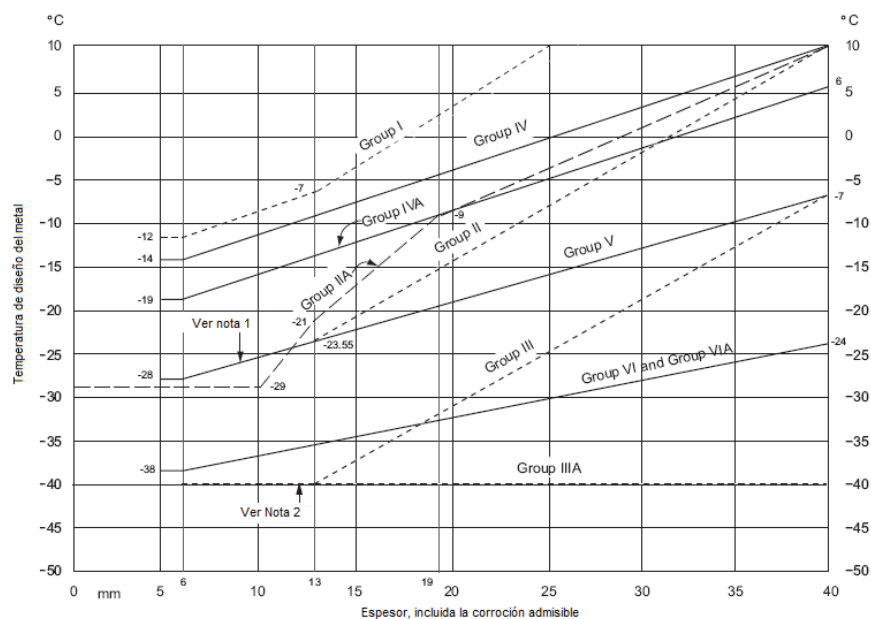


Figura 1. 8. Clasificación de Materiales. API 650

Fuente: Estándar API 650, 2011

Notas:

1. Las líneas de los materiales de los Grupos II y V coinciden para espesores menores a 13mm.
2. Las líneas de los materiales de los Grupos III y IIIA coinciden para espesores menores a 13mm.
3. Los materiales para cada grupo se listan en las tablas 4-4a y 4-4b.
4. Usar los Grupos de materiales IIIA y VIA para tubería y bridas.

La Tabla 1.1 indica las láminas de acero ASTM A283 - Gr C y A36 recomendadas para la fabricación de tanques de almacenamiento y recipientes a presión que se pueden encontrar con facilidad.

Tabla 1. 1. Dimensiones de planchas de acero ASTM A283 – Gr C y ASTM A36

ESPECIFICACIONES		
Dimensión	Espesor	Calidad de Acero
[m]	[mm]	
1.22x2.44	1.5 - 12.0	ASTM A36
1.22x6.00	2.0 - 12.0	
1.50x6.00	4.0 - 12.0	
1.80.6.00	4.0 - 12.0	
2.00x6.00	6.0 - 100.0	
1.50x6.00	3.0 - 12.0	ASTM A283 Gr C / ASTM A36
2.44x12.00	6.0 - 30.0	
2.50x6.00	6.0 - 30.0	
2.50x12.00	6.0 - 30.0	

Fuente: IPAC, <http://www.ipac-acero.com/ipac/plcn001.html>, consultado febrero 2014

1.4.2 MATERIALES PARA LÁMINAS DEL TECHO, ESTRUCTURA METALICA SOPORTANTE, TUBERIA, BRIDAS, PERNOS Y ELECTRODOS

Las láminas para los techos, deben estar de acuerdo con las características de los aceros en las especificaciones ASTM A 570M / A 570, Grado 33. (Estándar API 650 4.3)

Para la selección de perfiles estructurales deben de estar de acuerdo con las características de los aceros en las especificaciones:

- ASTM A 36
- ASTM A 131M/A 131
- CSA G40.21-M, Grados 260W, 300W, 350W, 260WT, 300WT, y 350WT.

- ISO 630, Grados Fe 42 y Fe 44, Calidades B, C y D.
- Aceros Estructurales AISC.
- Acero Estructural producido de acuerdo con estándares nacionales reconocidos y que cumplan con los requerimientos de la Tabla 1.6, siempre y cuando el cliente esté de acuerdo.

El estándar menciona que todos los perfiles estructurales deben ser fabricados por algún proceso de alto horno, horno eléctrico o proceso básico de oxígeno; acero recubierto de cobre puede ser aceptado cuando el cliente lo apruebe.

Tabla 1. 2. Grados aceptables de material (a) Propiedades Mecánicas

PROPIEDADES MECÁNICAS								
GRADO	ESFUERZO A LA TRACCIÓN				MÍNIMO LÍMITE ELÁSTICO		ESPESOR MÁXIMO	
	MÍNIMO		MÁXIMO		MPa	ksi	mm	in
	MPa	ksi	MPa	ksi				
235	360	52	510	74	235	34	20	0.75
250	400	58	530	77	250	36	40	1.5
275	430	62	560	81	275	40	40	1.5

Fuente: Estándar API 650,2007

Tabla 1. 3. Grados aceptables de material (b) Propiedades Químicas

COMPOSICIÓN QUÍMICA				
GRADO	PORCENTAJE MÁXIMO DE CARBONO		PORCENTAJE MÁXIMO DE FOSFORO Y SULFURO	
	Caliente	Terminado	Caliente	Terminado
235	0.2	0.24	0.04	0.05
250	0.23	0.27	0.04	0.05
275	0.25	0.29	0.04	0.05

Fuente: Estándar API 650,2007

La selección de materiales para bridas debe estar de acuerdo con las características de los aceros en la especificación de la American Society of Mechanical Engineer ASME B16.5 para bridas de acero al carbono forjado. El

material de las planchas de las boquillas para las bridas tendrá propiedades físicas mejores o iguales a las exigidas por ASME B16.5.¹⁶

El material para pernos debe estar de acuerdo con las características de los aceros en las especificaciones ASTM A 307 o A 193M/A 193. Se utiliza solo para propósitos estructurales el acero A 325M/ A 325.¹⁷

La selección de los electrodos, debe hacerse según la resistencia a la tensión mínima del material, de la siguiente manera:¹⁷

- Si la resistencia a la tensión mínima del material a soldar es menor que 550 MPa (80 ksi), se deben usar electrodos para soldadura manual al arco eléctrico de las series E60 y E70 establecidos en la última edición del AWS A5.1 Especificación de Electrodos para Acero al Carbono con Soldadura al Arco Metálico Protegido -"Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding".
- Si la resistencia a la tensión mínima es 550 MPa – 585 MPa (80 ksi – 85 ksi), se deben usar electrodos para soldadura manual al arco eléctrico de la serie E80XX-CX establecidos en la última edición del AWS A5.5.

¹⁶ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 4-15.

CAPÍTULO 2

2 DISEÑO DEL TANQUE SEGÚN API 650

Este capítulo se refiere al diseño de tanques bajo los requerimientos que proporciona el estándar API 650 en la sección 5.

Empieza por el diseño del fondo del tanque y anillo anular, los espesores mínimos y la manera de seleccionar uno adecuado, de acuerdo a las dimensiones del tanque.

Para el diseño del cuerpo del tanque, se estudia dos métodos para el cálculo de los espesores de las planchas, que componen cada uno de los anillos: el método de un pie y el método del punto variable. Se conocerá que método utilizar de acuerdo a las dimensiones del tanque.

Luego, se estudia la parte referente a los anillos de refuerzo. El intermedio (viga intermedia) que depende de la altura del tanque y la velocidad del viento del lugar donde va a operar el tanque. El anillo de refuerzo superior o ángulo tope, que para seleccionarlo correctamente es necesario, realizar un análisis de presión interna a la que estará sometido el tanque al momento de la operación.

También, se realiza un análisis de cargas de viento para saber si se necesita anclajes. Para las cargas por sismo, se realiza un diseño que permite determinar el valor del momento de volcado de acuerdo a la zona sísmica, mediante el cual se puede conocer si el tanque necesita anclaje mecánico o está auto anclado.

Para finalizar, se estudia la parte referente a los pernos de anclaje y requerimientos para la placa anular. Para los pernos de anclaje, se puede determinar el número y el tipo de material a utilizar si el tanque los necesita.

2.1 DISEÑO DEL FONDO DEL TANQUE Y ANILLO ANULAR

La presión aplicada sobre un fluido contenido en un recipiente o tanque, se transmite por igual en todas las direcciones dentro de este.

Cuando la gravedad es la única fuerza que actúa sobre un líquido contenido en un recipiente abierto, la presión en cualquier punto del líquido es directamente

proporcional al peso de la columna vertical de dicho líquido, situada sobre ese punto. La presión es a su vez proporcional a la profundidad del punto con respecto a la superficie, y es independiente del tamaño o forma del recipiente.

Por lo indicado anteriormente la acción (presión) que ejerce el contenido del tanque sobre la plancha del fondo, se contrarresta por la reacción ejercida por la base de cemento y por el suelo, específicamente la función del fondo es mantener la hermeticidad para que el producto no se filtre a la base, entonces este elemento se dimensiona con las recomendaciones dadas por API 650.

El estándar API 650, restringe que todas las láminas del fondo deben tener un mínimo espesor de 6 mm (1/4 in) libre del espesor de corrosión especificado por el comprador, el ancho nominal de las láminas debe ser de 1800 mm (72 in). Por lo general se utiliza el mismo material para el fondo y para el primer anillo, cuyo cuerpo debe proyectarse a 25.4 mm (1 in) como mínimo desde el filo del fondo del tanque como indica la Figura 2. 1.¹⁷

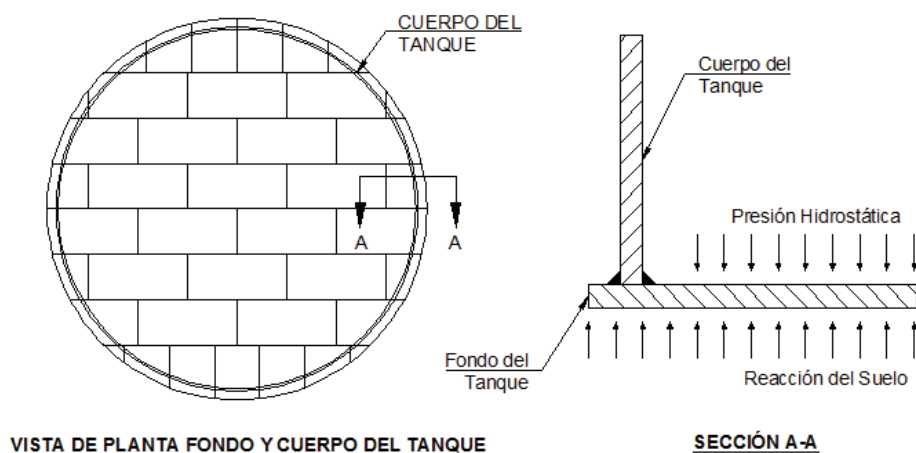


Figura 2. 1. Unión cuerpo-fondo del tanque

Fuente: el Autor

La recomendación que hace el estándar API 650, es que para tanques de gran capacidad se instale un anillo anular (Figura 2. 2), el anillo anular estará en función del material, de su esfuerzo admisible y del espesor del primer anillo.

¹⁷ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-8.

2.1.1 DISEÑO DE LA PLACA ANULAR

En los códigos europeos, el uso de la placa anular es obligatorio para todos los tanques independientemente de su capacidad de almacenamiento.

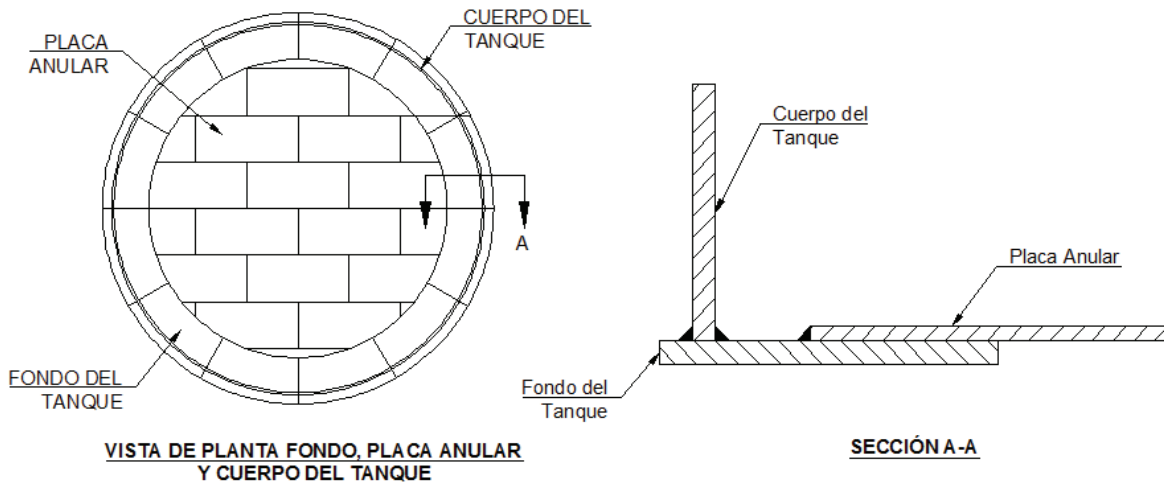


Figura 2. 2. Arreglo de planchas para placa anular

Fuente: el Autor

El anillo anular estará en función del material, de su esfuerzo admisible y del espesor del primer anillo. Cuando el primer anillo del cuerpo del tanque es diseñado usando los esfuerzos de los materiales de los grupos IV, IVA, V o VI, se usará placa anular y soldadura a tope con el fondo del tanque.¹⁹

Cuando el primer anillo del cuerpo es de un material de los grupos IV, IVA, V O VI y el esfuerzo de diseño (S_d) del primer anillo es menor o igual a 160 MPa (23,2 ksi) o usando su esfuerzo en prueba hidrostática (S_t) del primer anillo es menor o igual a 172 MPa (24,9 ksi), no es necesario instalar la plancha anular¹⁸. Los valores de esfuerzo en prueba de diseño e hidrostática se encuentran tabulados en el anexo 1.

Este anillo se proyecta sobre el ancho radial, 600 mm (24 in), hacia el interior y 50 mm (2 in), hacia el exterior del cuerpo como mínimo. Este ancho radial se calcula con la siguiente ecuación:

$$W_b = \frac{215 * t_b}{(H * G)^{0.5}} \quad (2.1)$$

¹⁸ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-9.

Dónde:

- W_b = Ancho radial, en mm,
- t_b = Espesor de la placa anular, en mm,
- H = Nivel de líquido máximo de diseño, en m,
- G = Gravedad específica de diseño a ser almacenado.

El espesor de la placa anular se selecciona de la Tabla 2. 1, la misma que está en función del esfuerzo del material en prueba hidrostática y del espesor del primer anillo.

Tabla 2. 1. Selección de espesor de plancha para anillo anular

ESPESOR NOMINAL DE PLANCHA DEL PRIMER ANILLO (mm)	ESFUERZO EN PRUEBA HIDROSTÁTICA DEL PRIMER ANILLO (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t \leq 45$	9	13	16	19

Fuente: Estándar API 650, 2007

A este espesor seleccionado se le suma un espesor por corrosión. Además el anillo puede tener la forma circular o la de un polígono regular. La disposición de la forma será de tal manera que se aproveche y optimice el área de las planchas para evitar los desperdicios.

2.2 CÁLCULO DE ESPESORES PARA EL CUERPO DEL TANQUE

El cuerpo del tanque es el componente más grande y crítico de un tanque ya que por la forma como se lo va montando puede tener varios inconvenientes ya que necesita del rolado de varias láminas o placas para alcanzar la altura y el diámetro del requerido.

Por tal motivo el cálculo de espesores se debe hacer de manera cuidadosa para obtener los espesores óptimos, que permitan tener un tanque seguro y de costos razonables.

Entre las condiciones de diseño requeridas dadas por el comprador para tanques con las características antes mencionadas se tiene:

- Temperatura del metal, basado en la temperatura ambiente
- Diámetro, altura del tanque y capacidad
- Gravedad específica del líquido a almacenarse
- Sobre espesor de corrosión.
- Velocidad del viento.
- Localización geográfica.

2.2.1 MÉTODO DEL PUNTO FIJO O DE UN PIE

El método de un pie calcula los espesores requeridos en los puntos de diseño de 0,3 m (1 pie) por encima de la parte inferior de cada anillo. Este método no se usa para tanques de más de 61 m (200 pies) de diámetro.¹⁹

El espesor de la plancha que conforma el primer anillo será el mayor valor calculado entre las siguientes ecuaciones:

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{S_d} + CA \quad (2.2)$$

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)}{S_t} \quad (2.3)$$

- t_d = Espesor de diseño del cuerpo en mm,
- t_t = Espesor del cuerpo en prueba hidrostática, en mm,
- D = Diámetro nominal del tanque, en m,
- H= Nivel de líquido de diseño, en m. (Altura desde la base del anillo del fondo, al nivel de diseño del líquido especificado por el comprador o cliente, esta altura se tiene en la Figura 2. 3.
- G= Gravedad específica de diseño del líquido a ser almacenado especificada por el comprador.
- CA = Corrosión admisible, en mm., especificada por el comprador o cliente.²⁰
- S_d = Esfuerzo admisible para la condición de diseño, en MPa.

¹⁹ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-14.

²⁰ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-7.

- S_t = Esfuerzo admisible para la condición de prueba hidrostática, en MPa.

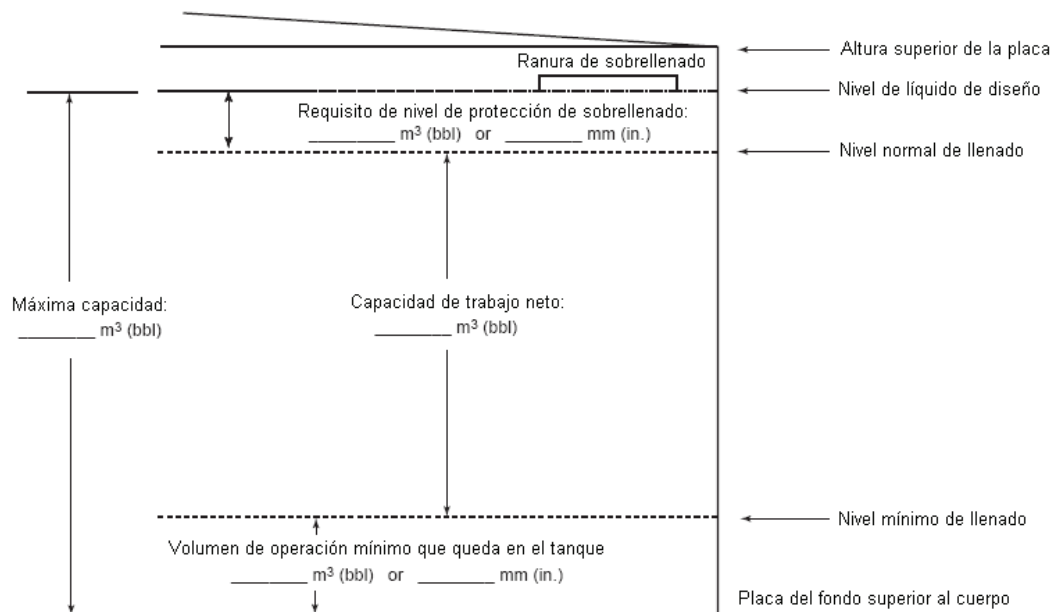


Figura 2. 3. Niveles y volúmenes de un tanque de almacenamiento según API 650

Fuente: Estándar API 650, 2007

Obtenido el valor de t_d y t_t , se escogerá el de valor mayor, y este será el espesor del primer anillo (parte inferior del tanque). El cálculo de los espesores de las láminas que conforman el segundo anillo y restantes se lo realiza con las mismas ecuaciones ya sea para la condición de diseño o prueba hidrostática, pero tomando en cuenta las nuevas alturas a utilizarse, que son la altura del tanque menos la altura del total de los anillos ya calculados.

2.2.2 MÉTODO DE PUNTO VARIABLE

Este procedimiento normalmente proporciona una reducción en los espesores de las planchas de cada anillo y el peso total de material, pero lo más importante es su potencial para permitir la construcción de tanques de mayor diámetro dentro de la limitación máxima de grosor de la plancha.²¹

Se usará siempre este método a menos que el comprador lo requiera y cuando la siguiente relación sea verdad:

$$\frac{L}{H} \leq \frac{1000}{6} \quad (2.4)$$

²¹ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-15.

Dónde:

- $L = (500Dt)^{0.5}$, en mm.
- D = Diámetro del tanque, en m.
- t = Espesor del anillo del fondo, calculado por el método de punto fijo en y excluyendo cualquier tipo corrosión admisible, en mm.
- H = Nivel de líquido máximo de diseño, en m, (Figura 2. 3).

El cálculo se inicia encontrando el espesor de la plancha que conforma el primer anillo con el método de punto fijo para las condiciones de diseño t_d y prueba hidrostática t_t , estas variables son remplazadas por las variables preliminares para la condición de diseño t_{pd} y la condición de prueba hidrostática t_{pt} respectivamente, y se las compara con los valores calculados con las ecuaciones (2.5) y (2.6) utilizadas en el método de punto variable; que son únicamente para encontrar el espesor de la plancha que conforman el primer anillo.²²

$$t_{1d} = \left(1.06 - \frac{0.0696 * D}{H} \sqrt{\frac{H * G}{S_d}} \right) \left(\frac{4.9 * H * D * G}{S_d} \right) + CA \quad (2.5)$$

$$t_{1t} = \left(1.06 - \frac{0.0696 * D}{H} \sqrt{\frac{H}{S_t}} \right) \left(\frac{4.9 * H * D}{S_t} \right) \quad (2.6)$$

Si los valores de t_{1d} y t_{1t} son menores a t_{pd} y t_{pt} , éstos serán los espesores t_1 de las láminas que conforman el primer anillo y se continúa con el cálculo de los espesores de las láminas que conforman el segundo anillo como se indica a continuación, caso contrario el espesor de las láminas que conforman el primer anillo serán los valores calculados por el método de punto fijo o de un pie.²³

Para el cálculo de los espesores que conforman el segundo anillo se calcula la siguiente relación:

$$\frac{h_1}{(rt_1)^{0.5}} \quad (2.7)$$

Dónde:

- h_1 = altura del anillo, en mm,
- r = radio nominal del tanque, en mm.

²² Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-15 y 5-16.

- t_1 = espesor de la plancha que conforma el primer anillo ya calculado, en mm. Posteriormente se considerará tres interacciones, para determinar el espesor del segundo anillo que se describe a continuación:

- 1) Si el valor de la relación de (2.7) es menor que o igual a 1.375, entonces el espesor de las láminas que conforman el primero y segundo anillo son iguales.²³

$$t_2 = t_1 \quad (2.8)$$

Dónde:

- t_2 = Espesor de la plancha que conforma el segundo anillo, en mm.
- 2) Si el valor de la relación de la ecuación (2.7) es mayor que o igual a 2.625, entonces el espesor de las láminas que conforman el segundo anillo es igual a t_{2a} , que es el valor de la tercera iteración del siguiente procedimiento:²⁴

- 1) Con las ecuaciones del método de punto fijo ya sea para la condición de diseño o prueba hidrostática y tomando en cuenta que la nueva altura a utilizarse es la altura del tanque menos la altura del primer anillo, se calcula un espesor (t_u), esto sirve para encontrar el siguiente factor K.

$$k = \frac{t_l}{t_u} \quad (2.9)$$

- 2) De donde t_l es el espesor de la plancha que conforma el primer anillo ya calculado, luego se calcula un factor C de la siguiente manera:

$$C = \frac{[K^{0.5}(K-1)]}{1+K^{0.5}} \quad (2.10)$$

- 3) Calculados estos dos factores, se procede a calcular las distancias X del punto de diseño variable, que debe ser calculado desde el fondo del anillo,

$$X_1 = 0.61(rt_u)^{0.5} + 3.84 * C * H \quad (2.11)$$

$$X_2 = 12 * C * H \quad (2.12)$$

$$X_3 = 1.22 * (rt_u)^{0.5} \quad (2.13)$$

²³ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-16.

- 4) El menor valor de (X1, X2, X3), se reemplaza en la siguiente ecuación ya sea que se utilice la condición de diseño t_{dx} o de prueba hidrostática t_{tx} :

$$t_{dx} = \frac{2.6 * D * \left(H - \frac{X}{12} \right) G}{S_d} + CA \quad (2.14)$$

$$t_{tx} = \frac{2.6 * D * \left(H - \frac{X}{12} \right)}{S_t} \quad (2.15)$$

- 5) Se vuelve a calcular el factor K en donde el valor de t_u es remplazado por el valor de t_{dx} o t_{tx} , y se continua con los cálculos de la misma forma ya mencionada anteriormente, esta iteración se la realiza tres veces, en donde el valor de t_{2x} son los valores de t_{dx} o t_{tx} , de la tercera iteración, obteniendo de este manera el espesor de las láminas que conforman el segundo anillo t_2 .
- 3) Si el valor de la relación de la ecuación (2.7) es mayor que 1.375 pero menor que 2.625, entonces el espesor t_2 de las láminas que conforman el segundo anillo se calcula con la siguiente fórmula:²⁴

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2.1 - \frac{h_1}{1.25(rt_1)^{0.5}} \right] \quad (2.16)$$

- 4) Para encontrar los espesores (t_3, t_4, \dots, t_n) que conformaran los correspondientes n anillos, se procede de la misma forma como para encontrar t_2 con la condición de que $h_1/(rt_1)^{0.5} \leq 2.625$, es decir, con la segunda interacción y de esta manera se obtienen los diferentes espesores que conforman el cuerpo del tanque.

2.3 ANILLOS DE REFUERZO

2.3.1 ANILLO SUPERIOR O ÁNGULO TOPE

Para determinar las dimensiones del ángulo tope apropiado, primero se determina las características geométricas que tendrá el área de compresión A, usando los

²⁴ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-16.

detalles constructivos especificados en el Anexo 2, en la Figura 2. 4 se describe los componentes de un área de compresión.

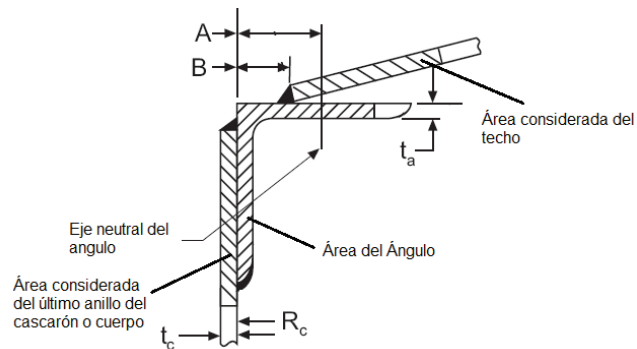


Figura 2. 4. Detalle de junta de compresión: Techo-ángulo-cuerpo

Fuente: el Autor

Con la ayuda de la Figura 2. 4, se definirá el área considerada del techo y cuerpo:

1) Área del Techo:

$$A_t = W_h * t_h \quad (2.17)$$

2) Área del cuerpo:

$$A_c = W_c * t_s \quad (2.18)$$

En el Anexo 2, se ilustra nueve posibles alternativas para juntas de compresión, de las cuales se seleccionará una para conformar el anillo superior o anillo de rigidez. Luego de calculadas el área del techo y la del cuerpo con las ecuaciones (2.17) y (2.18) respectivamente, se procede a calcular las siguientes áreas:

3) Área de compresión techo-cuerpo:

$$A_{tc} = A_t + A_c \quad (2.19)$$

4) Área de compresión real:

$$A_r = A_{tc} + A_a \quad (2.20)$$

Dónde:

A_a = Área del ángulo

En las ecuaciones indicadas anteriormente se detalla el área del techo y del último anillo del cuerpo del tanque en las proporciones indicadas, sin tomar en cuenta el área del ángulo tope, el Estándar API 650 en la subsección 5.10.2.6

define el área de compresión mínima para una junta frágil (techo-ángulo-cuerpo) mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{DL_s}{2\pi * F_y * \tan \theta} \quad (2.21)$$

Dónde:

- A = Área de la sección transversal mínima de la unión cuerpo-Angulo - techo (mm²) para techos soportados.
- DL_s = Peso total del cuerpo del tanque y cualquier armazón soportado por el cuerpo y techo, no se incluye el peso de las láminas del techo (N).
- θ = Ángulo entre el techo y un plano horizontal en la unión del techo al cuerpo del tanque (grados).
- F_y = Mínimo esfuerzo de fluencia de los materiales participantes (kPa).

Luego de calcular el valor de A con la ecuación (2.21), y el valor de A_{tc} con la ecuación (2.19), se realiza la resta de estos dos valores para obtener el valor aproximado del ángulo de compresión A_a a utilizar, con la ecuación (2.22).

$$A_a = A - A_{tc} \quad (2.22)$$

Esta diferencia es el área del ángulo tope, con este valor se busca en el manual de la AISC (Anexo 2, Figuras A2.2 – A2.5), tipo de perfil a usarse, si el área del ángulo tope es menor al área de ángulo tope indicado en la Tabla 2. 2, se debe seleccionar el tipo de ángulo tope de ésta tabla, que está en función del diámetro del tanque.

Tabla 2. 2. Ángulos recomendados con respecto al diámetro para tanques con techo cónico soportado

DIAMETRO DEL TANQUE (m)	ANGULO RECOMENDADO (mm)	SECCION (pulg) ²
D ≤ 11	50x50x5	0.751
11 ≤ D ≤ 18	50x50x6	0.938
D ≥ 18	75x75x10	2.11

Fuente: Estándar API 650, 2007

Se usa los detalles constructivos para los anillos de compresión en la unión cuerpo-techo, desde a hasta d, del Anexo 2 si el filete de soldadura entre las láminas del techo y en ángulo tope de refuerzo no excede de 5 mm (3/16 in), y si la pendiente del techo unido con el ángulo tope no excede 50 mm por cada 300 mm (2 in por cada 12 in), cuando el área de la sección transversal o de compresión de la unión techo-ángulo-cuerpo A_{tc} , es menor o igual que el valor calculado en la ecuación (2.21), ésta junta se considera frangible, la cual nos ayudara a evitar que exista rotura en las juntas de las paredes del tanque o la junta cuerpo-fondo del tanque, cuando exista un exceso de presión interna, produciéndose primero la rotura de la junta cuerpo - techo.

Se usa los detalles constructivos para los anillos de compresión cuerpo del tanque-techo, desde e hasta i, del anexo 2, si el filete de soldadura entre las láminas del techo y el ángulo tope de refuerzo es mayor que 5 mm (3/16 in), y si la pendiente del techo unido con el ángulo tope excede 50 mm por cada 300 mm (2 in por cada 12 in), cuando el área de la sección transversal o de compresión de la junta techo-cuerpo A_{tc} , es mayor que el valor calculado en la ecuación (2.21), o la soldadura de filete está especificada por ambos lados entonces deben proporcionarse sistemas de venteo de emergencia que estén en concordancia con API 2000.

2.3.1.1 Condiciones para presión interna menor o igual a 18 kPa (manométrica)

La presión interna se calcula con la siguiente expresión:²⁵

$$P = \frac{A_r * F_y * \tan \theta}{200 * D^2} + \frac{0.00127 * D_{LR}}{D^2} \quad (2.23)$$

Dónde:

- P = Presión interna de diseño (kPa).
- A_r = Área resistente a la fuerza compresiva, calculada de la figura del anexo 2 (mm²).
- F_y = Mínimo esfuerzo de fluencia de los materiales participantes (kPa).
- θ = Pendiente del techo, (placa ultima techo-horizontal del último anillo).

²⁵ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. F-1.

- D = Diámetro nominal del tanque, (m).
- D_{LR} = Peso nominal de las planchas del techo más cualquier estructura adjunta (N).

La presión interna calculada con la fórmula (2.23), puede ser igual o menor a 18 KPA (2.5PSI) pero además no debe ser superior a la presión máxima para cada diseño de tanque, calculado con la siguiente expresión:²⁶

$$P_{\max} = \frac{0.000849DL_S}{D^2} + \frac{0.00127D_{LR}}{D^2} - \frac{0.00153M_w}{D^3} \quad (2.24)$$

Dónde:

- P_{\max} = Máxima presión de diseño (kPa).
- DL_S = Peso total del cuerpo del tanque y cualquier armazón soportado por el cuerpo y techo, no se incluye el peso de las láminas del techo, (N).
- M_w = Momento de carga de viento, este debe ser especificado por el cliente, debe ser calculado o en su defecto ser asumido como nulo $M=0$. (N-m).

De acuerdo a los criterios establecidos en las fórmulas (2.23) y (2.24) se establece las siguientes restricciones de diseño:

- 1) Si la presión interna acumulada por los gases multiplicada por la sección transversal del cuerpo del tanque, es menor que el peso de las placas del techo, entonces el área de compresión será calculada con las ecuaciones (2.17), (2.18), (2.19), (2.20), (2.21), (2.22). anteriormente descritas.
- 2) Si la presión interna multiplicada por la sección transversal del tanque, es mayor que el peso total del cuerpo del tanque y cualquier armazón soportado por el cuerpo y techo, entonces el área de compresión mínima de la ecuación (2.21) se reemplaza con la siguiente expresión:

$$A = \frac{200 * D^2 \left(P_i - \frac{0.00127 * D_{LR}}{D^2} \right)}{F_y * \tan \theta} \quad (2.25)$$

- A = área de compresión total requerida para la unión techo - cuerpo (mm^2).

²⁶ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. F-4.

- P_i = Presión interna de diseño (kPa).

El resto del procedimiento de cálculo del área del ángulo A_a , es análogo al descrito anteriormente, se recurrirá al manual de AISC, o a la Tabla 2. 2, según convenga.

- 3) Si la presión interna, es menor o igual a 18 kPa (2.5 psi), pero mayor a la presión máxima permitida calculada con la ecuación (2.24), entonces la selección del ángulo de rigidez será, de acuerdo a la Tabla 2. 2.
- 4) Si la presión interna, es mayor a 18 kPa (2.5 psi), estos tanques ya no cumplen con las restricciones del API 650, por lo tanto no se abarca en este proyecto, se recomienda, cambiar las condiciones del diseño o diseñar estos recipientes con el estándar API 620.

En el anexo 2 (Figura A2.6) se indica el diagrama de flujo recomendado por la API 650 para realizar el diseño correcto para presión interna.

2.3.2 VIGAS INTERMEDIAS

De acuerdo al Estándar API 650 subsección 5.9.7, para saber si se debe o no usar vigas intermedias primero se calcula la altura máxima no rigidizada con la siguiente ecuación:²⁷

$$H_1 = 9.47 * t \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 \left(\frac{190}{V}\right)^2} \quad (2.26)$$

Dónde:

- H_1 = Distancia vertical, en m., entre la viga intermedia de viento y el ángulo de tope del cuerpo o la viga de tope de viento,
- t = Espesor del último anillo en el tope del tanque, a menos que se especifique otra cosa (mm),
- D = Diámetro nominal del tanque (m).
- V = Velocidad de diseño del viento (km/h).

Luego, se procede a calcular la altura transformada de cada anillo utilizando la ecuación:

²⁷ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-67.

$$W_{tr} = W \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5} \quad (2.27)$$

Dónde:

- W_{tr} = Ancho transpuesto de cada anillo, mm.
- W = Ancho actual de cada anillo, mm.
- $t_{uniforme}$ = Espesor del anillo del tope, mm.
- t_{actual} = Espesor del anillo cuyo ancho transpuesto se calcula, mm.

Consecuentemente se suman estos anchos transpuestos. La suma de estos anchos dará la altura transformada del cuerpo (H_t).

$$H_t = W_{tr} + W \quad (2.28)$$

Dónde:

- H_t = es la altura transformada del cuerpo.

Si la altura transformada del cuerpo H_t , es mayor que la máxima altura no rigidizada H_1 entonces se necesita una viga intermedia, y esta se podría localizar en la mitad de la altura transformada del cuerpo para que exista igual estabilidad en la parte superior e inferior con respecto al sitio donde se encuentra la viga.²⁸

Una segunda viga intermedia se colocará, si la mitad de la altura transformada $H_t/2$ del cuerpo, excede la altura rigidizada H_1 . De esta manera se reducirá la altura no rigidizada del cuerpo.

La distancia entre, la junta de la viga intermedia con la superficie del cuerpo del tanque y la unión horizontal o perimetral de los anillos del cuerpo no deben ser menor a 150 mm o (6 in), preferentemente la viga debe ubicarse 150 mm (6 in) debajo de la junta horizontal.²⁹

El requerimiento mínimo para el módulo de la sección de la viga intermedia contra viento, se debe determinar con la siguiente ecuación.

$$Z = \frac{D^2 * H_1}{17} * \left(\frac{V}{190}\right)^2 \quad (2.29)$$

Dónde:

²⁸ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-68.

- Z = Módulo de la sección mínima (cm^3)
- D = Diámetro nominal del tanque (m)
- H_1 = Altura entre la viga tope del tanque y la viga intermedia (m)
- V = Velocidad de diseño del viento (km/h)

Con el valor del módulo de la sección Z , el espesor del anillo en donde se localiza el ángulo intermedio y el tipo de ángulo intermedio a usarse, de la figura A3.1 y posteriormente con estos datos se selecciona el ángulo óptimo de la tabla A3.1 del anexo 3 Juntas Típicas, Módulos de Sección y Ángulos recomendados para vigas Intermedias-Cuerpo.

2.3.3 CARGAS DE VIENTO

Las cargas aplicadas por la velocidad del viento ejercen una presión sobre la superficie del tanque y techo, debido a este fenómeno se debe verificar que el tanque permanezca estable ante el volteo provocado por esta presión, que para velocidades de 190 km/h (120 mph) se tiene los siguientes valores:²⁹

- 0.86 kPa (18 lbf/ft²) sobre áreas proyectadas de superficies cilíndricas y,
- 1.44 kPa (30 lbf/ft²), sobre áreas proyectadas de superficies cónicas y domos.

El mínimo tamaño de los ángulos que se pueden usar como componentes de anillo de refuerzo intermedio debe ser del siguiente tipo 64 x 64 x 6.4 mm (2 ½ x 2 ½ x ¼ in).

Los tanques no necesitarán anclajes por viento, si cumplen los siguientes criterios:

$$0.6M_w + M_{Pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} \quad (2.30)$$

$$M_w + 0.4M_{Pi} < \frac{M_{DL} + M_F}{2} \quad (2.31)$$

Dónde:

- M_{Pi} = Momento respecto a la junta cuerpo-fondo, debido a la presión interna de diseño.

²⁹ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-6.

- M_W = Momento resistente al volteo respecto a la junta cuerpo-fondo, debido a la presión del viento.
- M_{DL} = Momento resistente al volteo respecto a la junta cuerpo-fondo, debido al peso del cuerpo, y el peso del techo, soportado por el cuerpo.
- M_F = Momento respecto a la junta cuerpo-fondo, debido al líquido contenido en el tanque, y equivalente.

2.3.3.1 Cálculo del M_{Pi}

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$M_{Pi} = \left(\frac{\pi * D^2 * P_i}{4} \right) * \left(\frac{D}{2} \right) * \left(\frac{V}{120} \right)^2 \quad (2.32)$$

Dónde:

- M_{Pi} = Momento respecto a la junta cuerpo-fondo, debido a la presión interna de diseño, en N-m (lb-pie).
- D = Diámetro del tanque, en m (pies).
- P_i = Presión interna del tanque, en kPa (lb/pie²).

2.3.3.2 Cálculo del M_W

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$M_W = M_{W(cuerpo)} + M_{W(techo)} \quad (2.33)$$

Donde:

- $M_{W(cuerpo)}$ = Momento del cuerpo debido a la presión del viento, se calcula con la siguiente fórmula, en N-m:

$$M_{W(cuerpo)} = \left(\frac{D * H^2}{2} \right) * \left(\frac{V}{120} \right)^2 * 0.86 \quad (2.34)$$

- $M_{W(techo)}$ = Momento del techo debido a la presión del viento, se calcula con la siguiente fórmula, en N-m:

$$M_{W(techo)} = \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right) * \left(\frac{V}{120} \right)^2 * \left(\frac{D}{2} \right) * 1.44 \quad (2.35)$$

2.3.3.3 Cálculo del M_{DL}

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_{DL} = (W_{cuerpo} + W_{techo}) * \frac{D}{2} \quad (2.36)$$

Donde:

- W_{cuerpo} = Peso del cuerpo del tanque, en N.
- W_{techo} = Peso del techo del tanque, en N.
- D = Diámetro del tanque, en m.

2.3.3.4 Cálculo de M_F

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$M_F = (\pi * w_L * D) * \frac{D}{2} \quad (2.37)$$

Dónde:

- w_L = Peso correspondiente a la cantidad de líquido en un anillo con gravedad específica 0.7, y una altura correspondiente a la mitad del líquido de diseño H (N/m).

$$w_L = 59 * t_b * \sqrt{F_{by} * H} \quad (2.38)$$

- t_b = espesor de las placas del fondo del tanque. Este espesor no debe exceder de $\frac{1}{4}$ pulg o el espesor del primer anillo (menos el espesor de corrosión), en mm.
- F_{by} = mínimo esfuerzo de fluencia para el fondo del tanque MPa.
- H = altura del tanque m.
- D = Diámetro del tanque (m).

2.3.4 CARGAS Y DISEÑO POR SISMO

El territorio ecuatoriano está prácticamente surcado en su totalidad por fallas geológicas, entre las cuales unas son más activas que otras, es decir que la cantidad, frecuencia y magnitud de los eventos generados por una falla geológica determinada es variable, lo cual hace que ciertas regiones sean sísmicamente más activas que otras.

Los movimientos telúricos son un tema muy especial dentro del diseño de tanques verticales de almacenamiento, sobre todo en zonas con un alto grado de sismicidad.

Para el diseño se toman en cuenta dos reacciones que se producen sobre el tanque, las cuales son:³⁰

- a) Cuando la alta frecuencia relativa amplificada provoca un movimiento lateral del terreno sobre el que está situado el tanque, posteriormente la cantidad de líquido que el recipiente contiene, se mueve al unísono con el cuerpo del tanque.
- b) Cuando la baja frecuencia relativa amplificada provoca un movimiento de la masa del líquido contenido, ocasionando oleaje dentro del tanque.

El movimiento lateral de las masas, genera fuerzas que actúan en el centro de gravedad del tanque, ocasionando la inestabilidad del conjunto, que multiplicado por el brazo de palanca respecto del fondo, originan un momento de volcado, produciendo una compresión longitudinal, provocando la deformación del cuerpo por lo que el tanque será diseñado para resistir este fenómeno.³¹

2.3.4.1 Cálculo del Momento de Volcado (M)

Provocado por las fuerzas inerciales que se generan entre la estructura y el suelo, a través de la cimentación o base de tierra, esta ecuación tiene como objetivo cubrir por medio de factores las peores condiciones que podrían presentarse.³¹

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i * (W_i * X_i + W_s * X_s + W_r * X_r)]^2 + [A_c * (W_c * X_c)]^2} \quad (2.39)$$

Donde:

- M = Momento de volteo aplicado al fondo del cuerpo del tanque en N-m.
- El resto de factores se describirán a continuación.

En el anexo E del estándar API 650, se ubica la zona sísmica para los EEUU y el Ecuador según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (revisar anexo 4 y 5 Factor de Zona Sísmica).

³⁰ Inglesa. (2004). Diseño de Tanques de Almacenamiento. México: Inglesa. Pág. 95.

³¹ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. E-16.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) define seis tipos de perfil de suelo los cuales se presentan en la Tabla 2. 3. Los parámetros utilizados en la clasificación, son los correspondientes a los 30 m superiores del perfil para los perfiles tipo A, B, C, D y E. Aquellos perfiles que tengan estratos claramente diferenciables deben subdividirse. Para el perfil tipo F se aplican otros criterios.

Tabla 2. 3. Clasificación de los perfiles de suelo

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ Kpa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $S_u \geq 50$ Kpa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²)
F	Los perfiles de suelo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases: F1 - Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F2 - Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F3 - Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con índice de Plasticidad $IP > 75$) F4 - Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 30$ m) F5 - Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de onda de corte. F6 - Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Fuente: NEC, 2013

Además, se va a necesitar ciertos factores que se especifican en el estándar API 650 y que se detallan a continuación:

- S_p = Aceleración sísmica pico en la tierra, tomará el valor de 0.230 g.
- R_w = Factores de Modificación de Respuesta, existen dos, el factor de modificación de respuesta impulsivo (R_{wi}) y el factor de modificación de respuesta convectivo (R_{wc}); estos valores deberán ser menores o iguales a los de la Tabla 2. 4, dependiendo del tipo de anclaje que se utilice para el tanque:

Tabla 2. 4. Factores de modificación de respuesta para métodos ASD

Sistema de Anclaje	R_{wi} (Impulsivo)	R_{wc} (Convectivo)
Auto anclaje	3.5	2
Anclaje mecánico	4	2

Fuente: Estándar API 650, 2007

- S_s = El 5% del Parámetro de Amortiguamiento de Aceleración Espectral de Respuesta para un Periodo de 0.2 seg.³²

$$S_s = 2.5 * S_p \quad (2.40)$$

- S_1 = El 5% del Parámetro de Amortiguamiento de Aceleración Espectral de Respuesta para un Periodo de 1.0 seg.³³

$$S_1 = 1.25 * S_p \quad (2.41)$$

2.3.4.1.1 Factores de Momento de Volcado

- A_i = Parámetro de Aceleración Espectral Impulsiva, para calcularlo se necesita la siguiente ecuación.³³

$$A_i = 2.5 * Q * F_a * S_0 * \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \quad (2.42)$$

Este valor debe ser mayor o igual a 0.007.

- Q = Factor de escala, para el cual se asume el valor de 1 ya que en el estándar API 650 no establece un valor para Ecuador.
- F_a = Coeficiente de aceleración base para un periodo de 0.2 seg, el cual se determina con la Tabla 2. 5:³³

³² Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. E-2 – E-5.

Tabla 2. 5. Mapeado máximo considerado para aceleraciones sísmicas en periodos cortos

Clase de Sitio	Mapeado Máximo Considerado Aceleraciones Sísmicas de Respuesta Espectral en Periodos Cortos, F_a				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1	1	1	1	1
C	1.2	1.2	1.1	1	1
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	a	a	a	a	a
a: Se requiere un análisis geotécnico y un análisis dinámico					

Fuente: Estándar API 650, 2007

- Para encontrar el valor de F_a primero se debe calcular el valor de S_s con la ecuación (2.40), y determinar la clase de sitio en la que se va a trabajar. Luego, con la ayuda de la interpolación se encuentra el valor de F_a deseado.
- S_0 = Parámetro de aceleración de respuesta espectral a cero segundos.³³

$$S_0 = 0.4 * S_s \quad (2.43)$$

- I = Factor de Importancia, para obtener este valor se utilizará la tabla E-5 del estándar API 650 en la página E-13 o la Tabla 2. 6:

Tabla 2. 6. Factor de Importancia (I) y clasificación de grupo de uso sísmico

NÚMERO	CATEGORIA	TIPO DE USO, DESTINO E IMPORTANCIA	FACTOR
1	Edificaciones Esenciales y/o Peliogrosas	Hospitales, clínicas, centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehiculos y aviones que atienden emergencias. Torres de Control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanque u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
2	Estructuras de Ocupación Esencial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de 300 personas. Todas las estructuras que albergan más de 5000 personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente.	1.3

Fuente: NEC, 2013

Tabla 2. 6. Factor de Importancia (I) y clasificación de grupo de uso sísmico (continuación...)

NÚMERO	CATEGORIA	TIPO DE USO, DESTINO E IMPORTANCIA	FACTOR
3	Otras Estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores.	1

Fuente: NEC, 2013

- R_{wi} = factor de modificación de respuesta impulsivo (R_{wi}), el cual se lo determina con la Tabla 2. 4.
- A_c = Parámetro de aceleración espectral convectiva, para calcularlo se necesita las siguiente ecuación:³³

- Si $T_c \leq T_L$,

$$A_c = 2.5 * K * Q * F_a * S_0 * \left(\frac{T_s}{T_c} \right) * \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad (2.44)$$

- Si $T_c > T_L$,

$$A_c = 2.5 * K * Q * F_a * S_0 * \left(\frac{T_s * T_L}{T_c^2} \right) * \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad (2.45)$$

- K = Parámetro para ajustar la aceleración espectral, tendrá un valor igual a 1.5 al menos que se indique lo contrario.
- Q = Parámetro Factor de escala, para el cual se asume el valor de 1 ya que en el estándar API 650 no establece un valor para Ecuador.
- F_a = Coeficiente de aceleración base para un periodo de 0.2 seg, el cual se determina con la Tabla 2. 5.
- S_0 = Parámetro de aceleración de respuesta espectral a cero segundos, se calcula con la ecuación (2.43).
- T_s = Factor T_s .

$$T_s = \frac{F_v * S_1}{F_a * S_s} \quad (2.46)$$

³³ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. E-12.

- F_v = Coeficiente de aceleración base para un periodo de 1 seg, el cual se determina con la Tabla 2. 7.

Tabla 2. 7. Mapeado máximo considerado para aceleraciones sísmicas en periodos de 1 segundo

Clase de Sitio	Mapeado Máximo Considerado Aceleraciones Sísmicas de Respuesta Espectral en Periodos de 1 seg, F_v				
	$S1 \leq 0.1$	$S1 = 0.20$	$S1 = 0.30$	$S1 = 0.40$	$S1 \geq 0.50$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1	1	1	1	1
C	1.2	1.2	1.1	1	1
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	a	a	a	a	a

a: Se requiere un análisis geotécnico y un análisis dinámico

Fuente: Estándar API 650, 2007

- T_c = Valor del periodo tiempo que demora un punto del borde del tanque, en regresar al punto inicial de partida puede ser calculado con la siguiente expresión:³⁴

$$T_c = K_s * \sqrt{D} \quad (2.47)$$

Dónde: K_s , puede obtenerse de dos maneras:

1. A través de la Figura 2. 5 en donde se ingresa con el valor D/H donde D , es el diámetro del tanque y H es la altura del tanque.

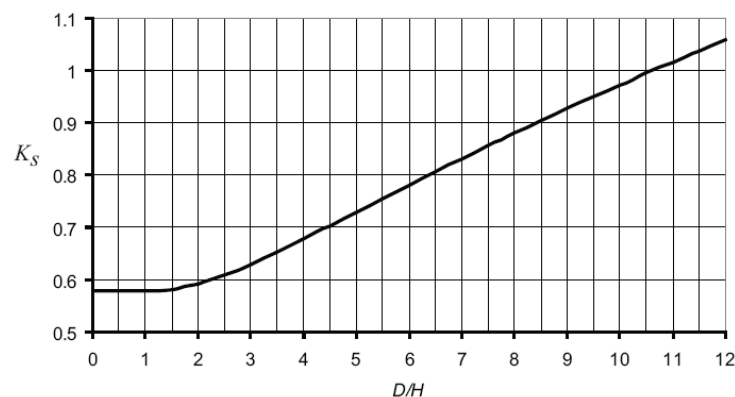


Figura 2. 5. Factor K_s , D/H vs K_s , para cálculo del periodo T

Fuente: Estándar API 650, 2007

³⁴ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. E-10.

2. O a través de la ecuación que gobierna esta curva:

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * H}{D}\right)}} \quad (2.48)$$

- T_L = Periodo de transición de dependencias regionales para un periodo de movimiento de tierras, en el estándar API 650 detalla que para regiones fuera de USA este valor se tomará como 4 segundos.
- I = Factor de Importancia, para obtener este valor se utilizará la Tabla 2. 6.
- R_{wc} = factor de modificación de respuesta convectiva (R_{wc}), el cual se lo determina con la Tabla 2. 4.
- W_P = Peso total del contenido del tanque, basado en la gravedad específica de diseño del producto. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$W_P = \frac{\pi * D^2}{4} * H * G * d_{prod} \quad (2.49)$$

D = Diámetro del tanque, en m.

H = Altura del tanque, en m.

G = Gravedad específica.

d_{prod} = Densidad del producto, kg/m^3 .

W_P = Peso total del contenido del tanque, N.

- W_i = Peso efectivo impulsivo, para calcularlo depende de la relación D/H , es decir:
 - Si, $D/H \geq 1.333$

$$W_i = \frac{\tanh\left(0.866 * \frac{D}{H}\right)}{0.866 * \frac{D}{H}} * W_P \quad (2.50)$$

- Si, $D/H < 1.333$

$$W_i = \left[1 - 0.218 * \frac{D}{H}\right] * W_P \quad (2.51)$$

- W_s = Peso total de la estructura del tanque y sus accesorios, se calcula con la siguiente ecuación.

$$W_s = W_{cuerpo} + W_{estructura} + W_{ángulos} \quad (2.52)$$

- W_r = Peso total del techo del tanque, es el peso del techo del tanque incluido todos sus accesorios.

$$W_r = W_{ángulos} + W_{láminas} + W_{correas} \quad (2.53)$$

- W_c = Peso efectivo convectivo, se calcula con la siguiente fórmula:

$$W_c = 0.230 * \frac{D}{H} * \tanh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right) * W_p \quad (2.54)$$

- X_i = Distancia para fuerzas impulsivas, es la altura medida desde el fondo del tanque, al centro de acción de la fuerza sísmica lateral, respecto a la fuerza impulsiva del líquido:

- Si, $D/H \geq 1.333$

$$X_i = 0.375 * H \quad (2.55)$$

- Si, $D/H < 1.333$

$$X_i = \left[0.5 - 0.094 * \frac{D}{H}\right] * H \quad (2.56)$$

- X_s = Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del cuerpo del tanque:

$$X_s = \frac{H}{2} \quad (2.57)$$

- X_r = Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del techo:

$$X_r = H + CG_T \quad (2.58)$$

- X_c = Distancia para fuerzas convectivas, Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de acción de la fuerza sísmica lateral, respecto a la fuerza convectiva del líquido:

$$X_c = \left[1.0 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67 * H}{D} \sinh\left(\frac{3.67 * H}{D}\right)} \right] * H \quad (2.59)$$

2.3.5 RELACIÓN DE ANCLAJE

Se requiere calcular la fuerza resistente debido al contenido del tanque, por unidad de circunferencia del cuerpo cilíndrico, usada para resistir el momento al volteo, se utiliza la siguiente formula, según la API 650:³⁶

$$w_a = 99 * t_a * \sqrt{F_y * H * G_e} \leq 201.1 * H * D * G_e \quad (2.60)$$

Dónde:

- t_a = espesor placa anular menos el espesor de corrosión para el fondo del tanque, en mm.
- F_y = Esfuerzo de fluencia mínimo para plancha anular, en kPa.
- G_e = Gravedad específica efectiva, incluido el efecto sísmico vertical.

$$G_e = G * (1 - 0.4 * A_v) \quad (2.61)$$

- ✓ G = Gravedad específica.
- ✓ A_v = Coeficiente de aceleración vertical.
- H = altura del tanque, en m.

Según la API 650, la relación de anclaje (J) viene dada por la siguiente ecuación:³⁵

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 [w_t * (1 - 0.4 * A_v) + w_a - 0.4 * w_{int}]} \quad (2.62)$$

Dónde:

- M_{rw} = Momento de volcado, se calcula con la ecuación (2.39).
- W_t = Peso del cuerpo del tanque y el techo soportado en el cuerpo y se calcula con la siguiente ecuación:

$$w_t = \frac{W_s}{\pi * D} + w_{rs} \quad (2.63)$$

Dónde:

- ✓ W_s = Peso total de la estructura del tanque y sus accesorios (2.52).

³⁵ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. E-17 – E-18.

- ✓ w_{rs} = Cargas sobre el techo que actúan sobre el cuerpo, incluyendo el 10% de la carga de nieve, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$w_{rs} = \frac{W_{techo} + W_{estructura}}{2 * \pi * D} \quad (2.64)$$

- w_a = fuerza resistente debido al contenido del tanque, por unidad de circunferencia del cuerpo cilíndrico, se calcula con la ecuación (2.60).
- w_{int} = elevación debida a la presión del producto, se calcula con la siguiente fórmula.

$$w_{int} = \pi * \frac{D^2}{4} * P_i \quad (2.65)$$

En la Tabla 2. 8 se puede identificar los valores de la relación de anclaje (J) para saber si se debe o no anclar al tanque mecánicamente.

Tabla 2. 8. Relación de anclaje

RELACIÓN DE ANCLAJE	CRITERIO
$J \leq 0.785$	El tanque está auto anclado
$0.785 < J \leq 1.54$	El tanque tiende a elevarse pero el tanque se encuentra estable para el diseño de cargas provistas para la compresión del cuerpo. El tanque está auto anclado
$J > 1.54$	El tanque no es estable y no puede ser auto anclado a la carga de diseño. Modificar la plancha anular si $L < 0.035D$ o añadir anclaje mecánico.

Fuente: Estándar API 650, 2007

2.3.5.1 Requerimientos de Plancha Anular

Antes de verificar la estabilidad por sismo es importante asegurar que el ancho de la plancha anular sea la correcta.

Según la API 650, para el espesor de la plancha anular (t_a) que está ubicada bajo el cuerpo del tanque para esto se recurre a la siguiente fórmula:³⁶

$$L_b = 0.0291 * t_b * \sqrt{\frac{F_{by}}{H}}; 450mm \leq L_b \leq 0.035D; (m) \quad (2.66)$$

³⁶ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. E-18.

2.3.5.2 Compresión del Cuerpo

Para que el tanque pueda ser anclado mecánicamente, el máximo esfuerzo de compresión que soporta el cuerpo del tanque se determina con la siguiente fórmula, según la API 650:

$$\sigma_c = \left[w_t * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * M_{rw}}{D^2} \right] * \frac{1}{1000 * t_s} \quad (2.67)$$

Donde t_s es el espesor de la planchas del fondo del tanque menos el espesor de corrosión permitida en mm .

Este esfuerzo de compresión debe ser menor que el esfuerzo permisible F_c el cual se determina con la siguiente ecuación, según la API 650:

- Si $GHD^2/t^2 \geq 44$

$$F_c = \frac{83 * t_s}{D} \quad (2.68)$$

- Si $GHD^2/t^2 < 44$

$$F_c = \frac{83 * t_s}{2.5 * D} + 7.5 * \sqrt{G * H} < 0.5 * F_{ty} \quad (2.69)$$

2.3.6 DISEÑO DE ANCLAJE

Los pernos de anclaje están dimensionados para proporcionar la resistencia mínima de anclaje, la carga de diseño por volteo debido a carga sísmica, este valor se determina con la siguiente fórmula, según la API 650:

$$w_{AB} = \left[\frac{1.273 * M_{rw}}{D^2} - w_t * (1 - 0.4 * A_v) \right] + w_{int} \quad (2.70)$$

2.3.6.1 Pernos de Anclaje

El API 650 da las siguientes recomendaciones:³⁷

- El espacio entre los pernos no debe exceder 3m (10 ft), entonces el número mínimo de pernos de anclaje se da con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\pi * D}{3} \quad (2.71)$$

³⁷ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-78.

El esfuerzo a la tensión en los pernos de anclaje es $F_y=0.8F_{ty}$.

- La carga sísmica de diseño para un perno de anclaje, viene dada por la relación:

$$P_{AB} = w_{AB} * \left(\frac{\pi * D}{n} \right) \quad (2.72)$$

- La sección transversal del perno A_b , viene dada por la siguiente ecuación:

$$A_b = \frac{P_{AB}}{F_y} \quad (2.73)$$

- El diámetro de raíz del perno se da con la ecuación:

$$d_r = \sqrt{\frac{4 * A_b}{\pi}} \quad (2.74)$$

- El valor del esfuerzo a la tensión de cada perno de anclaje, es determinado por:

$$\sigma_b = \frac{w_{AB}}{n * A_b} \quad (2.75)$$

CAPITULO 3

3 DISEÑO INTERNO Y DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TANQUE DE LAVADO

Este capítulo comprende el diseño del proceso de separación, para poder dimensionar los deflectores internos y el tanque, ya que, esto es lo primero que se realiza para poder realizar el diseño completo del tanque de lavado. Con respecto a determinar las dimensiones del tanque, se realiza calculando la longitud real de separación, la cual se la obtiene mediante el análisis que se hace del proceso y con la cual se puede calcular la altura del tanque, conociendo el dato inicial de capacidad. Luego, con la misma longitud de separación y la altura del tanque se puede dimensionar los deflectores internos y calcular el tipo de perfil a utilizarse.

Además, se estudia el diseño de la estructura soportante del tanque, la manera adecuada de seleccionar perfiles estructurales, para columna central, correas, base de columna central y cartelas de acuerdo a las dimensiones y las cargas que soporta el mismo.

3.1 DISEÑO INTERNO DEL TANQUE DE LAVADO

3.1.1 PROCESO DE DISEÑO GENERAL

El tamaño de un tratador es necesario para determinar el diámetro (d), la longitud o altura de la sección de coalescencia (L_{eff} o h que se verán más adelante, en esta misma sección), y la temperatura de tratamiento. Estas variables son interdependientes, y no es posible llegar a una solución única. El ingeniero de diseño debe jugar con el costo que implica aumentar la geometría y con los ahorros de la reducción en la temperatura de tratamiento.³⁸

Las ecuaciones que se presentarán a continuación, proporcionan herramientas para llegar a esta solución de compromiso. Sin embargo, debido a la naturaleza empírica, los criterios generales de ingeniería deben ser utilizados en la selección del tamaño del tanque de lavado.

³⁸ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 70.

Para realizar el dimensionamiento del tanque se realiza el siguiente proceso:

1. Escoger una temperatura de tratamiento.
Este dato puede ser proporcionado por el cliente o asumido por el ingeniero de diseño, de acuerdo a datos experimentales o experiencia.
2. Determinar la entrada de calor requerida con la ecuación (1.4) del Capítulo 1.
3. Determinar la viscosidad del crudo para la temperatura de tratamiento escogida o dada, se lo puede hacer utilizando la Figura A6.1 del Anexo 6.
4. Calcular el mínimo tamaño de las gotas de diseño, que deben ser separadas de acuerdo a datos experimentales, o con procedimiento que se cita a continuación:

Con el fin de desarrollar el diseño del proceso y dimensionamiento de un tanque de lavado, saber o determinar el tamaño de la gota de agua que se utiliza para lograr un corte de salida de agua o BS&W es muy importante. Como se mencionó previamente, sería extremadamente raro tener los datos de laboratorio de la distribución del tamaño de gota para una emulsión dada, cuando entra en la sección de coalescencia del tratador. Cualitativamente se esperaría que el tamaño de gota mínimo que debe ser retirado por un corte de agua dado que, (1) aumentan con el tiempo de retención en la sección de coalescencia, (2) aumentan con la temperatura, conduciendo a más colisiones de pequeña gotitas, y (3) aumentar la viscosidad del crudo, que tiende a inhibir la formación de pequeñas gotas del cizallamiento que se produce en el sistema.³⁹

Suponiendo que el tamaño mínimo requerido de gotas que se necesitan, está en función de la viscosidad del crudo, las ecuaciones se han desarrollado para correlacionar el tamaño de gota y la viscosidad del crudo. De lo cual se obtienen las siguientes ecuaciones.³⁸

³⁹ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 67.

- El diámetro de la gota de agua para un corte de 1% para una viscosidad del crudo μ_o menor a 80 cp se determina con la siguiente ecuación:

$$d_{m1\%} = 200\mu^{0.25}, \mu_o < 80cp, \quad (3.1)$$

- Si la viscosidad del crudo comprende los valores entre 3 cp y 80 cp, el diámetro de la gota de agua a ser separada para un corte de 1% es:

$$d_{m1\%} = 170\mu^{0.4}, 3cp < \mu_o < 80cp, \quad (3.2)$$

Donde,

- $d_{m1\%}$ = diámetro de la gota de agua que se liquidará a partir del aceite, de alcanzar el 1% de corte de agua,
- μ_o = viscosidad del crudo, cp,

Entonces, para poder calcular el diámetro de la gota de agua para un corte dado, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{d_m}{d_{m1\%}} = W_c^{0.33}, \quad (3.3)$$

Donde,

- d_m = Diámetro de la gota de agua que se separará a partir del crudo, de lograr un corte de agua dado (W_c), μm .
- W_c = corte de agua o BS&W, %.

Hay que destacar que las ecuaciones anteriores se deben utilizar sólo a la ausencia de otros datos y experiencia. Estas relaciones propuestas se basan sólo en los limitados datos experimentales.⁴⁰

5. Calcular varias combinaciones de w y L_{eff} utilizando ecuación (3.4) para sedimentación.

En los tanques de lavado con baffles internos que utilizan un flujo horizontal para la separación, las gotas de agua se asientan perpendicularmente al flujo

⁴⁰ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 68.

de aceite. Al establecer el tiempo de retención de crudo igual al tiempo de asentamiento de agua, se puede usar la siguiente ecuación:⁴¹

$$wL_{eff} = 800 \left(\frac{Q_o \mu_o}{(\Delta SG) d_m^2} \right), \quad (3.4)$$

Donde

- L_{eff} = longitud efectiva para la separación, (m),
- w = ancho efectivo del canal de flujo, (mm).

La longitud efectiva es normalmente 75% de la longitud de separación disponible. Por ejemplo, en la Figura 3. 1 la longitud efectiva es 75% de la suma de L1 a L4. El ancho efectivo es de aproximadamente 80% del ancho real del canal.

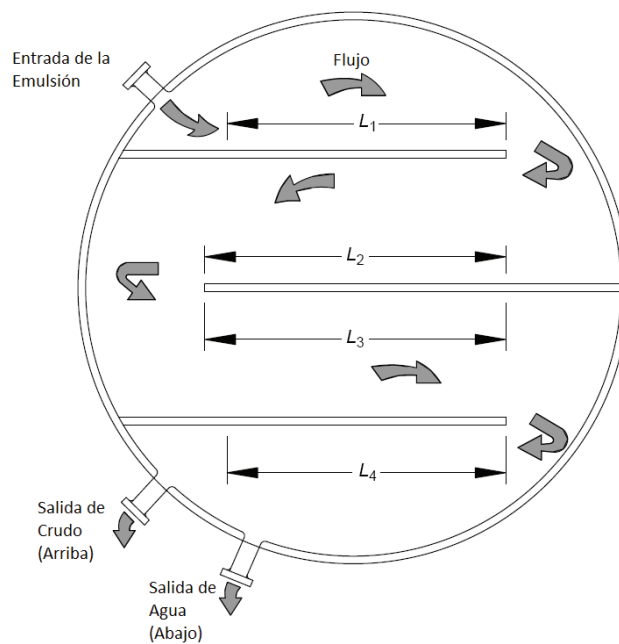


Figura 3. 1. Vista de planta de un tanque de lavado con flujo horizontal con baffles

Fuente: Stewart y Arnold, 2009

6. Para cada combinación de w y L_{eff} calculado en el punto 5, calcular la h necesaria para el tiempo de retención especificado utilizando la ecuación (3.5).

El crudo se debe mantener a temperatura durante un período específico y tiempo para permitir que desemulsione la emulsión de agua en crudo, este

⁴¹ Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 64.

dato lo proporciona generalmente el cliente. El tiempo de retención en la sección de coalescencia-sedimentación de un tratador es el volumen de la sección de coalescencia-sedimentación dividido por el caudal de crudo. El volumen de la sección de coalescencia-sedimentación es una función del diámetro del recipiente y la altura de la sección de coalescencia.

La posibilidad de un cortocircuito en los tanques elevados es grande. Por lo tanto, se adopta la hipótesis de que el límite de altura para tener en cuenta en el cálculo del tiempo de retención es de 50% el ancho de los canales de flujo. Proporcionar mayores canales de flujo no aumenta el tiempo de retención eficaz ni aumenta la capacidad de separar las gotas de agua del crudo.⁴²

$$hwL_{\text{eff}} = 0.56(t_r)_o Q_o, \quad (3.5)$$

Donde

- h = altura efectiva del canal de flujo, en mm.

7. Seleccionar una combinación de w y L_{eff} para que la h calculada sea menor que la mitad del ancho de flujo.
8. Una vez determinado el ancho de flujo w y la longitud efectiva L_{eff} se procede a calcular el diámetro del tanque. Esto se explicará mediante un ejemplo porque se utilizará un método donde se utilizará más la lógica que fórmulas matemáticas.

Se asumen los siguientes datos:

- $L_{\text{eff}} = 36$ m.
- $w = 2000$ mm.

En el punto 5 se indica que la longitud efectiva L_{eff} es el 75% de la longitud real de separación L_{real} , y que el ancho de flujo efectivo w es el 80% del ancho de flujo real w_{real} .

Entonces:

- $L_{\text{real}} = 48$ m.

⁴² Stewart, M. y Arnold, K. (2009). Emulsion and Oil Treating Equipment. Oxford, USA: Elsevier Inc. Pág. 67.

- $w_{\text{real}} = 2500 \text{ mm}$.

La idea es lograr adecuar las medidas o longitudes calculadas de tal manera que el proceso se realice de la mejor manera.

Después de realizar un análisis se determina que:

- El diámetro del tanque será $D = 14 \text{ m}$.
- En su interior contará con 5 paredes deflectoras internas o baffles de las siguientes medidas:

Baffle 1, $B1 = 7.87 \text{ m}$.

Baffle 2, $B2 = 10.65 \text{ m}$.

Baffle 3, $B3 = 11.50 \text{ m}$.

Baffle 4, $B4 = 10.65 \text{ m}$.

Baffle 5, $B5 = 7.87 \text{ m}$

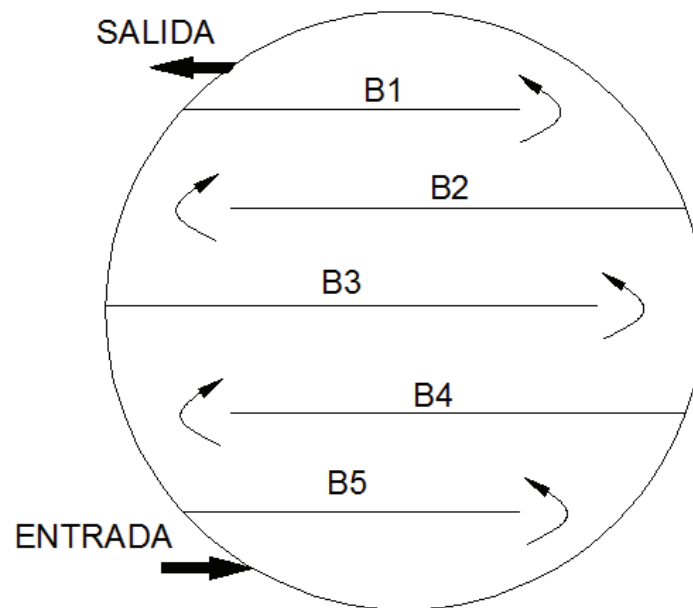


Figura 3. 2. Tanque con las paredes deflectoras internas calculadas
Fuente: el Autor

9. Al final, se calcula la altura del tanque, con la ayuda del dato inicial que proporciona el cliente que es la capacidad del tanque.

Una vez determinado el diámetro y conociendo la capacidad el tanque (dato proporcionado por el cliente) se puede utilizar la siguiente fórmula:⁴³

⁴³ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. A-2.

$$C = 0.785 * D^2 * H \quad (3.6)$$

Donde:

- C = Capacidad del tanque en m³, dato proporcionado por el cliente;
- D = Diámetro del tanque en m, calculado;
- H = Altura del tanque en m.

De la ecuación (3.6) se despeja la altura del tanque:

$$H = \frac{C}{0.785 * D^2} \quad (3.7)$$

En el Anexo 11 se muestran diferentes capacidades para tanques y los diámetros y alturas recomendados por el estándar API 650.

3.1.2 DISEÑO DE DEFLECTORES INTERNOS O BAFLES

Los deflectores internos o baffles por sus dimensiones y pesos del cuerpo son elementos grandes se deben tomar todas las consideraciones adecuadas, caso contrario los efectos que se producen sobre el cuerpo del tanque serán grandes o catastróficos. Por esta razón se debe tener en cuenta que tanque y baffle son elementos separados y se los debe incorporar una vez que ya están terminados cada uno de ellos.⁴⁴

Hay que considerar que los tanques diseñados bajo el estándar API 650 no están concebidos para tener adosados a su cuerpo estructuras de grandes pesos y dimensiones, son estructuras débiles y tendientes a deformarse cuando se aplica una fuerza relativamente baja a sus cuerpos. La fuerza que soporta los tanques API-650 durante su operación es la tensión propia de la lámina delgada y la presión que ejerce el producto líquido en las paredes internas del tanque, estas dos fuerzas se equilibran y mantienen un tanque redondo. Un elemento que se cargue externa o internamente a este sistema rompe el equilibrio y afecta en mayor o menor grado al tanque; sin embargo esto no quiere decir que no se pueden adosar partes mecánicas al tanque, lo que implica que se deben tomar las

⁴⁴ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 2.

medidas adecuadas durante el diseño, prefabricación y montaje para minimizar estos efectos.⁴⁵

3.1.2.1 Seccionamiento Vertical de Deflectores Internos o Baffles

Cada deflector o baffle debe ser dividido en secciones verticales a un tamaño razonable de acuerdo a la capacidad de los equipos de izaje disponibles en el Proyecto y de acuerdo a la accesibilidad al sitio mismo. Es recomendable que estas secciones verticales tengan el mismo ancho y oscilen entre 3,5 m y 5m, y sean distribuidas en tantas secciones según la longitud total del baffle, dejando una última sección de medida diferente para ajuste en caso de requerirse. Ver Figura 3. 3.

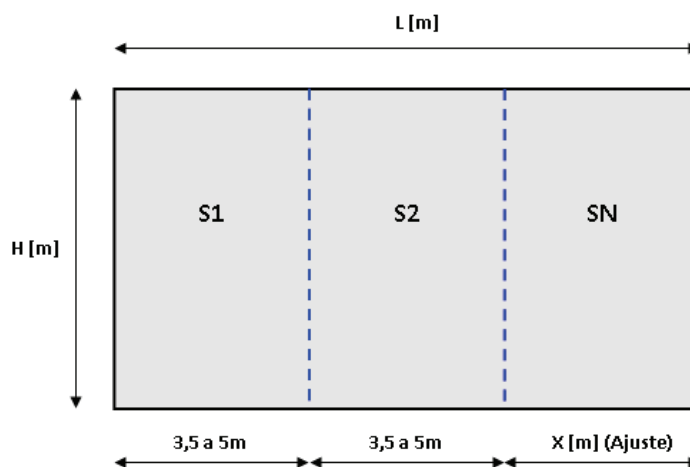


Figura 3. 3 Baffle típico - División por secciones
Fuente: el Autor

3.1.2.2 Modulación de Baffles

Cada sección vertical de S1 a SN, debe ser dividida en módulos horizontales de diferentes tamaños (al menos deben ser 2 por cada sección vertical), de tal forma que estos módulos resulten alternados con los de la sección contigua. Se debe diseñar de tal forma que se logre dar el mayor traslape "T" posible entre módulos para darle mayor rigidez al baffle durante el montaje y la operación. Ver Figura 3. 4.

⁴⁵ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 2.

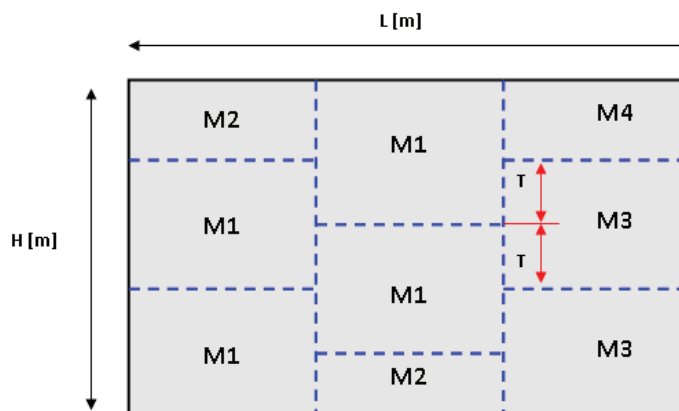


Figura 3. 4. Esquema de modulación de Baffles

Fuente: el Autor

Como la altura “H” de los tanques API es más o menos estándar y en la mayoría de los tanques oscila entre los 8m y 12m; hace que la cantidad de módulos se obtenga dividiendo esta altura para secciones que oscilen entre 1,5 m y 3m que es un tamaño manejable para poderse prefabricar en talleres, ser transportados en plataformas al sitio y de tamaño adecuado para el montaje; si se opta por prefabricar en el mismo sitio de montaje esta altura puede ser mayor. De esta forma se logra estandarizar las dimensiones de los módulos en 4 tamaños diferentes como máximo por cada pared (de M1 a M4) y se cubre el 100% del área del baffle, a continuación unos ejemplos para visualizar este tema:⁴⁶

- Ejemplo N° 1: Si la pared del baffle es de 8m de altura x 10m de longitud, las dimensiones de los módulos serían:
 4 Módulos M1 de 4 m de ancho x 3 m de alto.
 2 Módulos M2 de 4 m de ancho x 2 m de alto.
 2 Módulos M3 de 2 m de ancho x 3 m de alto (Módulos de ajuste).
 1 Módulo M4 de 2 m de ancho x 2 m de alto. (Módulo de ajuste).
- Ejemplo N° 2: Si nuestra pared de baffle es de 8m de altura x 14,5m de longitud, las dimensiones de los módulos serían:
 6 Módulos M1 de 4 m de ancho x 3 m de alto.
 3 Módulos M2 de 4 m de ancho x 2 m de alto.
 1 Módulo M3 de 2,5 m de ancho x 2 m de alto (Módulo de ajuste).
 2 Módulos M4 de 2,5 m de ancho x 3 m de alto. (Módulos de ajuste).

⁴⁶ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 4.

3.1.2.3 Conformación de Baffles⁴⁷

Cada módulo debe estar conformado por:

- Un marco exterior de ángulo o perfil que facilite el conformado de un módulo rígido, además se debe prever que la cara exterior del perfil facilite la unión entre módulos de una misma sección y entre secciones.
- Debe tener rigidizadores internos, ya sea en forma de diagonales o paralelos al marco exterior para que ayuden a mantener y controlar las tolerancias dimensionales durante el armado y la soldadura de cada marco.
- Cada marco se sella con una lámina de acero de 3/16" de espesor mínimo y hay que colocarla en el lado donde choca el flujo.
- Las soldaduras de la lámina con el marco de cada módulo son tipo sello y continua en el lado de lámina y soldadura alternada en el lado opuesto donde está la estructura. Ver Figura 3. 5, donde se recomiendan tamaños y tipos de soldadura.

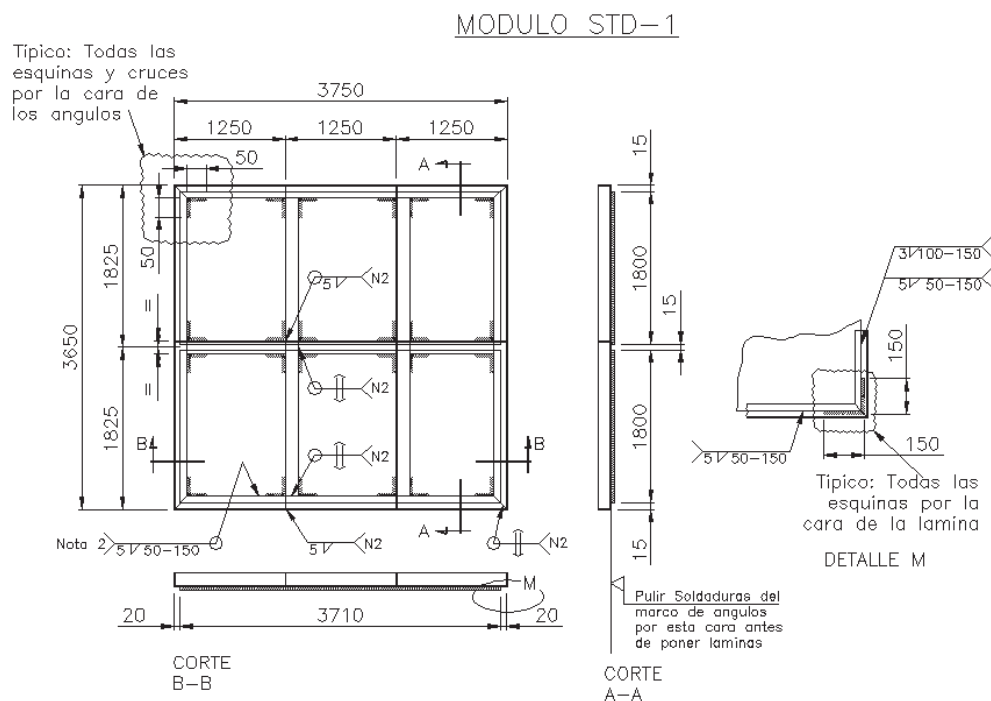


Figura 3. 5. Módulo típico

Fuente: el Autor

⁴⁷ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI.

3.1.2.4 Selección de Perfiles para el Marco Exterior

Para realizar una correcta selección de los perfiles que forman parte se han tomado las siguientes consideraciones:

- Presión hidrostática, se tomará en cuenta la presión hidrostática ocasionada por el fluido al momento del llenado del tanque porque cuando el tanque está lleno esta presión ya no estaría presente por que el fluido se encuentra en las dos caras del deflector interno o bafle. En la Figura 3. 6 se muestra el efecto de la presión hidrostática al momento del llenado del tanque y cuando el tanque ya está lleno.

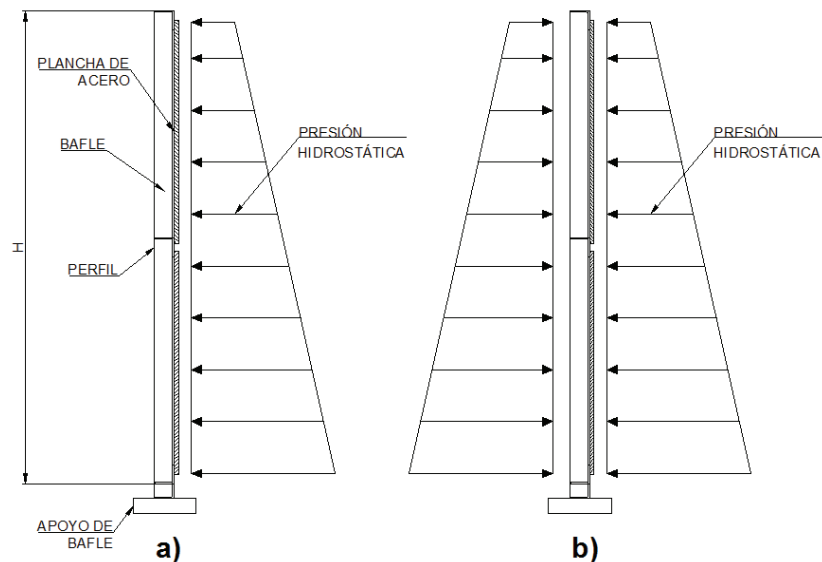


Figura 3. 6. a) Presión hidrostática en el bafle al momento del llenado del tanque, b) presión hidrostática en el bafle cuando el tanque ya está lleno

Fuente: el Autor

- Cargas Muertas, debido al peso del techo del tanque y sus accesorios. Además del peso producido por el peso de las láminas de acero que cubren el marco exterior.

Sumando las cargas muertas se obtiene una carga total (C_{total}) que es la que va a soportar el bafle, para determinar el perfil se necesita saber todas las propiedades del perfil:

- Área total (A_t)

- Peso por unidad de longitud (P_c)
- Eje x-x
 - Momento de Inercia (I_{x-x})
 - Radio de Giro (r_{x-x})
- Eje y-y
 - Momento de Inercia (I_{y-y})
 - Radio de Giro (r_{y-y})

Con todos los valores citados anteriormente y conocida la longitud no arriostrada (L_c), se está en capacidad de diseñar el perfil estructural del cual estará compuesto el deflector interno.

Para esto se considera que el perfil se encuentra sometido a compresión como la columna central que sostiene el techo del tanque. El Estándar API 650 (2007) en el punto 5.10.3.1 recomienda utilizar la especificación ANSI/AISC 360, el capítulo E diseño de miembros para compresión la cual indica que la carga máxima admisible se determina de la siguiente manera.⁴⁸

Se considera, para efectos de diseño, que K=1, por lo que, según recomendaciones de la API 650:

- Cuando $\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right) \leq 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = \left[0.658\frac{F_y}{F_e}\right] F_y \quad (3.8)$$

- Cuando $\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right) > 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = 0.877 * F_e \quad (3.9)$$

⁴⁸ AISC. (2010). Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero. Chicago: AISC. Pág.: 98.

Donde

- F_e = Tensión elástica crítica de pandeo (Mpa) determinada con la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL_{cc}}{r_m} \right)^2} \quad (3.10)$$

- L_{cc} = longitud no arriostrada del miembro (mm),
- r_m = radio de giro del miembro (mm),
- E = Módulo de elasticidad (MPa),
- F_y = Mínimo esfuerzo de fluencia, (Mpa)

$$F_c = \frac{P}{A_t} = \frac{P_{cc} + (L_{cc} * P_c)}{A_t} \leq F_{cr} \quad (3.11)$$

- 5) De la ecuación anterior se determina la ecuación utilizada para definir la carga máxima que soporta la columna, P_{ccm} :

$$P_{ccm} = (F_{cr} * A_t) - (L_{cc} * P_c); [lb] \quad (3.12)$$

P_c , es la carga del perfil por unidad de longitud.

3.1.2.5 Apoyos de Baffles

Los apoyos del baffle al fondo del tanque deben ser diseñados considerando las siguientes premisas:⁴⁹

- El baffle no debe ser soldado o apoyado directamente sobre la lámina del fondo, para precautelar la integridad estructural y evitar corrosión prematura de las láminas del fondo.
- El peso del baffle debe ser distribuido en la mayor cantidad posible de puntos de apoyo, de tal forma que se evite causar deformaciones permanentes a las láminas del fondo del tanque.

⁴⁹ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 6.

- El peso del baffle debe ser transmitido al fondo del tanque por medio de elementos que permitan minimizar o absorber cargas dinámicas y no afecten las propiedades estructurales del fondo.
- Los elementos de apoyo deben ser resistentes a la corrosión y a productos químicos resultantes de la perforación, transporte y tratamiento de hidrocarburos.
- Estos elementos de apoyo pueden ser de:
 - tacos de madera de guayacán inmunizada o similar,
 - placas de teflón T.P.F.E. (politetrafluoroetileno).
- El tamaño de estos elementos debe ser calculado para resistir el peso del baffle y las cargas combinadas que se ejercen sobre ellos durante la operación.
- En la Figura 3. 7, se observa un esquema de la instalación de los elementos de apoyo de los baffles y dimensiones recomendadas.

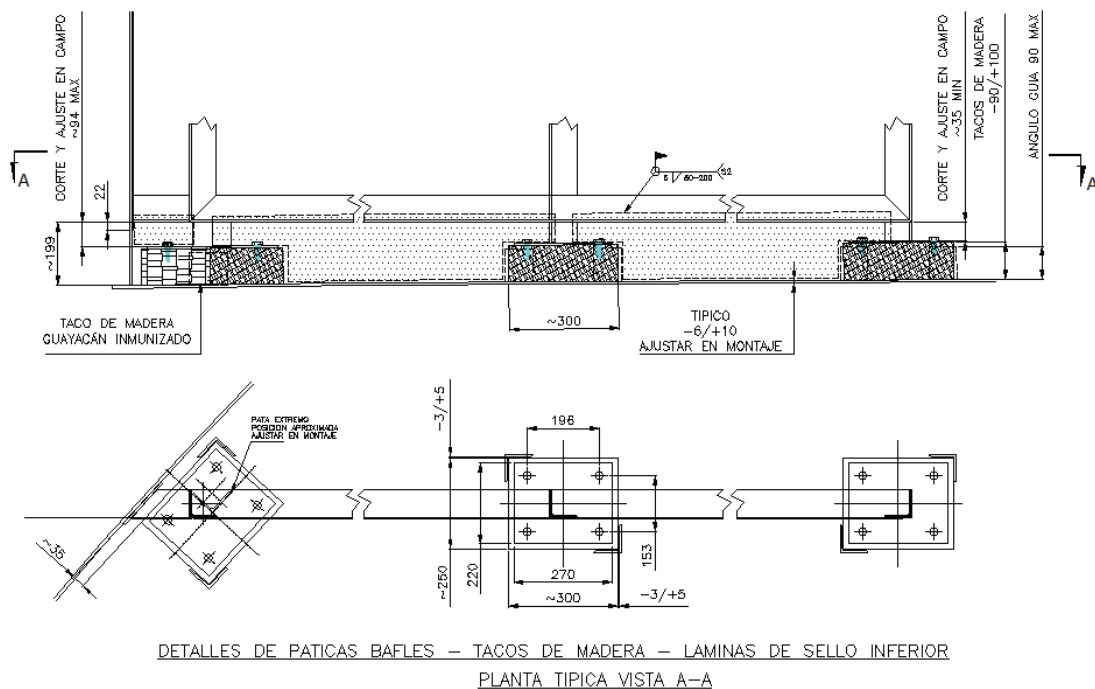


Figura 3. 7. Corte Inferior de una Pared Típica de Baffle

Fuente: el Autor

A continuación se presenta la Tabla 3. 1 que indica las propiedades mecánicas de la madera Guayacán Pechiche que se utiliza en la industria ecuatoriana.

Tabla 3. 1. Esfuerzos admisibles madera guayacán pechiche

Tipo de Esfuerzo	Madera Seca		Madera Verde	
	Esfuerzo Mínimo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)	Esfuerzo Mínimo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
Compresión Paralela	394.8	465.91	105.81	125.42
Compresión Perpendicular	239.75	231.83	70.13	62.24
Tracción Paralela	1017.12	1144.15	472.07	520.69
Tracción Perpendicular	22.6	26.52	9.84	11.46
Corte	29.93	38.35	13.24	16.65
Flexión	534.85	627.63	152.81	177.14

Fuente: Armijos y Medina, 2009

Considerando que cada apoyo de madera guayacán estará sometido a un esfuerzo de compresión perpendicular a las fibras, se tiene que el esfuerzo de compresión promedio será de acuerdo a la Figura 3. 8:⁵⁰

$$\sigma_c = \frac{R_{apoyo}}{b * a} \quad (3.13)$$

Dónde:

- R_{apoyo} = Fuerza o carga que soportará cada uno de los apoyos, esto depende de la carga que soportará cada bafle y el número de apoyos que tendrá cada bafle, N.
- $b*a$ = Área de contacto o apoyo, m².
- σ_c = Esfuerzo promedio de compresión, Pa.

Cabe recalcar que el valor del esfuerzo promedio de compresión calculado (σ_c), debe ser menor que el valor del esfuerzo promedio de compresión perpendicular a las fibras que se muestra en la Tabla 3. 1.

⁵⁰ Armijos, S. y Medina, G. (2009). Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera Tipo A: Guayacan Pechiche, Colorado, Sande y Mascarey. Quito: ESPE. Pág.: 79.



Figura 3. 8. Apoyo de baffle
Fuente: el Autor

Se recomienda que la altura h de cada apoyo de baffle sea de 100 a 150 mm.

3.1.2.5.1 Apoyos del Baffle a las Paredes y Estructura del Techo del Tanque

Los apoyos del baffle a las paredes y estructura del techo del tanque, deben ser diseñados considerando las siguientes premisas:⁵¹

- Los soportes definitivos del baffle al cuerpo deben ser instalados posteriormente a la prueba hidrostática, cuando se haya logrado la nivelación definitiva del baffle y se encuentre totalmente soportado al piso.
- Los soportes del baffle a las paredes del tanque deben considerar un elemento estructural que restrinja únicamente en un grado de libertad, para evitar deformaciones del cuerpo del tanque durante el montaje y operación. Se recomiendan platinas de acero colocadas verticalmente en lugar de ángulos y/o perfiles.

⁵¹ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 6.

- Se deben considerar al menos dos platinas de sujeción por cada módulo para facilitar el montaje y alineación.
- Los soportes del baffle a la estructura del techo del tanque deben ser diseñados para mantener la geometría del baffle únicamente (para que la pared quede recta), estos soportes no deben soportar carga porque el peso del baffle cargado a la estructura se transmite a las paredes del tanque y estas no están diseñadas para soportar este peso adicional.
- Ver la Figura 3. 9, donde se recomiendan típicos de soporte para estos casos particulares y diseños de soldadura.

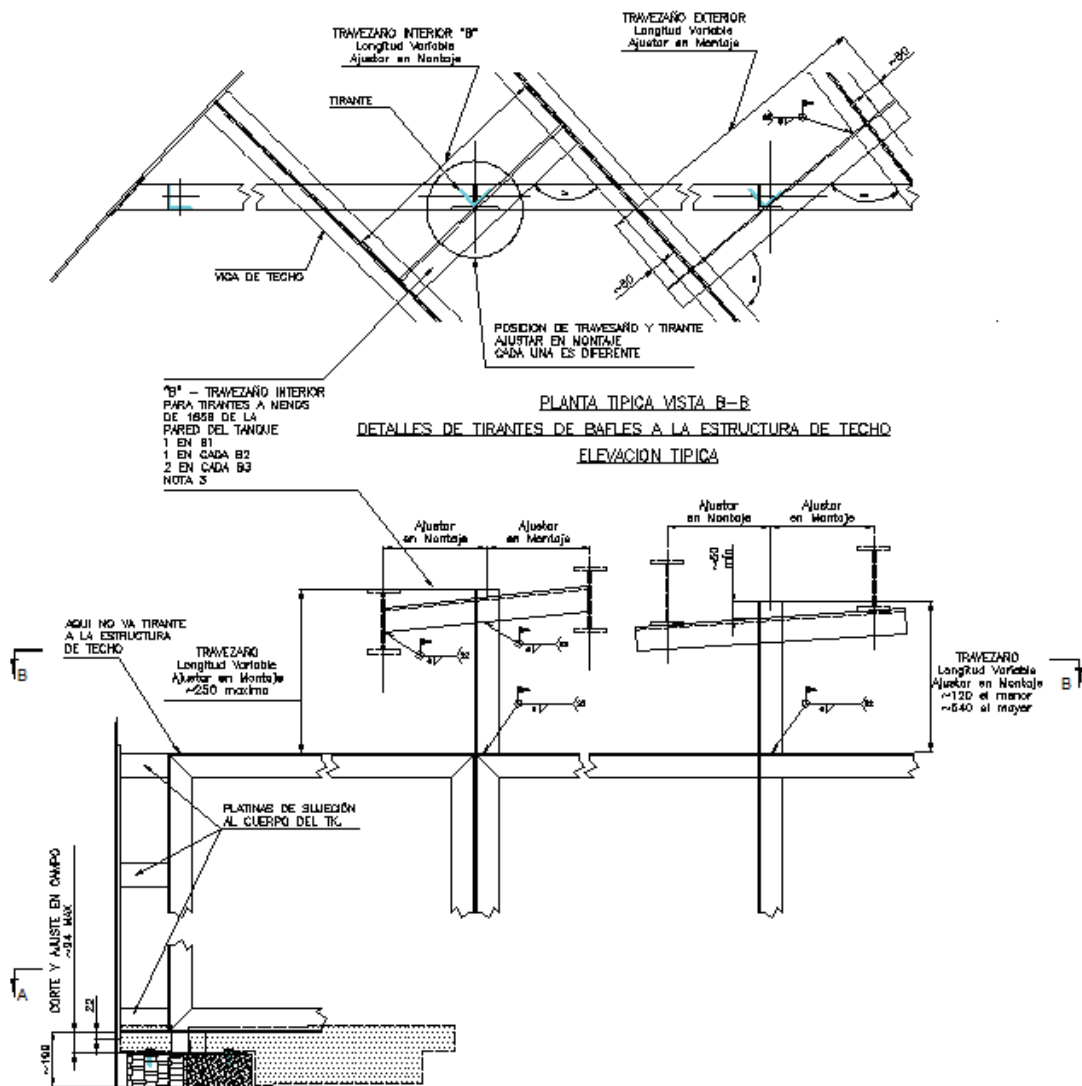


Figura 3. 9. Corte lateral y superior de una pared típica de baffle

Fuente: el Autor

Adicionalmente se deben prever soportes en el sentido transversal a las paredes de baffles, que sirven de amarres para rigidizar las paredes de baffles y, ayudan a mantener la estabilidad del sistema durante el montaje y la operación. Estos soportes van instalados de las paredes del tanque a los baffles y entre baffles, en varios niveles de tal forma que ayuden a conseguir la planitud de la pared de acuerdo a las tolerancias dadas por ingeniería. Estos soportes pueden ser de doble ángulo o del mismo perfil que se utilizó para armar los marcos de los módulos. En la Figura 3. 9 y Figura 3. 10, se observan este tipo de amarres y de requerirse soportes adicionales para ayudar a rigidizar una determinada sección se pueden instalar en campo.

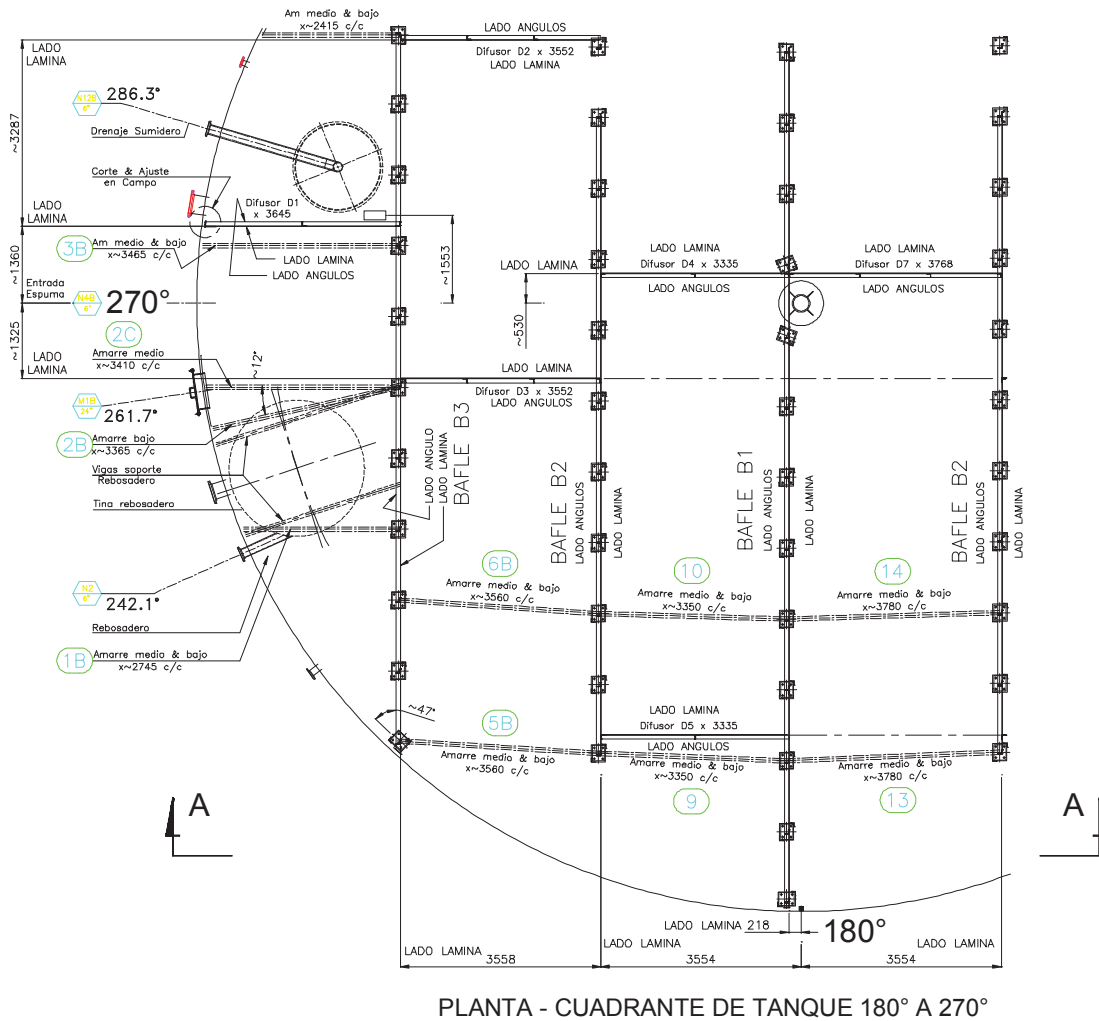


Figura 3. 10. Vista de planta de los Amarres de Baffles en un tanque
Fuente: el Autor

3.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TANQUE DE LAVADO

3.2.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

La estructura soportante tendrá las siguientes características:

- Diámetro del tanque entre 6 y 25 metros.
- Altura nominal media del tanque entre 3 y 10 metros.
- Estructura armada, montada y soldada.
- Columnas circulares.
- Capacidad entre 500 y 18000 barriles.
- Infraestructura con Acero A-36 (Perfilería Manual AISC).

Los techos cónicos son los más utilizados en Ecuador para tanques atmosféricos, debido a su bajo costo con relación a otras alternativas como los techos tipo domo o flotante. La utilización de techos cónicos está recomendada para líquidos con un flash point mayor a 120 °F (48.8 °C) ya que para líquidos con un punto de inflamación menor es extremadamente peligroso la acumulación de vapores en un solo punto de la superficie del techo como es el caso de los techos cónicos, para este caso es recomendable usar techos tipo domo con múltiples venteos.

3.2.1.1 Clasificación de Techos Fijos de Acuerdo al Estándar API 650

La norma API 650 describe que existen tres tipos de techos fijos, el parámetro delimitante entre éstos, es el diámetro a ser cubierto. El primero y más sencillo es el techo auto soportado, este tipo de tanque puede ser utilizado según las condiciones del código API 650 en el subcapítulo 5.10.5.1, con una modificación del anterior se tiene el techo auto soportado con anillo de compresión, el tercer tipo y más utilizado es el tanque con estructura soportante para el techo, el cual puede tener una sola columna central adicionalmente podrá tener múltiples columnas formando polígonos consecutivos.⁵²

Los techos que se consideraron en el desarrollo del presente proyecto de titulación son techos cónicos soportados con una sola columna central.

⁵² Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 88.

En la sección anterior se indicó que la norma, se restringe a realizar el diseño de la estructura soportante de los techos cónicos, pero es de vital importancia la subsección 5.10 Techos y 5.11. Cargas de viento en tanques, son los tópicos que describen las condiciones que debe cumplir el fabricante, con respecto al diseño de la estructura soportante, por lo cual se considera, extraer las secciones de mayor relevancia.

3.2.1.2 Conceptos y Definiciones para Tanques de Techo Cónico

Las siguientes definiciones aplicadas al diseño de tanques no deben ser consideradas como un limitante, si no como una ayuda para el diseño. Quedará a criterio del diseñador el uso de los parámetros siguientes:

3.2.1.2.1 Generalidades⁵³

Todos los techos y las estructuras que lo soportan deben ser calculados para soportar un peso propio o peso muerto de acuerdo a las combinaciones de carga que recomienda el apéndice R del estándar API 650. Los espesores de las planchas que componen el techo tendrán un espesor nominal mínimo de 4.8 mm (3/16”), además se debe añadir el sobre espesor de corrosión requerido (Corrosión Admisible) al espesor calculado salvo indicación contraria del cliente o comprador.

Las planchas del techo cónico soportado, no tienen que ser soldadas o fijadas a los elementos que lo soportan, pero sí al ángulo tope del tanque, mediante una soldadura angular continua sobre el lado superior del ángulo tope únicamente.

Cuando el cliente especifica que la junta techo cuerpo es frágil, es decir cuando la junta techo cuerpo falla por exceso de presión interna, se deben seguir las siguientes recomendaciones del punto 5.10.2.6.

Para todos los tipos de techos, las láminas pueden ser rigidizadas por secciones o perfiles soldados a las láminas, pero no soldadas a las vigas y/o a las correas.

⁵³ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-71 y 5-72.

3.2.1.2.2 Esfuerzos Permisibles (Perfiles Laminados en Caliente)⁵⁴

El esfuerzo permisible de todos los elementos estructurales del techo debe ser determinado en acuerdo con el ANSI/AISC 360 usando la metodología de diseño para esfuerzo permisible ASD. Es decir que la suma de los esfuerzos estáticos y dinámicos máximo no excederá de los límites especificados en la Especificación AISC.

Con respecto a los radios máximos de esbeltez, para columnas, el valor de L/r_c no debe exceder 180. Para otros miembros en compresión, el valor de L/r no debe exceder de 200. Para todos los otros miembros excepto las correas, los cuales estén sometidos a fuerza de tensión, el valor de L/r no debe exceder de 300.

- L = Longitud no arriostrada, mm.
- r_c = radio de giro mínimo de la columna, mm.
- r = Radio de giro gobernante, mm.

Para calcular el esfuerzo máximo compresible el API 650 recomienda utilizar la especificación AISC, el capítulo E diseño de miembros para compresión, el cual indica que la carga máxima admisible se determina de la siguiente manera.

- Cuando $\left(\frac{KL}{r}\right) \leq 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (3.14)$$

- Cuando $\left(\frac{KL}{r}\right) > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = 0.877 * F_e \quad (3.15)$$

Donde

- F_e = Tensión elástica crítica de pandeo (Mpa) determinada con la siguiente ecuación:

⁵⁴ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-72 y 5-73.

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (3.16)$$

- L = longitud no arriostrada del miembro (mm),
- r = radio de giro del miembro (mm),
- E = Módulo de elasticidad (MPa),
- Fy = Mínimo esfuerzo de fluencia, (Mpa)

Por criterio de esbeltez, para las piezas principales comprimidas, L/r no deberá ser superior a 180. Para otras piezas secundarias, la relación L/r no deberá ser superior a 200.

3.2.2 TIPO DE ESTRUCTURA SOPORTANTE

La norma API 650 en el apéndice A recomienda que para el dimensionamiento estándar de tanques de almacenamiento de diámetros y alturas típicas usar la ecuación (3.6):

La ecuación (3.6) no es un limitante para el diseño de tanques de almacenamiento, sin embargo es la que se utilizará para definir la estructura soportante del techo.

Las láminas generalmente utilizadas en el diseño y elaboración de tanques de mediana y gran capacidad, son láminas de tipo estructural, de especificaciones ASTM A283 Gr. C o ASTM A 36.

Además el estándar API 650 recomienda que el ancho nominal de las láminas del cuerpo sea de acuerdo a la necesidad del cliente, pero se preferirán láminas no menores a 72 in. El ancho usualmente disponible de la lámina para la elaboración de estos tanques justifica la altura del mismo.

- Los diámetros de los tanques se definen como múltiplos de cinco, tal como se justifica a continuación:⁵⁵
 - Perímetro del cuerpo del tanque $l = \pi D \approx \pi D$.
 - Para una longitud de láminas de cuerpo $l = 31.5 \text{ pies}$, se define:

⁵⁵ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 99.

- $nD = \pi D$, para cualquier diámetro del tanque.
- n = número de láminas.
- D = diámetro del tanque

$$n = \frac{\text{perímetro}}{31.5} = \frac{\pi D}{31.5} = \text{entero} \quad (3.17)$$

El múltiplo de D que más se aproxima a un entero se observa en la Tabla 3. 2:

Tabla 3. 2. Múltiplo del diámetro recomendado para construcción de tanques

MÚLTIPLO	RELACIÓN	VALOR	INVERSA
D múltiplo de 2	$2\pi/31.5$	0.199	5.013
D múltiplo de 3	$3\pi/31.5$	0.299	3.342
D múltiplo de 5	$5\pi/31.5$	0.498	2.001
D múltiplo de 7	$7\pi/31.5$	0.698	1.432

Fuente: Bustamante y González

Al observar la tabla anterior, se demuestra que diámetros múltiplos de cinco (en pies) son los que dan una mayor aproximación para la utilización de láminas enteras, por lo que serán los más utilizados, con el fin de evitar desperdicio de material y de dinero.

A continuación, en la Figura 3. 11 se indica el tipo de estructura soportante para el techo que se va a utilizar. El cual posee una columna central, este techo se utiliza para diámetros nominales desde 20 ft. (6.096 mm) hasta 80 ft. (24.384 mm), utilizando canales C como correas.

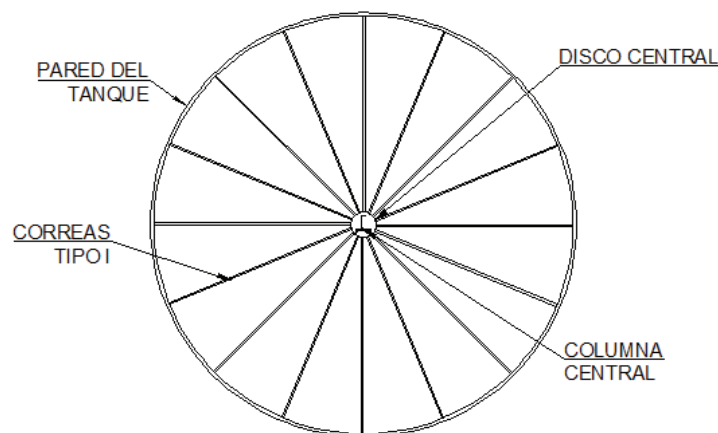


Figura 3. 11. Estructura tipo a utilizarse

Fuente: el Autor

3.2.3 ANÁLISIS DE CARGAS

Las cargas en estructuras metálicas pueden ser de dos clases:

- Cargas Estáticas o Cargas Muertas: Las mismas que pueden ser por peso propio de la estructura y carga de seguridad.
- Cargas Dinámicas o Cargas Vivas: Suelen ser generalmente de sismo, de viento, de granizo o nieve, de maquinaria, otros, etc.

Las cargas muertas incluyen el peso del mismo de la coraza estructural del tanque y de los elementos mayores del equipamiento fijo. Siempre ejercen una fuerza descendente de manera constante y acumulativa desde la parte más alta del tanque hasta su base. Las cargas vivas comprenden la fuerza del viento, las originadas por movimientos sísmicos, las vibraciones producidas por la maquinaria, mobiliario, materiales, mercancías almacenadas, ocupantes, así como las fuerzas motivadas por cambios de temperatura. Estas cargas son temporales y pueden provocar vibraciones, sobrecarga y fatiga de los materiales. En general, los edificios deben estar diseñados para soportar toda posible carga viva o muerta y evitar su hundimiento o derrumbe, además de prevenir cualquier distorsión permanente, exceso de movilidad o roturas.

La norma API 650 recomienda utilizar para el cálculo, al menos el valor de 25 lb/ft² para carga viva, y un valor de carga muerta de 7.65 lb/ft² para láminas de 3/16 in de espesor (valor de la carga muerta depende del espesor de las láminas), para mayor referencia ir al punto 5.10.2.1 y 5.10.2.2 del Estándar.⁵⁶

Estas cargas son las básicas a considerarse en el diseño del techo, a las que hay que añadir la carga debida al peso propio de la estructura. Cualquier carga adicional deberá ser especificada por el cliente.

⁵⁶ Estándar API 650. (2007). Welded Storage Tanks for Oil Storage, 11ava. Ed. Washington D.C.: API. Pág. 5-73 y 5-74.

3.2.4 CÁLCULOS ESTRUCTURALES (FUERZAS, MOMENTOS, ESFUERZOS, DEFORMACIONES). PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA ESTRUCTURA CON PERFILES LAMINADOS EN CALIENTE SEGÚN AISC

El cálculo estructural del techo cónico de tanques permitirá determinar los cortantes y momentos máximos a los que estará sometida la estructura metálica soportante. Además permitirá orientar al dimensionamiento y selección de perfiles con menor peso pero de similar resistencia y de esbeltez menor a un valor requerido.

Se procederá a realizar los cálculos tomando en consideración las siguientes limitaciones:⁵⁷

- La longitud de las correas tipo canal no será mayor a los 9 m, y 13 m para correas tipo I de ala ancha.
- La longitud máxima de las vigas no será mayor a los 13 m. En las estructuras que utilicen perfiles C como correas se preferirá que esta longitud no exceda a los 10 m.
- Se define la geometría básica en lo referente al número de correas, vigas, radios de implantación de las correas y columnas, así como las longitudes de las mismas. Las limitaciones citadas son para poder utilizar perfiles livianos con la menor deflexión posible, lo que permite elaborar las estructuras con un menor peso.
- El esquema de diseño de la estructura se describe a continuación:
 - Restricciones y análisis de las cargas vivas y muertas según API 650.
 - Diseño de las correas o cerchas.
 - Diseño de vigas.
 - Diseño de las columnas (armadas o circulares).
 - Diseño de las bases.
 - Diseño de las cartelas.

⁵⁷ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 107.

- Diseño del disco central.

3.2.4.1 Diseño de Correas

Las correas o cerchas son los elementos estructurales, que trabajan a flexión, soportan el peso muerto de las láminas del techo, los accesorios del techo, y el peso dinámico por montaje o mantenimiento del personal, ubicadas y distribuidas radicalmente al perímetro del tanque, las mismas que pueden ser canales o perfiles de ala ancha, de acuerdo a las exigencias del cliente.⁵⁸

3.2.4.1.1 Análisis para lámina del techo

El espaciamiento entre las correas es un parámetro principal que determina el número de correas a emplearse para un diámetro del tanque dado y establece básicamente la geometría de la estructura, o de acuerdo al punto 5.10.4.4 de la norma API 650 o al punto 3.2.1.3.3 Parámetros Geométricos de Techos Cónicos.

En vista de que la lámina del techo, es continua a lo largo de toda la superficie se la puede considerar como una viga continua, recta, plana, con múltiples apoyos, y así a cada segmento de techo como una viga doblemente empotrada con una carga uniformemente distribuida. El momento flector que actúa sobre las correas es igual al valor de la ecuación (3.19), como se indica en la Figura 3. 12.

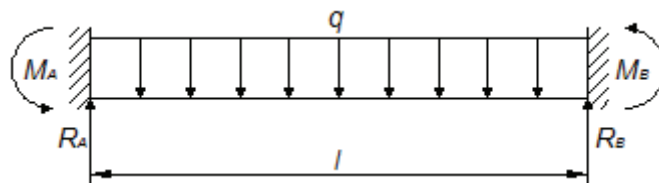


Figura 3. 12. Análisis para la lámina del techo de ancho unitario

Fuente: el Autor

Dónde:

- q : Valor de carga distribuida.
- l : Longitud de la viga.
- R : Reacción de apoyo en el punto indicado.
- M : Momento en el punto indicado.

⁵⁸ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 108.

Para la cual se aplica las siguientes ecuaciones, E el módulo de elasticidad, que para el acero varía entre los valores de 28000 y 30000 [KSI]:

- Reacciones de apoyo,

$$R_A = R_B = \frac{q * l}{2} \quad (3.18)$$

- Momentos de apoyo,

$$M_A = M_B = \frac{q * l^2}{12} \quad (3.19)$$

- Esfuerzos normales,

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (3.20)$$

- Momento de Inercia,

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (3.21)$$

Para este análisis se considerará una franja uniforme de lámina de techo de 1 in de ancho. Para la cual el momento máximo quedaría indicado por la ecuación (3.19) antes citada, la cual puede ser modificada a la siguiente ecuación:

$$M_{MAX} = \frac{q * l^2}{12} = \frac{1 * p * l^2}{12} \quad (3.22)$$

Dónde:

- p : carga distribuida sobre el techo por unidad de área, (lb/in²).

Remplazando la ecuación (3.21) y la ecuación (3.22) en la ecuación de esfuerzos normales (3.20) en una viga en flexión se obtiene la ecuación (3.23).

$$\sigma = \frac{\frac{p * l^2}{12} * y}{\frac{b * h^3}{12}} \quad (3.23)$$

Dónde:

- b = 1 pulgada (ancho).
- y = 1/2h distancia desde el eje neutro hasta la superficie de la lámina (como indica la Figura 3. 13).
- C = punto centroide de la viga.

- $h = e$, la altura de la viga es igual al espesor de la lámina.

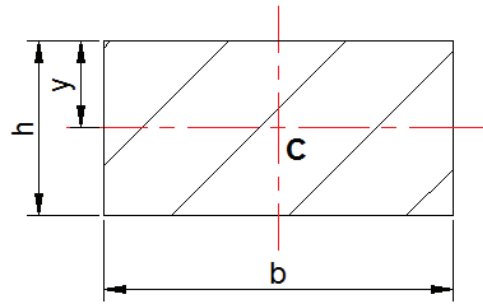


Figura 3. 13. Propiedades de Inercia
Fuente: el Autor

Entonces:

$$\sigma = \frac{p * l^2 * y}{h^3} = \frac{p * l^2}{2 * e^2} \quad (3.24)$$

$$l = e \sqrt{\frac{2 * \sigma}{p}} \quad (3.25)$$

Para un esfuerzo permisible f , de 18000 PSI equivalente a 1268 kg/cm², el máximo especificado en API 650 para techos de acero, con un espesor de 3/16 in y una carga debida al techo de 32,65 lb/pie² equivalente a 160 Kg/m², que es igual a $p = 0.277$ psi, se obtiene el valor de longitud de vigas entre correas corroborando lo expuesto en el API 650 en el punto 5.10.4.4. Obteniéndose.⁵⁹

$$l = \frac{3}{16} * \sqrt{\frac{2 * 18000}{0.277}} = 74.7 \text{ in} = 6.21 \text{ ft}$$

3.2.4.1.2 Procedimiento de diseño de las correas de la estructura con una columna central

El procedimiento descrito a continuación se aplica únicamente para tanques entre 6 y 25 m de diámetro, y que sean soportados por una columna en el centro del tanque.

⁵⁹ Batallas, E. y Barrera, R. (1994). Estandarización de la Estructura para Tanques de Almacenamiento de Techo Cónico. Quito: EPN. Pág.: 110.

- **Definición del número de correas**

El número de correas mínimas a utilizarse en este tipo de estructuras está definido de la siguiente manera:

$$N_{min} = \frac{D}{609.6}; D[mm] \quad (3.26)$$

Dónde:

- N_{min} = número mínimo de correas.
- D = diámetro nominal del tanque.

- **Diseño de las correas**

Los datos requeridos para el diseño de las correas son:

- El diámetro nominal del tanque, D [mm].
- El espesor del techo, e , [mm].

Las cargas que actúan sobre las correas son:

- Carga viva, C_v , igual a 25 lb/ft^2 ($122,3 \text{ Kg/m}^2$)
- Carga muerta, C_m , igual a 37.4 Kg/m^2 ($7,65 \text{ lb/ft}^2$) para un espesor de techo de 4.8 mm ($3/16 \text{ in}$), que es el mínimo requerido, y 49.9 kg/m^2 ($10,2 \text{ lb/ft}^2$), para un espesor de techo de 6.4 mm ($1/4 \text{ in}$) considerando un espesor adicional por corrosión de 1.6 mm ($1/16 \text{ in}$), en caso de ser requerido.

Se tiene un techo como el que se indica en la Figura 3. 14 entonces, el procedimiento de cálculo es el siguiente:

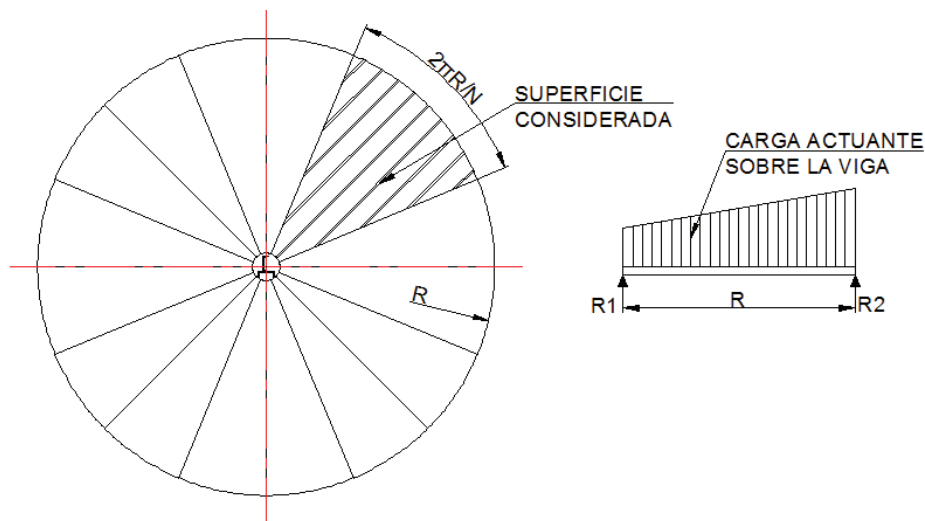


Figura 3. 14. Disposición de áreas y cargas en las correas del techo
Fuente: el Autor

Dónde:

- R_1 Reacción en la columna central.
- R_2 Reacción en la cartela.
- R Radio nominal del tanque.

La superficie considerada, S_c que es el área que va a soportar cada correa:

$$S_c = \frac{2\pi * D}{2N} * \frac{D}{4} = \frac{\pi D^2}{4N} \quad (3.27)$$

Dónde:

- N es el número de correas seleccionadas, mayor o igual a N_{\min} .

La carga triangular, C_t , que varía debido a la forma en que se ha seleccionado el área de cálculo es igual a:

$$C_t = (C_v + C_m) S_c; [kg] \quad (3.28)$$

La carga uniforme, C_u , que es la carga debida al peso propio de la correa, es igual a:

$$C_u = P_c * \frac{D}{2}; [kg] \quad (3.29)$$

Dónde:

- P_c es el peso por unidad de longitud de la correa [Kg/mm] y es un valor supuesto inicialmente, que luego deberá ser verificado.

Se determina el momento máximo, $M_{m\acute{a}x}$, suponiendo las cargas triangular y uniforme así:

$$M_{m\acute{a}x} = \left[\left(0.1283 * C_t * \frac{D}{2} \right) + \left(0.125 * C_u * \frac{D}{2} \right) \right] * 6; [kg - mm] \quad (3.30)$$

Se encuentra el módulo de sección, S definido a continuación:

$$S = \frac{M_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}; [mm^3] \quad (3.31)$$

Donde, $F_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo máximo admisible igual a 14.06 kg/mm² (20000 lb/in²). Con el valor calculado del módulo de sección mínimo requerido, de la fórmula anterior se lo compara con los módulos de sección especificados por los fabricantes de perfiles laminados en caliente y se encuentra el inmediato superior, en el presente caso se trabaja con las tablas proporcionadas por el manual de la AISC, en el cual indica el peso por unidad de longitud real, P_{cr} , determinándose además las dimensiones y características generales del perfil.⁶⁰

Una vez calculado el verdadero valor de la carga real del perfil seleccionado P_{cr} , se calcula el momento real o máximo, consecuentemente se determina el módulo de sección, realizando este algoritmo tantas veces como sea necesario hasta encontrar el módulo de sección óptimo.

Una vez determinado el tipo de correa a utilizarse se verifica la deflexión, Δy , como se indica:

$$\Delta y = 0.01304 * \frac{C_v * S_c * \left(\frac{D}{2} \right)^3}{E * I}; [mm] \quad (3.32)$$

Dónde:

- E = módulo de elasticidad = 29000000 lb/in² = 20394 Kg/mm².

⁶⁰ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 113.

- I = momento de inercia de la sección seleccionada pulg^4 o mm^4 .

Este valor debe ser menor igual al desplazamiento máximo permitido, $\Delta y_{\text{máx}}$.

$$\Delta y_{\text{máx}} = \frac{D}{480}; D[\text{mm}] \quad (3.33)$$

A continuación se determina las reacciones en los puntos de apoyo de la correa, de la carga columna central R_1 y carga en la cartela R_2 .

$$R_1 = \frac{C_u}{2} + \frac{C_t}{3}; [\text{kg}] \quad (3.34)$$

$$R_2 = \frac{C_u}{2} + \frac{2 * C_t}{3}; [\text{kg}] \quad (3.35)$$

El peso neto de las correas es igual a:

$$P_n = C_u * N; [\text{kg}] \quad (3.36)$$

Y por último se calcula la carga máxima aplicada en la columna central provocada por la reacción R_1 , a la que se llamará carga crítica P_{cc} que se determina a continuación:

$$P_{cc} = R_1 * N; [\text{kg}] \quad (3.37)$$

Este valor obtenido de la ecuación anterior será utilizará como parámetro principal para el diseño de las columnas, en el punto 5.2.4.2.

Con este procedimiento de diseño se realiza el análisis estructural con diámetro nominal desde 6 m hasta 25 m, con canal C y perfil I ala ancha, con una columna central, para un mismo diámetro, variando el número y tipo de correas, seleccionándose aquella de menor peso.

3.2.4.2 Diseño de Columnas⁶¹

Una columna es un elemento que trabaja típicamente a compresión, transmitiendo las cargas desde los elementos horizontales (cubiertas y forjados) hasta las cimentaciones. Las técnicas modernas introdujeron dos nuevos

⁶¹ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 125-129.

materiales para construir columnas; el hormigón armado y el acero laminado. El primero ha sustituido prácticamente a la piedra por su excelente resistencia a la compresión y su buen comportamiento a los esfuerzos de pandeo, asistido por las armaduras de acero. Con el acero laminado suelen conformarse columnas de sección compuesta, a base de perfiles industriales, para aumentar la rigidez.

Después de haber realizado el diseño de las correas y vigas, el paso siguiente es realizar el procedimiento de diseño de las columnas que soportarán el peso de correas, vigas y placas del techo. En el punto 3.2.4.1.2. De esta subsección se han determinado las cargas actuantes sobre las columnas, P_{cc} . Las columnas pueden ser de planta circular o poligonal y su altura debe superar al menos cuatro veces la anchura mayor de la sección. Por lo tanto se utilizará dos tipos de columna: sección armada compuesta de dos canales o simplemente una sección tubular.

3.2.4.2.1 Diseño de Columnas Compuestas por dos Canales o Columnas Armadas

El sistema de columnas armadas involucra dos canales, preferentemente establecidos en normas o estándares tal como AISC, uno se colocará en forma vertical y otro en la forma horizontal a este. Los mismos que serán adheridos con soldadura en toda la longitud de los canales. Este tipo de columna se utiliza con mayor frecuencia, por proporcionar mayor resistencia mecánica a la deformación.

Primero se definen las propiedades de la sección a utilizarse, de acuerdo a las tablas proporcionadas por el fabricante, a continuación se indican dichas propiedades de acuerdo a la Figura 3. 15:

- Canal vertical
- Canal horizontal
- Área total (A_t)
- Peso por unidad de longitud (P_c)
- Eje x-x
 - Momento de Inercia (I_{x-x})
 - Radio de Giro (r_{x-x})
- Eje y-y
 - Momento de Inercia (I_{y-y})

Radio de Giro

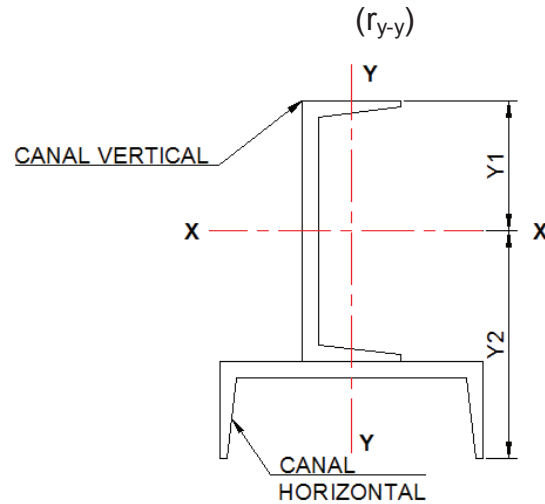


Figura 3. 15. Vista Superior de una columna armada
Fuente: el Autor

Conocidos los valores r y conocida la longitud (L_{cc}), se está en capacidad de diseñar la columna. Se considera, para efectos de diseño, que la columna está simplemente apoyada ($K=1$).

Donde, r_m = menor radio de giro de la sección

- Cuando $\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right) \leq 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e}\right] F_y \quad (3.38)$$

- Cuando $\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right) > 4.71\sqrt{E/F_y}$

$$F_{cr} = 0.877 * F_e \quad (3.39)$$

Donde

- F_e = Tensión elástica crítica de pandeo (Mpa) determinada con la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right)^2} \quad (3.40)$$

- L = longitud no arriostrada del miembro (mm),

- r = radio de giro del miembro (mm),
- E = Módulo de elasticidad (MPa),
- F_y = Mínimo esfuerzo de fluencia, (Mpa)

$$F_c = \frac{P}{A_t} = \frac{P_{cc} + (L_{cc} * P_c)}{A_t} \leq F_{cr} \quad (3.41)$$

6) De la ecuación anterior se determina la ecuación utilizada para definir la carga máxima que soporta la columna, P_{ccm} :

$$P_{ccm} = (F_{cr} * A_t) - (L_{cc} * P_c); [lb] \quad (3.42)$$

3.2.4.2.2 Diseño de columnas de sección tubular

Al igual que la sección anterior, primeramente se define las propiedades de la sección a utilizarse, de acuerdo a las tablas proporcionadas por el fabricante y a la Figura 3. 16, las propiedades son las siguientes:

- Área total (A_t)
- Peso por unidad de longitud (P_c)
- Momento de inercia (I_{x-x})
- Radio de giro (r)
- Radio exterior del tubo (R)
- Espesor de la sección (t)

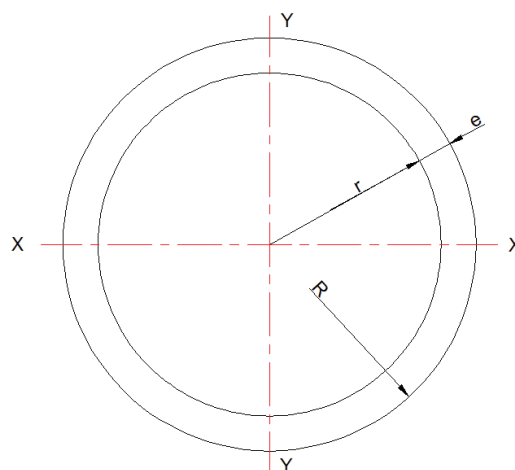


Figura 3. 16. Vista superior de una columna de sección tubular

Fuente: el Autor

Definidos estos valores y conocida la longitud de la columna L_{cc} , el procedimiento para realizar el diseño es similar al anterior, definiéndose el valor del esfuerzo permisible como se indica a continuación:

- Cuando $\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right) \leq 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y \quad (3.43)$$

- Cuando $\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right) > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$F_{cr} = 0.877 * F_e \quad (3.44)$$

Donde

- F_e = Tensión elástica crítica de pandeo (MPa) determinada con la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL_{cc}}{r_m}\right)^2} \quad (3.45)$$

- L = longitud no arriostrada del miembro (mm),
- r = radio de giro del miembro (mm),
- E = Módulo de elasticidad (MPa),
- F_y = Mínimo esfuerzo de fluencia, (Mpa)

$$F_c = \frac{P}{A_t} = \frac{P_{cc} + (L_{cc} * P_c)}{A_t} \leq F_{cr} \quad (3.46)$$

- 7) De la ecuación anterior se determina la ecuación utilizada para definir la carga máxima que soporta la columna, P_{ccm} :

$$P_{ccm} = (F_{cr} * A_t) - (L_{cc} * P_c); [lb] \quad (3.47)$$

3.2.4.3 Diseño de Bases

Las Bases de las columnas son diseñadas de manera que provean un soporte adecuado a la columna en su extremo inferior y no permitan el movimiento lateral

de las bases. Un esquema típico de un sistema de base utilizado se muestra en la Figura 3. 17 y Figura 3. 18, tanto para columna armada como para circulares.⁶²

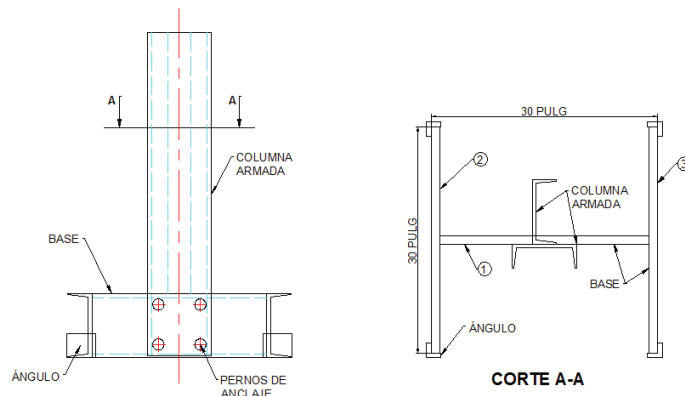


Figura 3. 17. Geometría de la base de una columna armada

Fuente: el Autor

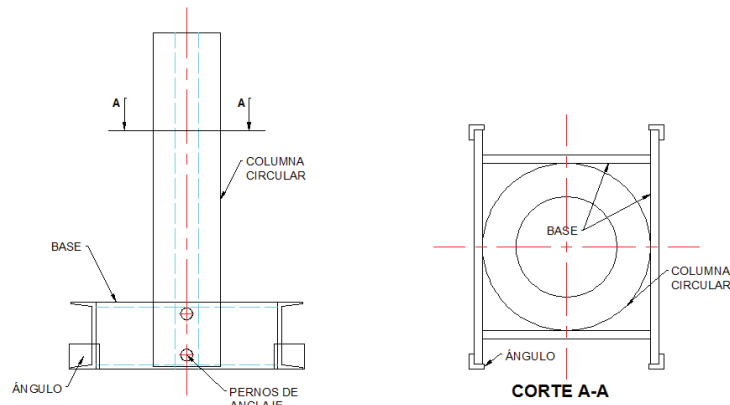


Figura 3. 18. Geometría de la base de una columna circular

Fuente: el Autor

La base de las columnas armadas está conformada, por un elemento horizontal (1) y por dos verticales (2) y (3), el canal horizontal de la columna armada se emperna al elemento (1) de la base, mientras que el canal vertical reposa sobre el ala del elemento (1), se debe recordar que los canales que forman la columna armada están soldados adyacentemente.

Además el canal horizontal debe estar empernado a una pulgada de la superficie del piso del tanque, con el objetivo de distribuir uniformemente los esfuerzos sobre toda la base, por lo tanto el elemento crítico de la base es el elemento (1).

Las bases son simplemente apoyadas sobre el fondo del tanque, para evitar el deslizamiento producto del momento se sueldan 4 ángulos (L), solidarios a las

⁶² Batallas, E. y Barrera, R. (1994). Estandarización de la Estructura para Tanques de Almacenamiento de Techo Cónico. Quito: EPN. Pág.: 110.

esquinas de las bases en los elementos (2) y (3), se ha realizado el diseño de la base en relación al gráfico anterior.

Variando el valor de carga en la columna central P_{cc} en intervalos a 3000 lb, desde un valor mínimo de 3000 lb hasta 50000 lb. Se considera al elemento (1), como una viga simplemente apoyada con carga central, a continuación en la Figura 3. 19 se detalla los diagramas de momento y cortante para este elemento:

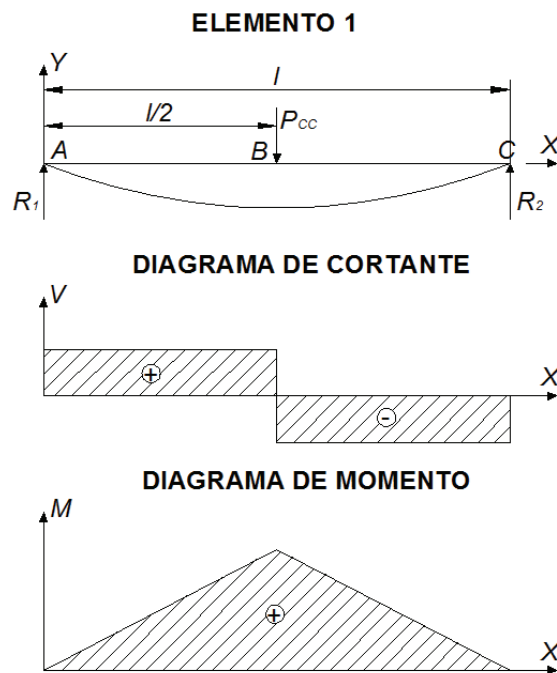


Figura 3. 19. Diagramas de cortante y momento del elemento (1)
Fuente: el Autor

Tabla 3. 3. Momento y cortante del elemento 1 para diferentes valores de carga

CARGA (Lb)	MOMENTO (Lb-pulg)	CORTANTE (Lb)
3000	22500	1500
6000	45000	3000
9000	67500	4500
12000	90000	5500
.....
.....
42000	315000	21000
45000	337500	22500
48000	360000	24000
51000	382500	25000

Fuente: Bustamante y González, 2007

Ecuaciones que gobiernan el estado del elemento 1:

$$R_1 = R_2 = \frac{P_{cc}}{2}; [lb] \quad (3.48)$$

$$V_{AB} = R_1; [lb] \quad (3.49)$$

$$V_{BC} = -R_2; [lb] \quad (3.50)$$

$$M_{AB} = \frac{P_{cc} * l}{2}; [lb - pu lg] \quad (3.51)$$

Donde, $l=30$ in.

Con estas ecuaciones se pueden encontrar los valores de reacciones, cortantes y momentos del elemento (1), tabulados en el cuadro anterior.

Se puede ver en la Tabla 3. 3, que el momento varía uniformemente en 7500 lb-in por cada 1000 lb de carga, y el cortante varía en 500 lb por cada 1000 lb de carga.

Verificando esto, se puede seleccionar los perfiles laminados en caliente a utilizarse en la base. Para ello se seguirá el procedimiento descrito en la sección 1.5.1.4 del AISC, para determinar si la sección es compacta o no, y de acuerdo a ello poder definir el esfuerzo de flexión permisible. Los pasos a seguir son⁶³:

1. El patín debe estar continuamente conectado al alma. Todas las secciones a utilizarse cumplen.
2. La relación $(b_f/2t_f)$ debe ser menor o igual a $65/\sqrt{F_y}$. Si se trabaja con perfiles A-36, se obtiene que $65/\sqrt{F_y}$ es igual a 10.8 psi. Se verifica si los perfiles a utilizarse cumplen con lo descrito anteriormente:
 - C7#9.8 : $b_f/2t_f = 2.125/(2*3/8) = 2.8 < 10.8$; por lo tanto si cumple
 - C8#11.5 : $b_f/2t_f = 2.220/(2*3/8) = 2.8 < 10.8$; por lo tanto si cumple
 - C9#13.4 : $b_f/2t_f = 2.375/(2*7/16) = 2.8 < 10.8$; por lo tanto si cumple
 - C10#15.3: $b_f/2t_f = 2.625/(2*7/16) = 2.8 < 10.8$; por lo tanto si cumple

⁶³ Batallas, E. y Barrera, R. (1994). Estandarización de la Estructura para Tanques de Almacenamiento de Techo Cónico. Quito: EPN. Pág.: 110.

- C12#20.7: $b_f/2t_f = 3.000/(2*1/2) = 2.8 < 10.8$; por lo tanto si cumple
3. La relación altura-espesor (d/t_w) del alma no debe exceder los siguientes valores:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{640}{\sqrt{F_y}} \left(1 - 3.74 \frac{f_a}{F_y} \right); \text{ cuando } \frac{f_a}{F_y} \leq 0.16 \quad (3.52)$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{257}{\sqrt{F_y}}; \text{ cuando } \frac{f_a}{F_y} > 0.16 \quad (3.53)$$

Del análisis realizado se tiene que la fuerza axial actuante sobre el miembro es cero, por lo que se aplica la ecuación (1.134), cuyo valor d/t_w es igual a 106.7. Bajo este criterio se verifica los diferentes perfiles a utilizarse en la base:

- C7#9.8 : $d/t_w = 7/(3/16) = 37.3 < 106.7$; por lo tanto si cumple.
 - C8#11.5 : $d/t_w = 8/(1/4) = 32.0 < 106.7$; por lo tanto si cumple.
 - C9#13.4 : $d/t_w = 9/(1/4) = 36.0 < 106.7$; por lo tanto si cumple.
 - C10#15.3: $d/t_w = 10/(1/4) = 40.0 < 106.7$; por lo tanto si cumple.
 - C12#20.7: $d/t_w = 12/(5/16) = 38.4 < 106.7$; por lo tanto si cumple.
4. La longitud lateral sin soporte del patín de compresión debe ser menor a:

$$L_{c1} < \frac{76 * b_f}{\sqrt{F_y}}, \text{ o, } L_{c2} < \frac{20000}{\left(\frac{d}{A_t} \right) * F_y} \quad (3.54)$$

- C7#9.8 : $L_{c1} = 76 * 2.125 / (\sqrt{36}) = 27.0 \text{ in.}$
 $L_{c2} = 20000 / (9.14 * 36) = 60.0 \text{ in.}$
- C8#11.5 : $L_{c1} = 76 * 2.250 / (\sqrt{36}) = 28.5 \text{ in.}$
 $L_{c2} = 20000 / (9.08 * 36) = 61.2 \text{ in.}$
- C9#13.4 : $L_{c1} = 76 * 2.375 / (\sqrt{36}) = 28.5 \text{ in.}$
 $L_{c2} = 20000 / (8.95 * 36) = 62.0 \text{ in.}$
- C10#15.3: $L_{c1} = 76 * 2.625 / (\sqrt{36}) = 33.3 \text{ in.}$
 $L_{c2} = 20000 / (8.81 * 36) = 63.0 \text{ in.}$
- C12#20.7: $L_{c1} = 76 * 3.000 / (\sqrt{36}) = 38 \text{ in.}$
 $L_{c2} = 20000 / (8.13 * 36) = 68.33 \text{ in.}$

De acuerdo a la verificación realizada en estos perfiles, se puede definir al esfuerzo admisible de la siguiente manera:

- C7#9.8 : $F_b = 0.60F_y = 21600 \text{ lb/in}^2$; para una longitud de 30 in.
- C8#11.5 : $F_b = 0.60F_y = 21600 \text{ lb/in}^2$; para una longitud de 30 in.
- C9#13.4 : $F_b = 0.66F_y = 23760 \text{ lb/in}^2$; para una longitud de 30 in.
- C10#15.3 : $F_b = 0.66F_y = 23760 \text{ lb/in}^2$; para una longitud de 30 in.
- C12#20.7 : $F_b = 0.66F_y = 23760 \text{ lb/in}^2$; para una longitud de 30 in.

Donde $F_y = 36 \text{ KSI} = 36 \text{ Klb/in}^2 = 36000 \text{ lb/in}^2$; acero A-36.

Determinados los esfuerzos permisibles y conocido el diagrama de carga actuante sobre la viga en diseño, se puede determinar los momentos máximos que pueden soportar los diferentes perfiles a utilizarse.

- C7#9.8 : $M_{\text{máx}} = F_b \cdot S_{xx} = 21600 \cdot 6.08 = 131328 \text{ lb-in.}$
- C8#11.5 : $M_{\text{máx}} = F_b \cdot S_{xx} = 21600 \cdot 8.14 = 175824 \text{ lb-in.}$
- C9#13.4 : $M_{\text{máx}} = F_b \cdot S_{xx} = 23760 \cdot 10.6 = 251856 \text{ lb-in.}$
- C10#15.3 : $M_{\text{máx}} = F_b \cdot S_{xx} = 23760 \cdot 13.5 = 320760 \text{ lb-in.}$
- C12#20.7 : $M_{\text{máx}} = F_b \cdot S_{xx} = 23760 \cdot 21.5 = 510840 \text{ lb-in.}$

5. En el diseño de las bases circulares el espesor de la corona circular no debe exceder en la siguiente relación $3300/F_y$, donde F_y en KSI. Se verifica este valor y los puntos anteriores que sean análogos para las bases de columnas de esta sección.

Con esto se ha definido los perfiles a utilizarse en la base, en la Tabla 3. 4 se resume los diferentes cálculos realizados y que se estandariza a continuación:

Tabla 3. 4. Estandarización de las bases de columnas

PERFIL DE LA BASE	CARGA MÁXIMA [LB]
C7#9.8	17510.4
C8#11.5	23443.2
C9#13.4	33580.2
C10#15.3	42768
C12#20.7	69204.3

Fuente: Batallas y Barrera, 1994

3.2.4.4 Diseño de las Cartelas⁶⁴

Los elementos que unen o conectan las correas exteriores de la estructura con el cuerpo o pared del tanque se llaman cartelas, son placas diseñadas para soportar las cargas que generan estas correas. Esquemas de la disposición de estas cartelas sobre el tanque y de carga se muestran en la Figura 3. 20 y Figura 3. 21:

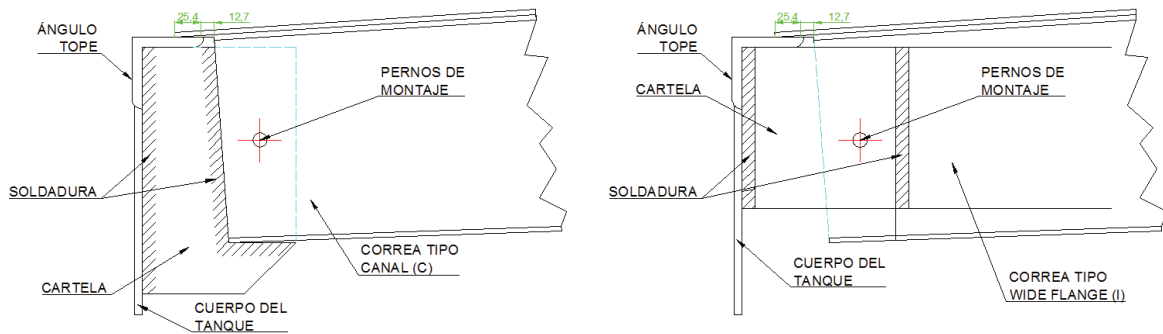


Figura 3. 20. Disposición de las cartelas sobre el tanque

Fuente: el Autor

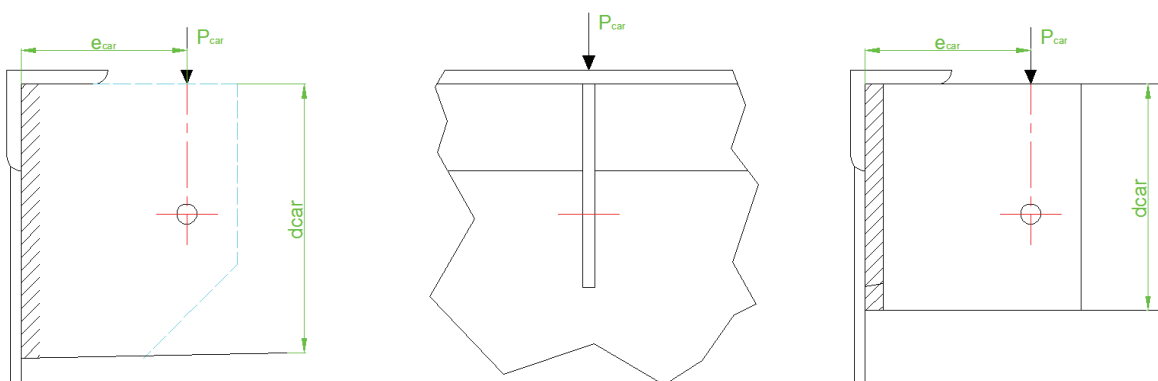


Figura 3. 21. Esquema de carga sobre las cartelas

Fuente: el Autor

Al observar la Figura 3. 20 y Figura 3. 21, la soldadura va a soportar una carga excéntrica, debido a que la carga en la cartela no pasa por el centro de gravedad de la soldadura. Esta excentricidad genera un cortante y un momento, por lo que la fuerza actuante sobre la soldadura será la suma de los vectores que generan tanto la fuerza cortante como el momento.

⁶⁴ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 134-139.

3.2.4.4.1 Definición geométrica de las Cartelas

Previa a la elaboración de un procedimiento de diseño, se debe definir la geometría de la cartela. La Figura 3. 22 y Figura 3. 23 indican la forma en que se definen estos elementos.

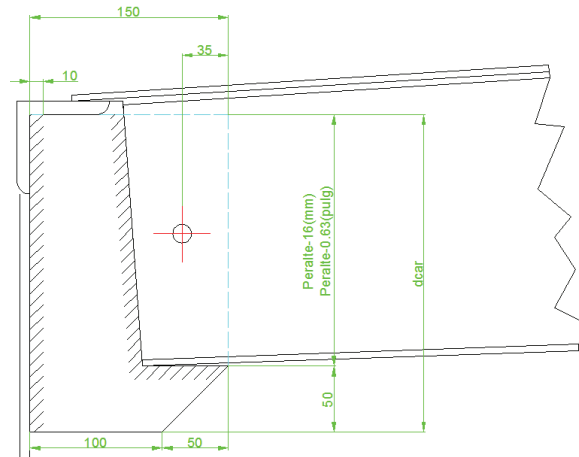


Figura 3. 22. Geometría de la cartela para correas tipo canal
Fuente: el Autor

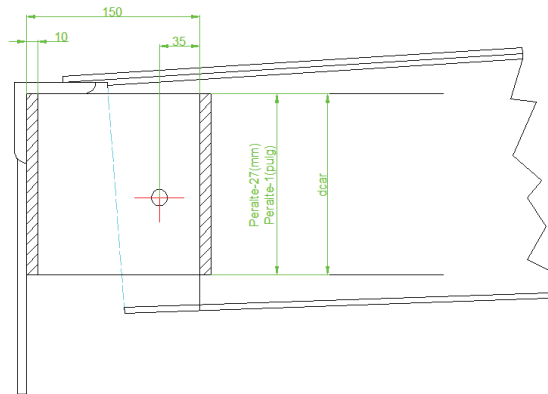


Figura 3. 23. Geometría de la cartela para correas tipo ala ancha I
Fuente: el Autor

Dónde:

- d_{car} : corresponde a la longitud de la soldadura.
 - Para correas tipo canal (C), $d_{car} = \text{Peralte de la correa} + 34 \text{ m}$.
 - Para correas tipo Wide flange (I), $d_{car} = \text{Peralte de la correa} - 27 \text{ m}$.
- Φ : diámetro mínimo del agujero de montaje, cuya carga se la determina tomando el peso propio de la correa por unidad de longitud, con

una longitud de 30 ft. (9.144 mm) para correas tipo canal y 40 ft. (12.192 mm) para correas tipo I, adicionando 1/16" (1.6 mm) al diámetro, que es el valor recomendado para los agujeros de los pernos.⁶⁵.

Estos valores se pueden ver en la Tabla 3. 5:

Tabla 3. 5. Valores de d_{car} y ϕ para correas tipo Canal y tipo Ala Ancha I

TIPO DE CORREA (CANAL)	d_{car}		ϕ	
	[mm]	[pulg]	[mm]	[pulg]
C3#4.1	110.2	4.3	6.4	1/4
C4#5.4	135.6	5.3	6.4	1/4
C5#6.7	161	6.3	7.9	5/16
C6#8.2	186.4	7.3	7.9	5/16
C7#9.8	211.8	8.3	7.9	5/16
C8#11.5	237.2	9.3	9.5	3/8
C9#13.4	262.6	10.3	9.5	3/8
C10#15.3	288	11.3	9.5	3/8
C12#20.7	338.8	13.4	11.1	7/16
WF6#9	125.4	5.0	9.5	3/8
WF8#10	176.2	7.0	9.5	3/8
WF10#12	227.0	9.0	9.5	3/8
WF12#14	277.8	11.0	11.1	7/16
WF12#16	277.8	11.0	11.1	7/16
WF14#22	328.6	13.0	12.7	1/2

Fuente: Bustamante y González, 2007

3.2.4.4.2 Procedimiento de diseño de Cartelas

En las tablas del anexo 8. Resultados de diseño de las cartelas para la estructura soportante, se ha determinado las cargas que transmiten las correas exteriores a las cartelas, carga que se ha designado como carga en cartela y que se abreviará como P_{car} . Esta carga está aplicada excéntricamente en relación al centro de gravedad de la soldadura y crea un momento M_{car} igual a la P_{car} multiplicado por el brazo de excentricidad e_{car} . Los esfuerzos máximos debido al momento y a los esfuerzos uniformes calculados como componentes separados de un esfuerzo único resultante. El valor de esta resultante está limitada a un valor permisible f_R de un tamaño de soldadura dado.

Considérese una placa como la mostrada en la Figura 3. 21. Esquema de carga sobre las cartelas, con una longitud d_{car} cargada excéntricamente de forma

⁶⁵ AISC. (1982). Manual of Steel Construction. Chicago: AISC. Pág.: 4-5.

paralela a su longitud. Nótese que el momento $P_{car} * e_{car}$ tiende a rotar la soldadura alrededor de su centro de gravedad.

Las diferentes componentes aplicadas a las soldaduras son tratadas como cargas por pulgada lineal de soldadura. De este modo, el esfuerzo cortante uniforme por pulgada de longitud debida a la carga aplicada es:

$$f_1 = \frac{P_{car}}{2 * d_{car}}; \left[\frac{lb}{pulg} \right] o \left[\frac{kg}{mm} \right] \quad (3.55)$$

El esfuerzo máximo, cortante por pulgada de soldadura debido al momento es igual a:

$$f_m = M_{car} * \frac{c}{I} = \frac{P_{car} * e_{car}}{S} \quad (3.56)$$

Donde, S es el módulo de sección igual a I/c .

El esfuerzo de soldadura esta dado en carga por pulgada, cada soldadura es tratada como una línea, la misma que tiene una longitud d_{car} y un eje de rotación para el momento con referencia a su centro de gravedad localizado a $d_{car}/2$.

Se define la distancia al centro de gravedad como $c = d_{car}/2$ y el momento de inercia como $I = d_{car}^3/12$ (momento de inercia de la unión soldada a filete), por lo que el módulo de sección es:

$$S = \frac{I}{c} = \frac{d_{car}^2}{6} \quad (3.57)$$

El cortante máximo por pulgada de longitud debido al momento es:

$$f_m = \frac{\frac{P_{car} * e_{car}}{2}}{\frac{d_{car}^2}{6}} = \frac{3 * P_{car} * e_{car}}{d_{car}^2}; \left[\frac{lb}{pulg} \right] o \left[\frac{kg}{mm} \right] \quad (3.58)$$

Establecidas las relaciones para las dos componentes, la resultante es:

$$f_R = \sqrt{(f_1)^2 + (f_m)^2}; \left[\frac{lb}{pulg} \right] o \left[\frac{kips}{pulg} \right] o \left[\frac{kg}{mm} \right] \quad (3.59)$$

Dependiendo de la resistencia del tipo de electrodo a utilizarse, y conocido el valor de f_R , se puede seleccionar el tamaño de la soldadura con ayuda de la Tabla 3. 6:

Tabla 3. 6. Resistencia del electrodo

RESISTENCIA DEL ELECTRODO (KSI)	F _v (KSI)	f _R (Kip/in.lineal)
60	18	0.796D
70	21	0.928D
80	24	1.061D
90	27	1.193D
100	30	1.326D
110	33	1.458D

Fuente: AISC Structural Steel Detailing

Dónde:

- F_v: esfuerzo cortante permisible de la soldadura.
- f_R: está basado en la dimensión normal de la raíz.
- D: tamaño de la soldadura por 1/16, en in.

Con referencia a la Tabla 3. 7, se puede determinar el espesor mínimo de la cartela, de manera que, se evita sobreesfuerzo en el metal base:

Tabla 3. 7. Espesor mínimo t en pulgadas de material, para balancear la carga de tensión y cortante inducida por soldaduras de filete de penetración normal

TIPO DE ELECTRODO		GRADO 60, F _v = 18 KSI									
M A T E R I A L U N I Ó N	Tamaño Soldadura (in)	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2	5/8	3/4	1
	Tensión: F _t = 20.0	0.16	0.24	0.32	0.40	0.48	0.56	0.64	0.80	0.96	1.27
	Cortante: F _v = 13.0	0.25	0.37	0.49	0.61	0.74	0.86	0.98	1.23	1.47	1.96
	Tensión: F _t = 22.0	0.15	0.22	0.29	0.36	0.43	0.51	0.58	0.72	0.87	1.16
	Cortante: F _v = 14.5	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88	1.10	1.32	1.76
	Tensión: F _t = 25.2	0.13	0.19	0.25	0.32	0.38	0.44	0.51	0.63	0.76	1.01
	Cortante: F _v = 17.0	0.19	0.28	0.38	0.47	0.56	0.66	0.75	0.94	1.12	1.5
	Tensión: F _t = 27.0	0.12	0.18	0.24	0.30	0.35	0.41	0.47	0.59	0.71	0.94
	Cortante: F _v = 18.0	0.18	0.27	0.35	0.44	0.53	0.62	0.71	0.88	1.06	1.42
	Tensión: F _t = 30.0	0.11	0.16	0.21	0.27	0.32	0.37	0.43	0.53	0.64	0.85
	Cortante: F _v = 20.0	0.16	0.24	0.32	0.40	0.48	0.56	0.64	0.80	0.96	1.27

Fuente: AISC Structural Steel Detailing

Nota: la soldadura está especificada para procesos distintos al arco sumergido.

Los cálculos de espesor de las cartelas, para diferentes diámetros de tanques, son tabulados en el anexo 8. Como resultado se puede definir un espesor seguro de cartela de 6.4 mm ($\frac{1}{4}$ in), con soldadura de Φ 3.2 mm ($\frac{1}{8}$ in) de 60 kips de resistencia.

3.2.4.5 Diseño del Disco Central⁶⁶

La parte superior de la columna está formada por un disco sobre el que se apoyaran las correas, el mismo que está diseñado para soportar las cargas que generan éstas y que se lo define como una placa de sección circular. Un esquema de la disposición de este disco se puede ver en la Figura 3. 24:

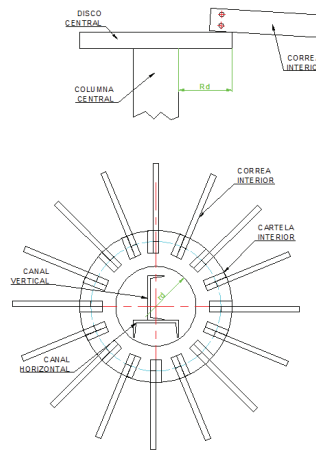


Figura 3. 24. Disposición del disco de la columna central

Fuente: el Autor

Las fórmulas de cálculo para la placa circular son extremadamente complicadas y la aplicación de las ecuaciones que se generan se dificulta por el hecho de que siempre debe hallarse constantes de integración, a partir de las condiciones de apoyo, para luego resolver complicadas ecuaciones: es por eso que para la solución de los diferentes tipos de placas se utilizaran fórmulas obtenidas a partir de los métodos exactos que proporciona la teoría de la elasticidad.⁶⁷

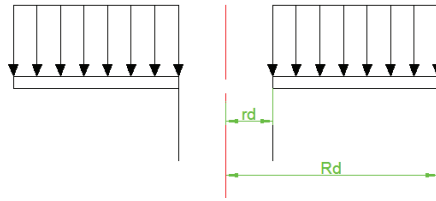
3.2.4.6 Procedimiento de Cálculo del Disco

Para poder definir el diámetro y espesor del disco a utilizarse se necesita conocer la altura y el diámetro del tanque. Los esquemas de cálculo de placas a utilizarse

⁶⁶ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 140-143.

⁶⁷ Fernández, G. (1983). Resistencia de Materiales, Tomo II. La Habana: Editorial Pueblo y Educación. Pág.: 262-278.

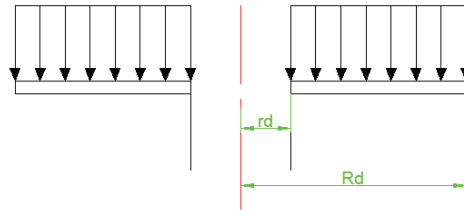
se muestran en la Figura 3. 25 (a y b), y su aplicación dependerá del radio de la placa.



$$\sigma_{m\acute{a}x} = Kq \frac{R_d^2}{h}$$

$$q = \frac{P_{cc}}{A_c}$$

(a). Discos de radio menor a 381 mm



$$\sigma_{m\acute{a}x} = Kq \frac{R_d^2}{h}$$

$$q = \frac{P_{cc}}{A_c}$$

(b). Discos de radio mayor a 381 mm

Figura 3. 25. Esquema de cálculo para Disco Central
Fuente: el Autor

Conocidos estos datos se puede definir el procedimiento de cálculo del disco es el siguiente:

3.2.4.6.1 Determinación del radio exterior de la placa R_d .

El radio del disco se lo determina en base a la siguiente ecuación:

$$R_d = \frac{N(b_f + 1.2)}{2\pi} + 13; [cm] \quad (3.60)$$

Dónde:

- R_d = radio exterior del disco, en cm, no menor al radio de la columna más 2.5 cm.
- N = número de correas seleccionadas.

- b_f = ancho del patín a utilizarse, en cm.

Tabla 3. 8. Valor del ancho del patín de correas Tipo Canal C y Ala Ancha WF o Perfil I

Tipo de Correa Interior	bf [pulg]	bf [cm]
C3 # 4.1	1.41	3.5814
C4 # 5.4	1.584	4.02336
C5 # 6.7	1.75	4.445
C6 # 8.2	1.92	4.8768
C7 # 9.8	2.09	5.386
C8 # 11.5	2.26	5.7404
C9 # 13.4	2.433	6.17982
C10 # 15.3	2.6	6.604
C12 # 20.7	2.942	7.47268
WF 6x9	3.94	10.0076
WF 8x10	3.94	10.0076
WF 10x12	3.96	10.0584
WF 12x14	3.97	10.0838
WF 12x16	3.99	10.1346
WF 14x22	5	12.7

Fuente: Bustamante y González, 2007

3.2.4.6.2 Determinación del radio interior de la placa r_d

El radio interior del disco es una función del tipo de columna a utilizarse. Para columnas tubulares el radio interior es el radio exterior del tubo, y para secciones armadas se define al radio interior del disco como la distancia del centro de gravedad de la sección al extremo del perfil, datos que se resumen en el anexo 9. Determinación del radio interior (r_d) del disco, para columnas armadas.

3.2.4.6.3 Determinación del espesor de la placa.

Para determinar el espesor de la placa tenemos las siguientes condiciones:

1. Si $R_d \leq 381$ mm (15 pulg), se utiliza el esquema de la Figura 3. 25 (a), y el espesor del disco se define por:

$$h = \sqrt{1.5 * \frac{K * P_{cc} * R_d^2}{\sigma_{perm} * A_c}}; [cm] \quad (3.61)$$

Dónde:

h = espesor del disco [cm].

P_{cc} = Carga en la columna central, [Kg].

σ_{perm} = Esfuerzo permisible = $0.6F_y$, [Kg/cm²].

A_c = Área calculada = $\pi(R_d^2 - r_d^2)$ [cm²].

K = Constante que se determina en base a la relación R_d/r_d , de la Tabla 3. 9:

Tabla 3. 9. Cálculo de la relación R_d/r_d , para $R_d < 381$ mm

Rd / rd	1.25	1.5	2	3	4	5
K	0.135	0.41	1.04	2.15	2.99	3.69

Fuente: Bustamante y González, 2007

2. Si $R_d > 381$ mm (15 pulg), se utiliza la Tabla 3. 10:

Tabla 3. 10. Cálculo de la relación R_d/r_d , para $R_d > 381$ mm

Rd / rd	1.25	1.5	2	3	4	5
K	0.122	0.336	0.740	1.210	1.450	1.590

Fuente: Bustamante y González, 2007

Para el cálculo del espesor del disco h se utiliza también la ecuación (3.61).

Dónde:

h = espesor del disco [cm].

P_{cc} = Carga en la columna central, [Kg].

σ_{perm} = Esfuerzo permisible = $0.6F_y$, [Kg/cm²].

A_c = Área calculada = $\pi(R_d^2 - r_d^2)$ [cm²].

K = Constante que se determina en base a la relación R_d/r_d , de la Tabla 3. 9 y Tabla 3. 10.

CAPÍTULO 4

4 DESARROLLO DE LA HOJA DE CÁLCULO ELECTRÓNICA

Este capítulo se refiere a la forma de uso de la hoja de cálculo para el diseño de tanques de lavado utilizando la aplicación de Microsoft Office para hojas de cálculo Excel. Este permite elaborar tablas y formatos que incluyan cálculos matemáticos mediante fórmulas; las cuales pueden usar operadores matemáticos (suma, resta, multiplicación, división y exponenciación); además de poder utilizar elementos denominados funciones (especie de fórmulas, pre-configuradas) como por ejemplo: Suma(), Promedio(), BuscarV(), etc.

PEC Cía. Ltda. En su afán de crecer como empresa necesita un programa que realice el diseño para tanques de lavado con deflectores internos, para lo cual se ha desarrollado esta hoja de cálculo que permite obtener un resumen e informa completo del diseño.

En este capítulo se explicará el uso de la hoja de cálculo con la ayuda de un ejemplo ilustrativo.

4.1 COMPOSICIÓN DEL LIBRO DE CÁLCULO

El libro de cálculo está constituido por 11 hojas de cálculo, la Hoja de diseño y la de Resumen están visibles, las restantes se encuentran ocultas para que no puedan existir modificaciones que puedan alterar el buen funcionamiento de todo el libro. Las hojas son:

- 1) Hoja de Diseño
- 2) Cálculo de espesores
- 3) Placa Anular y Fondo
- 4) Peso Cuerpo, Techo y Fondo
- 5) Vigas Intermedias
- 6) Anillos de Refuerzo
- 7) Cargas y Diseño por Sismo
- 8) Anclajes

- 9) Estructura Soportante del Techo
- 10) Diseño de Proceso y Deflectores
- 11) Resumen

Además existen otras hojas que sirven como bases de datos que ayudan al diseño.

4.2 PROCEDIMIENTO DE USO DEL LIBRO DE CÁLCULO

Para explicar la forma de uso del libro de cálculo a continuación se enumeran cada uno de los pasos a seguir con la realización de un ejemplo práctico:

Se pide diseñar un tanque de lavado con deflectores internos con los datos generales que se indican en la Tabla 4. 1:

Tabla 4. 1. Datos generales del ejemplo ilustrativo

Capacidad del tanque	C	[barriles]	8000
Tiempo de Retención del Crudo	tr	[min]	360
Gravedad Específica del Crudo	SGo		0.89
Gravedad Específica del Agua	SGw		1
Densidad	δ	[lb/pe ³]	85
Corte de Agua BS&W	Wc	[%]	0.01
Viscosidad Cinemática del Crudo	μ_o	[cp]	30
Viscosidad Cinemática del Agua	μ_w	[cp]	300
Caudal de Ingreso al Tanque	Qo	[m ³ /h]	10
Temperatura inicial del Crudo	Ti	[°C]	25
Temperatura de Operación	Te	[°C]	70
Presión Interna de Diseño	P	[lbf/plg ²]	
Presión Externa (Presión de Vacío)	Pe	[lbf/plg ²]	0.046
Velocidad del Viento	V	[mph]	25

Fuente: el Autor

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. En la hoja de cálculo **HOJA DE DISEÑO**, es donde se realiza todo el diseño en si del tanque, todos los datos son calculados en las otras hojas y enviados a esta hoja principal. Se empieza ingresando todos los datos de diseño que son proporcionados por el cliente. Como se indica en la Figura 4. 1.

DATOS DE DISEÑO			
Capacidad del tanque	C	[barriles]	8000
Tiempo de Retención del Crudo	tr	[min]	360
Gravedad Específica del Crudo	SGo		0,89
Gravedad Específica del Agua	SGw		1
Densidad	δ	[lb/pie ³]	85
Porcentaje de Crudo a la Entrada al Tanque	%O	[%]	
Porcentaje de Agua a la Entrada al Tanque	%W	[%]	
Corte de Agua BS&W	Wc	[%]	0,01
Viscosidad Cinemática del Crudo	μ_o	[cp]	30
Viscosidad Cinemática del Agua	μ_w	[cp]	300
Caudal de Ingreso al Tanque	Qo	[m ³ /h]	10
Temperatura inicial del Crudo	Ti	[°C]	25
Temperatura de Operación	Te	[°C]	70
Presión Interna de Diseño	P	[lbf/plg ²]	
Presión Externa (Presión de Vacío)	Pe	[lbf/plg ²]	0,046
Velocidad del Viento	V	[mph]	25

Figura 4. 1. Lugar donde se deben ingresar los datos de diseño
Fuente: el Autor

2. En la parte de Materiales (Figura 4. 2) se procede a seleccionar la clase de acero que va a estar compuesto cada uno de los siguientes elementos:

- Láminas del fondo.
- Láminas del cuerpo.
- Láminas del techo.
- Ángulo unión techo cuerpo.
- Perfiles estructurales.

MATERIALES				
LÁMINAS DEL FONDO				
A 36M				
Cor	A 131M G EH36	CA	[pulg]	0.125
Esfu	A 573M G 400	Fy	[psi]	36000
Res	A 573M G 485	Fu	[psi]	58000
Esfu	A 516M G 380	Sd	[psi]	23200
Esfu	A 516M G 415	St	[psi]	24900
Esfu	A 516M G 450			
	Esfuerzo Permisible de Pueba Hidrostática			
LÁMINAS DEL CUERPO				
A 36M				
	Corrosión Admisible	CA	[pulg]	0.0625
	Esfuerzo mínimo de fluencia	Fy	[psi]	36000
	Resistencia Mínima	Fu	[psi]	58000
	Esfuerzo Permisible de Diseño	Sd	[psi]	23200
	Esfuerzo Permisible de Pueba Hidrostática	St	[psi]	24900

Figura 4. 2. Selección de materiales
Fuente: el Autor

Para la selección del material se debe desplegar la pestaña de cada elemento y seleccionar el tipo de acero, como se indica en la Figura 4. 2.

3. Luego, en la parte de Diseño de Procesos, se ingresan los siguientes datos:

- a. En la sección Ecuación de sedimentación (Figura 4. 3) se ingresa el ancho efectivo del canal de flujo w . Este dato es al azar y no es proporcionado por el cliente.

ECUACIÓN DE SEDIMENTACIÓN

En los tanques de lavado con baffles internos que utilizan un flujo horizontal para la separación, las gotas de agua se asientan perpendicularmente al flujo de aceite. Al establecer el tiempo de retención de aceite igual al tiempo de asentamiento de agua, se puede usar la siguiente ecuación:

$$wL_{\text{eff}} = 800 \left(\frac{Q_o H_o}{(\Delta SG) d_m^2} \right)$$

Se selecciona un ancho de flujo efectivo del canal w para poder calcular una longitud efectiva de separación L_{eff} .

Ancho efectivo del canal	w	[pulg]	156
Longitud efectiva	L_{eff}	[ft]	100.4495324

Ingresar ancho efectivo de canal de flujo

Figura 4. 3. Ingreso de dato ancho efectivo del canal de flujo w
Fuente: el Autor

A continuación se verifica si el diseño del proceso está bien realizado, para lo cual, si el cuadro que se indica en la siguiente figura está de color verde y se lee “VALORES CALCULADOS CUMPLEN CON EL DISEÑO” (Figura 4. 4), el diseño es correcto; pero, si el cuadro es de color rojo y dice “NO CUMPLE CON EL DISEÑO”, se selecciona otro valor de ancho efectivo de canal de flujo.

Seleccionar una combinación de w_{real} y L para que la h calculada sea menor que la mitad del ancho de flujo, para que el diseño del proceso sea el correcto.

Longitud de separación disponible	L	[ft]	133.9327099
Ancho real del canal	w_{real}	[pulg]	195
Altura efectiva del canal de flujo	h	[pulg]	19.42078667

VALORES CALCULADOS CUMPLEN CON EL DISEÑO

Cuadro de Verificación de Diseño de Procesos

Figura 4. 4. Verificación del diseño del proceso
Fuente: el Autor

- b. Para la sección Dimensionamiento del Tanque, se debe ingresar el dato de diámetro del tanque y altura del tanque, de acuerdo al análisis que se indica en el punto 3.1.1 numerales 8 y 9, como se indica en la Figura 4. 5.

DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE

Diámetro del Tanque

De acuerdo al Longitud de separación disponible L y el ancho de flujo real w_{real} .

Diámetro del tanque	D	[ft]	65
---------------------	---	------	----

Diámetro del Tanque.	D	[ft]	65
----------------------	---	------	----

Altura del Tanque

Conociendo la capacidad del tanque C y el diámetro del tanque D, podemos realizar el cálculo de la altura del tanque H_{calc} de acuerdo a la siguiente fórmula proporcionada por el Estándar API 650:

$$C = 0.14 * D^2 * H$$

$$H = \frac{C}{0.14 * D^2}$$

Altura del tanque calculada	H _{calc}	[ft]	13.5249366
-----------------------------	-------------------	------	------------

Altura del tanque seleccionada	H	[ft]	16
--------------------------------	---	------	----

Altura del Tanque.	H	[ft]	16
--------------------	---	------	----

Ingreso de Diámetro seleccionado de tanque

Ingreso de Altura seleccionada de tanque

Figura 4. 5. Ingreso de diámetro y altura del tanque
Fuente: el Autor

4. Para el Diseño del Fondo del Tanque:

- a. Primero se selecciona el espesor de la lámina del fondo del tanque sin corrosión admisible (CA), de acuerdo a lo que recomienda el API 650 y de acuerdo al tipo de material del que va a estar compuesto. Se ha puesto una serie de espesores estandarizados. Luego se selecciona el espesor (e) adecuado que sea mayor o igual que el espesor lámina del fondo con CA (e_{fondo}), como se indica en la Figura 4. 6.

DISEÑO DEL FONDO DEL TANQUE			
En el punto 5.4 del API 650 (2007), restringe que todas las láminas del fondo deben tener un mínimo espesor de 6 mm (1/4 in) libre del espesor de corrosión especificado por el comprador, el ancho no de las láminas debe ser de 1800 mm (72 in).			
Espesor lámina del fondo sin CA	tb	[pulg]	0.19
Corrosión admisible	CA	[pulg]	0.125
Espesor lámina del fondo con CA	Efondo	[pulg]	0.31
Espesor seleccionado de lámina	e	[pulg]	0.375
Espesor del fondo del tanque.	e	[pulg]	0.375

Selección de espesor de lámina del fondo sin CA

Selección de espesor de lámina del fondo final con CA

Figura 4. 6. Diseño del fondo del tanque

Fuente: el Autor

- b. Para el peso de las planchas del fondo del tanque, se selecciona la longitud de la lámina (medidas estandarizadas), el ancho de la lámina y el espesor de las planchas, como se indica en la Figura 4. 7.

PESO PLANCHAS DEL FONDO DEL TANQUE		
Longitud de plancha	[pulg]	236
Ancho de plancha	[pulg]	96
Espesor planchas fondo	[pulg]	3/8
Peso por pie cuadrado	[lb/pie2]	15.332985
Peso por pulgada cuadrada	[lb/pulg2]	0.1064791
Área del fondo del tanque	[pulg2]	477836.24
Peso planchas fondo del tanque	[lb]	50879.555
Peso Planchas del Fondo del Tanque	[lb]	50879.55498

Selección de datos para cálculo de peso del fondo del tanque

Figura 4. 7. Peso planchas del fondo del tanque

Fuente: el Autor

5. Para el cálculo de espesores se realiza lo siguiente:
- Selección el ancho de la lámina del cuerpo, para poder calcular el número de anillos del que va a estar compuesto el tanque, como indica la Figura 4. 8.

CÁLCULO DE ESPEORES			
NÚMERO DE ANILLOS DEL TANQUE			
Altura del Tanque	H	[pies]	16
Ancho de placa promedio	AP	[pulg]	48
Ancho de placa promedio	AP	[pies]	4
Número de anillos	n	[anillos]	4
Número de anillos del tanque			[n] [anillos] 4

SELECCIONAR ANCHO DE PLANCHA PROMEDIO

Figura 4. 8. Cálculo del número de anillos del tanque

Fuente: el Autor

- b. Luego, se selecciona el método por el cual se va a realizar el cálculo de los espesores de las láminas que conforman los 4 anillos del tanque, y se escoge un espesor estandarizado que sea mayor al espesor calculado. Como indica la Figura 4. 9.

ESPEORES CALCULADOS			
ANILLO	ESPESOR CALCULADO		ESPESOR SELECCIONAD
	[pulg]	[mm]	O [pulg]
Espeor del primer anillo t1	0.1663039	4.2241185	0.25
Espeor del segundo anillo t2	0.1386228	3.5210203	0.1875
Espeor del tercer anillo t3	0.1109418	2.817922	0.125
Espeor del cuarto anillo t4	0.0832608	2.1148237	0.125

Método de Un Pie

Método de Un Pie

Método del Punto Variable

Selecccionar método de cálculo de espesores

Selecccionar espesor de lámina estandarizado de cada uno de los anillos

Figura 4. 9. Cálculo de espesores

Fuente: El Autor

- c. Para el cálculo del peso del cuerpo del tanque, se selecciona la longitud de la plancha y el ancho de la plancha. Como indica la Figura 4. 10.

PESO DEL CUERPO DEL TANQUE			
LONGITUDES DE PLANCHA			
Longitud de plancha	[pulg]	96	SELECCIONAR LONGITUD DE LA PLANCHA
Ancho de plancha	[pulg]	48	
PESOS DE ANILLOS			
ANILLO	PESO [lb]	PESO [kg]	
Peso primer anillo	8344.4457	3784.9738	
Peso segundo anillo	5585.2737	2533.4355	
Peso tercer anillo	4166.3665	1889.8305	
Peso cuarto anillo	4166.3665	1889.8305	
PESO TOTAL CUERPO	WS	22262.452	10098.07

Figura 4. 10. Peso del cuerpo del tanque
Fuente: el Autor

6. Para el diseño del techo del tanque:
 - a. Seleccionar el espesor del techo.

DISEÑO TECHO DEL TANQUE			
Para el techo, el estándar API 650 recomienda dos espesores, 3/16 (0.1875) pulg y 1/4 (0.25) de pulg, para los cuales tiene la carga muerta asignada:			
Espesor del techo	th	[pulg]	0.1875
Carga Muerta asignada	Cm	[lb/p	0.1875 0.25
CA del techo	CA	[pulg]	0.0625
Espesor del techo seleccionado	th	[pulg]	0.1875
Espesor del Techo con CA	th	[pulg]	0.25

Figura 4. 11. Selección espesor para el techo del tanque
Fuente: el Autor

- b. Seleccionar la longitud de la plancha, ancho de la plancha y espesor para calcular el peso del techo del tanque.
7. Para cálculo de refuerzos de viento intermedios o viga intermedia:
 - a. Seleccionar el espesor del último anillo que conforma el tanque, es decir, el superior para calcular la altura no rigidizada H (Figura 4. 12), que es la distancia vertical, entre la viga intermedia de viento y el ángulo tope o superior.

REFUERZOS DE VIENTO INTERMEDIOS			
De acuerdo al Estándar API 650 subsección 5.9.7, para saber si se debe o no usar vigas intermedias primero se calcula la altura máxima no rigidizada con la siguiente ecuación (p. 5-67):			
ALTURA NO RIGIDIZADA			
$H_1 = 600000t \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 \left(\frac{120}{V}\right)^2}$			
Donde:			
Espesor del último anillo	t	[pulg]	0.125
ELEGIR EL ESPESOR DEL ÚLTIMO ANILLO CALCULADO ANTERIORMENTE			
Altura Máxima no Rigidizada	H1	[pies]	145.72656

Figura 4. 12. Cálculo de altura no rigidizada

Fuente: el Autor

- b. Ingresar la altura transformada del cuerpo, que se calcula como en el punto 2.3.2, como indica la Figura 4. 13.

ALTURA TRANSFORMADA			
Se debe calcular la altura transformada para cada anillo para lo cual se utiliza lo siguiente:			
$W_{tr} = W \sqrt{\left(\frac{t_{uniforme}}{t_{actual}}\right)^5}$			
Donde:			
Wtr = ancho transpuesto de cada anillo, en pulgadas.			
W = ancho actual de cada anillo, en pulgadas.			
tuniforme = Espesor del anillo en el tope como se construyo, en pulgadas.			
tactual = Espesor del anillo analizado como se construyo, en pulgadas.			
Cabe recalcar que se puede considerar el ancho de cada uno de los anillos o calcular con la fórmula anterior el ancho transpuesto para cada anillo. Se puede considerar la altura del tanque H			
Altura transformada del cuerpo	Ht	[pies]	16
INGRESAR EL DATO DE ALTURA TRANSFORMADA DEL CUERPO			
Altura Transformada del cuerpo	Ht	[pies]	16

Figura 4. 13. Altura transformada del cuerpo

Fuente: el Autor

- c. Verificar las condiciones para viga intermedia, si los dos recuadros están de color verde no se requiere de vigas intermedias, pero si los dos recuadros se encuentran de color rojo, hay que desplegar la pestaña que se indica en la Figura 4. 14.

507 **CONDICIONES PARA VIGA INTERMEDIA**

508

509 • Si la altura Transformada del cuerpo H_t , es mayor que la máxima altura no rigidizada H_1 entonces la viga intermedia es necesaria.

510

511	Altura transformada del cuerpo	H_t	[pies]	16
512	Altura máxima no rigidizada	H_1	[pies]	145.7265632

513

514	$H_t < H_1$	NO SE REQUIERE VIGA INTERMEDIA		
-----	-------------	--------------------------------	--	--

515

516

517 • Si la mitad de la altura transformada del cuerpo $H_t/2$, es mayor que la máxima altura no rigidizada H_1 entonces se colocará una segunda viga intermedia.

518

519	Mitas de altura transformada del	$H_t/2$	[pies]	8
520	Altura máxima no rigidizada	H_1	[pies]	145.7265632

521

522	$H_t/2 < H_1$	NO SE REQUIERE UNA SEGUNDA VIGA INTERMEDIA		
-----	---------------	--	--	--

523

524

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545

546

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

566

567

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

598

599

600

3 x 3 x 3/8

Pestaña para desplegar

Recuadro

Figura 4. 14. Condiciones para viga intermedia

Fuente: el Autor

Si fuera el caso, de que se requiera una viga intermedia se despliega lo que se indica en la Figura 4. 15. En esta parte se selecciona el espesor del último anillo o superior y se escoge el perfil estructural, si el recuadro es de color verde el perfil es correcto y si es de color rojo se selecciona otro perfil.

Módulo Mínimo de Sección de la Viga Intermedia	Z	[pulg ³]	0.267228615
--	---	----------------------	-------------

A continuación se presentan los detalles que recomienda el estándar API 650:

Espesor del último anillo	t	[pulg]	0.1875
---------------------------	---	--------	--------

ELEGIR EL ESPESOR DEL ÚLTIMO ANILLO CALCULADO ANTERIORMENTE

3 x 3 x 3/8

Nombre de Detalle	Detalle a		
Módulo de Sección en detalle	S	[pulg ³]	1.98

Módulo de sección calculado	Z	[pulg ³]	0.267228615
-----------------------------	---	----------------------	-------------

SECCIÓN CORRECTAMENTE SELECCIONADA

Figura 4. 15. Selección de perfil de viga intermedia

Fuente: el Autor

8. Para el Anillo de Refuerzo Superior Cálculo para Presión Interna:

- a. Se selecciona el ángulo estructural que se utilizará para el anillo de refuerzo superior y el tipo de detalle a utilizarse de acuerdo al Anexo 2, Figura A2.1. Luego, se ingresa los datos requeridos del detalle seleccionado y el ángulo entre cuerpo y techo del tanque. El recuadro nos indicará si el ángulo seleccionado es el correcto como se indica en la Figura 4. 16.

Pero se usaran los ángulos de acuerdo a la AISC:

Con el detalle seleccionado se ingresan los datos que pide el detalle seleccionado

Selección de Ángulo Estructural y Detalle de Anillo Superior

L3x3x1/2	
L3x3x1/2	
L3x3x7/16	
L3x3x3/8	
L3x3x5/16	
L3x3x1/4	
L3x3x3/16	
L2x2x3/8	
L2x2x5/16	

Detalle D

Área del techo	At	[pulg ²]	3.964185688
Área del cuerpo	Ac	[pulg ²]	0.261829501
Área de compresión techo cuerpo	Atc	[pulg ²]	4.226015189
Área mínima junta frangible	A	[pulg ²]	4.714850205
Área del ángulo tope o	Aa	[pulg ²]	0.488835016
Área real	Ar	[pulg ²]	6.336015189

Luego de haber seleccionado el ángulo y escogido el detalle que se va a utilizar para la unión se ingresan los datos que pide el detalle seleccionado

Espesor de pie de ángulo	ta	[pulg]	0.5
Espesor de barra	tb	[pulg]	
Espesor de la plancha del cuerpo	tc	[pulg]	0.125
Espesor de la plancha del techo	th	[pulg]	0.25
Espesor de placa gruesa	ts	[pulg]	

También se selecciona el ángulo entre el techo y el cuerpo, que según la API 650 será menor o igual a la pendiente 2:12 o 9.5°:

Ángulo entre cuerpo y techo del tanque θ [grados] 3

Valor de ángulo entre techo y cuerpo

Debemos calcular el área mínima de junta frangible con la siguiente ecuación

$$A = \frac{DL_s}{2\pi * F_y * \tan \theta}$$

Donde:

Peso total del tanque y techo	DLs	[lb]	37242.09242
-------------------------------	-----	------	-------------

Área Mínima de Junta Frangible.	A	[pulg ²]	4.714850205
---------------------------------	---	----------------------	-------------

Para saber si el ángulo está bien seleccionado hasta el momento el área de compresión Aa debe ser menor o igual el área de la sección del perfil o también podemos elegir otro valor de ángulo entre el techo y el cuerpo

Recuadro

PERFIL O ÁNGULO ESTRUCTURAL BIEN SELECCIONADO

Figura 4. 16. Selección ángulo estructural para anillo superior

Fuente: el Autor

- b. En el Diseño para Presión Interna, se deben revisar dos criterios. El primer criterio que determina si el tanque tiene que soldarse a las correas o al ángulo estructural y el segundo que se debe cumplir obligatoriamente para que cumpla con los requisitos de la API 650. Además, se debe revisar también, la condición de presión de falla; para lo cual, se debe revisar lo que se indica en la Figura 4. 17 y Figura 4. 18.

PRIMER CRITERIO

1) Si la presión interna acumulada por los gases multiplicada por la sección transversal del cuerpo del tanque, es menor que el peso de las placas del techo, entonces el área de compresión será calculada con las ecuaciones (2.22), (2.23), (2.24), (2.25), (2.27), (2.28).

Sección transversal	ST	[pie2]	3318.30724
Peso láminas del techo	Wláminas	[lb]	55906.84039

$$P * ST < W_{láminas}$$

NO CUMPLE EL PRIMER CRITERIO. REVISAR EL SEGUNDO CRITERIO, EL TECHO DEL TANQUE VA A TRATAR DE LEVANTARSE CUANDO HAYA PRESIÓN INTERNA ALTA, POR CUANTO EL TECHO NO VA SOLDADO A LAS CORREAS

SEGUNDO CRITERIO

2) Si la presión interna multiplicada por la sección transversal del tanque, es mayor que el peso total del cuerpo del tanque y cualquier armazón soportado por el cuerpo y techo, entonces el área de compresión mínima de la ecuación (2.27)

Peso total	Wt	[lb]	78169.2928
------------	----	------	------------

$$P * ST < W_t$$

CUMPLE CON EL SEGUNDO CRITERIO

Entonces el área de compresión mínima se la calcula con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{D^2 \left(P_i - \frac{0.245 * D_{t2}}{D^2} \right)}{0.962 * F_y * \tan \theta}$$

Área mínima de compresión	A	[pulg2]	5.226091578
Área real	Ar	[pulg2]	6.336015189

Para verificar que el ángulo estructural está bien seleccionado, debe cumplir con la siguiente

$$A \leq A_r$$

CUMPLE LA CONDICIÓN, ÁNGULO BIEN SELECCIONADO

Además se tiene la condición de presión máxima de falla que se calcula con la siguiente ecuación:

Figura 4. 17. Condiciones para presión interna
Fuente: el Autor

CÁLCULO DE PRESIÓN DE FALLA

$$P_f = 1.6 * P - \frac{0.147 * D_{t2}}{D^2}$$

Presión de Falla.	Pf	[lb/pulg2]	0.161507854
-------------------	----	------------	-------------

La Pmáx con la Pf debe cumplir la siguiente condición:

$$P_{máx} \leq 0.8 * P_f$$

Presión máxima	Pmáx	[lb/pulg2]	0.12133053
Presión de falla	Pf	[lb/pulg2]	0.161507854
Factor 0.8*Pf	0.8*Pf	[lb/pulg2]	0.129206283

Pmáx ≤ 0.8*Pf **CUMPLE CON LA RESTRICCIÓN**

Figura 4. 18. Restricción de presión de falla
Fuente: el Autor

9. Para Anclajes realizar lo siguiente:

- a. Revisar si los criterios para anclajes por viento se cumplen, como lo indica la Figura 4. 19. Si los dos recuadros están de color verde cumplen, pero si alguno de los recuadros es de color rojo no cumple, y se requieren anclajes.

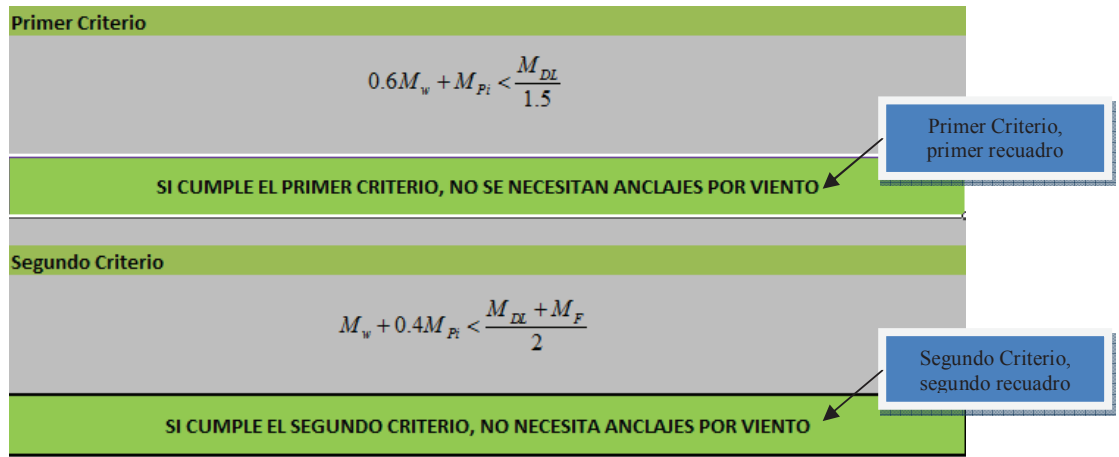


Figura 4. 19. Criterios para anclajes por viento
Fuente: el Autor

b. Para confirmar la necesidad de anclajes mecánicos, también se revisa si la relación de anclaje cumple las condiciones que se indican en la Figura 4. 20.

Relación de Anclaje	J	-0.027167295
---------------------	---	--------------

Para saber si el tanque necesita anclaje mecánico debemos escoger el intervalo al que pertenece la relación de anclaje J calculada:

RELACIÓN DE ANCLAJE	CRITERIO
$J \leq 0.785$	El tanque está auto anclado
$0.785 < J \leq 1.54$	El tanque tiende a elevarse pero el tanque se encuentra estable para el diseño de cargas provistas para la compresión del cuerpo. El tanque está autoanclado.
$J > 1.54$	El tanque no es estable y no puede soportar la carga de diseño. Modificar $L < 0.035D$ o añadir anclaje mecánico.

El tanque está auto anclado

Figura 4. 20. Relación de anclaje
Fuente: el Autor

Si, fuera el caso de necesitar anclajes mecánicos se despliega la pestaña y se realiza lo que se indica en la Figura 4. 21.

897

898 **DISEÑO DE ANCLAJE MECÁNICO**

899 Los pernos de anclaje están dimensionados para proporcionar la resistencia mínima de

900 anclaje, la carga de diseño por volteo debido a carga sísmica, este valor se determina con la

901
$$W_{AB} = \left[\frac{1.273 * M_u}{D^2} - W_u * (1 - 0.4 * A_s) \right] * W_{AB}$$

902 Resistencia mínima de anclaje, la carga de diseño **WAB** 62231.54372

903 por volteo debido a carga sísmica

904 El espacio entre los pernos no debe exceder 3m (10 pies), entonces el número

905 mínimo de pernos de anclaje viene dada por la siguiente ecuación:

906
$$n = \frac{\pi * D}{10}$$

907 Número mínimo de pernos de **n** [pernos] 20.42035225

908 Número de pernos seleccionados **nsele** [pernos] 21

909 La carga sísmica de diseño para un perno de anclaje viene dada por la relación

910
$$P_{AB} = W_{AB} * \left(\frac{\pi * D}{n} \right)$$

911 Carga sísmica de diseño **PAB** [lb] 805138.1161

912 La sección transversal del perno viene dada por la siguiente ecuación:

913
$$A_s = \frac{P_{AB}}{F_u}$$

914 Esfuerzo de fluencia del perno **Fy** [lb/pulg2] 50500

915 Esfuerzo a la presión en los **Fy0.8*Fy** [lb/pulg2] 84000

916 Sección transversal perno **As** [pulg2] 7.204025191

917 El diámetro de raíz del perno se da con la ecuación:

918
$$d_r = \sqrt{\frac{4 * A_s}{\pi}}$$

919 **dr** [pulg] 3.028605249

920 La tensión de cada perno de anclaje es determinado por:

921
$$\sigma_s = \frac{W_{AB}}{n * A_s}$$

922 Esfuerzo a la tensión del perno **ts** [lb/pulg2] 84000

923

924

925

926

927

928

929

930

931

932

933

934

935

936

937

Pestaña Desplegada

Ingresar número de pernos

Ingresar esfuerzo de fluencia de material para el perno de anclaje

Figura 4. 21. Anclajes mecánicos
Fuente: el Autor

10. Para realizar el análisis sísmico:

- a. Seleccionar el factor de zona sísmica y la categoría para determinar el factor de importancia, como lo indica la Figura 4. 22.

De acuerdo a la NEC se lo obtiene de acuerdo al siguiente mapa:

Selección de zona sísmica

ZONA SÍSMICA

Factor Z

Z	0.35
Peligro Sísmico	Alta

FACTOR DE IMPORTANCIA

De acuerdo a la NEC el factor de importancia se lo determina de acuerdo a la siguiente tabla

CATEGORÍA	TIPO DE USO, DESTINO E IMPORTANCIA	FACTOR
Edificaciones Esenciales y Peligrosas	Hospitales, clínicas, centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de Control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras substancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras substancias.	1.5
Estructuras de Ocupación Esencial	Museos, iglesias, escuelas y centros deportivos que albergan más de 300 estructuras que albergan más de 500 públicos que requieren operar contin	
Otras Estructuras	Todas las estructuras de edificación dentro de las categorías anteriores.	

Selección de categoría para selección de factor de importancia

Edificaciones Esenciales y Peligrosas

Factor de Importancia

1	1.5
---	-----

Figura 4. 22. Zona sísmica y factor de importancia
Fuente: el Autor

- b. Para determinar los coeficientes de aceleración de sitio base F_a y F_v , es necesario realizar una interpolación, para lo cual, la Figura 4. 23 indica la forma de realizarlo.

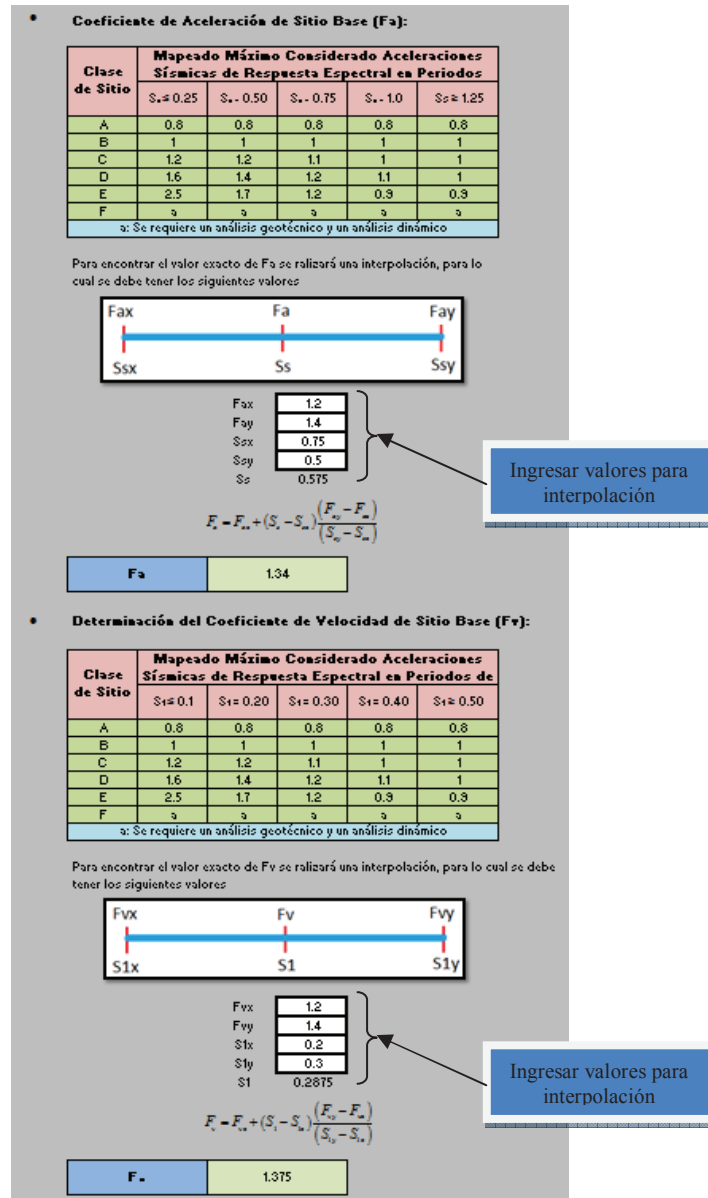


Figura 4. 23. Coeficientes de aceleración de sitio base F_a y F_v
Fuente: el Autor

- c. Para los factores de respuesta de modificación de los métodos ASD R_{wi} y R_{wc} , se selecciona el sistema de anclaje que se utilizará para el tanque, como indica la Figura 4. 24.

● Factores de respuesta de modificación de los métodos ASD (R_w)

R_{wi} = Factor de modificación de respuesta impulsivo
 R_{wc} = Factor de modificación de respuesta compulsivo

Se determina de acuerdo al sistema de anclaje que se va a utilizar

Auto anclaje

Auto anclaje

Andaje mecánico

R_{wi}	3.5
R_{wc}	2

Figura 4. 24. Factores de respuesta de modificación de los métodos ASD

Fuente: el Autor

11. Para el diseño de la estructura soportante del techo:

- a. Se ingresa el número de correas que conformaran el techo, como indica la Figura 4. 25.

ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TECHO			
NÚMERO DE CORREAS (N)			
$N_{mín} = \frac{D}{2}$			
Número mínimo de correas	Nmín	[unidades]	32.5
Número de correas seleccionado	N	[unidades]	34
Número de Correas Seleccionado.	N	[unidades]	34

NÚMERO DE CORREAS SELECCIONADO:
 Ingresar un número de correas N mayor al mínimo Nmín

Figura 4. 25. Número de correas para el techo

Fuente: el Autor

- b. Para el diseño de las correas, es necesario seleccionar el tipo de perfil estructural que se utilizará para las mismas. Si el perfil cumple con las condiciones de diseño el recuadro que se indica en la Figura 4. 26, será de color verde, caso contrario será rojo y se elegirá otro perfil.

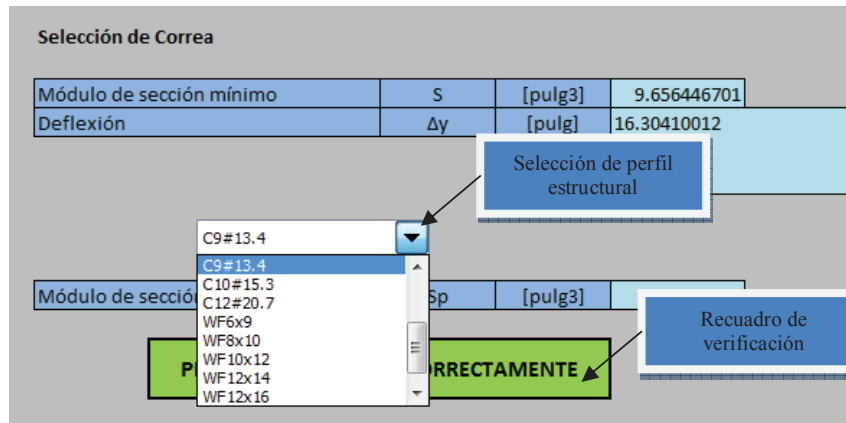


Figura 4. 26. Selección de perfil estructural para correas

Fuente: el Autor

- c. Luego, se selecciona el tipo de columna a utilizar, y dependiendo si la columna es de sección tubular o de canales se elige el tipo de perfil estructural o diámetro a utilizarse.

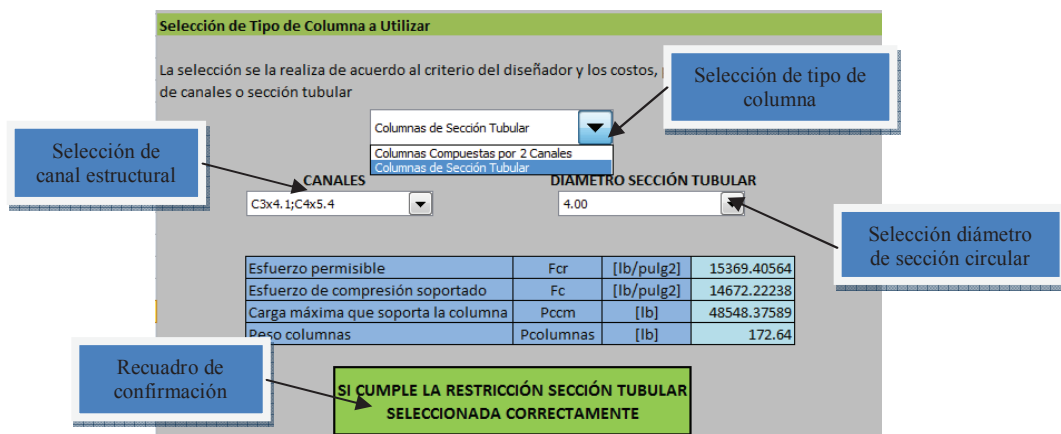


Figura 4. 27. Selección de tipo de columna a utilizarse

Fuente: el Autor

Si el perfil estructural o diámetro es el correcto, el recuadro de confirmación que se indica en la Figura 4. 27, se pondrá de color verde caso contrario será rojo y se verá otro perfil estructural o diámetro.

- d. Para las bases de las columnas, se debe seleccionar el perfil de la base como indica la Figura 4. 28. Si el recuadro de confirmación es de color verde el perfil de base está bien seleccionado, si es de color rojo se debe seleccionar otro perfil.

Se debe seleccionar el perfil cuya carga máxima que soporte no exceda La carga crítica Pcc, para lo cual se presenta la siguiente tabla con algunos perfiles y la carga máxima que soportan.

PERFIL DE LA BASE	CARGA MÁXIMA [lb]
C7#9.8	17510.4
C8#11.5	23443.2
C9#13.4	33580.2
C10#15	42768
C12#20.7	69204.3

Carga crítica	Pcc	[lb]	46338.30495
---------------	-----	------	-------------

C12#20.7	Pcc	[lb]	69204.3
----------	-----	------	---------

PERFIL DE BASE BIEN SELECCIONADO

Recuadro de Confirmación

Figura 4. 28. Perfiles para bases de columnas
Fuente: el Autor

- e. Para el diseño de cartelas, específicamente para determinar la separación de la junta para la soldadura de la cartela, se debe seleccionar la resistencia del electrodo con el cual se va a trabajar, como indica la Figura 4. 29.

RESISTENCIA DEL ELECTRODO (KSI)	Fv [KSI]	f _R [kips/pulg]	D _{sol} [pulg]
60	18	0.796*D _{sol}	0.4479025
70	21	0.928*D _{sol}	0.3841922
80	24	1.061*D _{sol}	0.3360324
90	27	1.193*D _{sol}	0.298852
100	30	1.326*D _{sol}	0.2688766
110	33	1.458*D _{sol}	0.2445339

RESISTENCIA DEL ELECTRODO (KSI)

60

Tamaño de soldadura por 1/16

D_{sol} [pulg] 0.447902516

$$D_{real} = \frac{D_{sol}}{16}$$

Separación de la Junta para Soldadura de Cartela.	D _{real}	[pulg]	0.027993907
		[mm]	0.711045244

- Se utilizará un tamaño de soldadura mínimo de 1/8 de pulgada o 3.2 mm y un espesor mínimo de cartela de 1/4 de pulgada o 6.35 mm.

Figura 4. 29. Selección de la resistencia del electrodo para soldar la cartela al cuerpo del tanque
Fuente: el Autor

- f. Para el disco central de la columna, se debe seleccionar el radio interior del disco y el valor de las constantes K para poder calcular el espesor del disco h, como se indica en la Figura 4. 30.

Determinación del Radio Interior de la Placa rd

El radio interior del disco es una función del tipo de columna a utilizarse. Para columnas tubulares el radio interior es el radio exterior del tubo, y para secciones armadas se define al radio interior del disco como la distancia del centro de gravedad de la sección al extremo del perfil.

Radio interior del disco rd [pulg] 4

RADIO INTERIOR DE DISCO CENTRAL:
Ingresar el valor del radio interior del disco central de acuerdo al tipo de columna a utilizar.

Determinación del Espesor de la Placa del Disco Central h

- Si $Rd \leq 15$ pulg, se utiliza la siguiente tabla para determinar la constante K

Rd / rd	1.25	1.5	2	3	4	5
K	0.135	0.41	1.04	2.15	2.99	3.69

Radio exterior del disco Rd [pulg] 20.84023004

Radio interior del disco rd [pulg] 4

Relación Rd/rs Rd/rd 5.210057509

Constante K K 3.69

- Si $Rd > 15$ pulg, se utiliza la siguiente tabla para determinar la constante K

Rd / rd	1.25	1.5	2	3	4	5
K	0.122	0.336	0.74	1.21	1.45	1.59

Radio exterior del disco Rd [pulg] 20.84023004

Radio interior del disco rd [pulg] 4

Relación Rd/rs Rd/rd 5.210057509

Constante K K 1.59

Constante K. K 1.59

Figura 4. 30. Disco central de columna
Fuente: el Autor

12. Para el diseño de deflectores internos, se realiza lo siguiente:

- a. Para determinar la carga total, se debe ingresar el número de deflectores, la longitud máxima del deflector que se va a montar en el tanque, la longitud máxima del deflector y seleccionar el espesor de las de la plancha del deflector interno (Figura 4. 31).

Determinación de la Carga Total Ctotal

Número de baffles	NB	[unidades]	3
Carga crítica	Pcc	[lb]	46338.30495
Longitud máxima del Baffle	L	[pies]	25
Altura máxima del Baffle	H	[pies]	20
Área del baffle	Abaffle	[pies2]	500
Espesor plancha de baffle	Epb	[pulg]	1/4
Peso por unidad de área de plancha	Pplancha	[lb/pie2]	1/4
Peso total planchas de baffle	Wpb	[lb]	5/16
			3/8
			1/2
			5/8
			3/4
			7/8
			1
Carga Total	Ctotal	[lb]	3978

Datos a ingresar

Figura 4. 31. Cálculo de la carga total que soporta el deflector
Fuente: el Autor

- b. Después, se ingresa la longitud máxima del perfil que compondrá cada módulo del deflector y se selecciona el perfil estructural que pertenece a cada deflector, como se indica en la Figura 4. 32.

Longitud del perfil del módulo	Lp	[pies]	10
--------------------------------	----	--------	----

Dato a ingresar

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> L3x3x1/4 L3x3x1/4 L3x3x3/16 L2x2x3/8 L2x2x5/16 L2x2x1/4 L2x2x3/16 L2x2x1/8 L1x1x1/8 </div>			
Peso p	Pc	[lb/pie]	4.9
Área to	At	[pulg ²]	1.44
Momen	Ix-x	[pulg ⁴]	1.24
Radio	rx-x	[pulg]	0.93
Momento de inercia y-y	Iy-y	[pulg ⁴]	1.24
Radio de Giro eje y-y	ry-y	[pulg]	0.93

Longitud no arriostrada	l	[pulg]	10
Radio de giro	r	[pulg]	0.93
Relación l/r	l/r		10.75268817

menor o igual a Cc

Esfuerzo de Compresión Admisible	Fa	[lb/pulg ²]	13657.22061
----------------------------------	----	-------------------------	-------------

mayor a Cc

Esfuerzo de Compresión Admisible	Fa	[lb/pulg ²]	835297.368
----------------------------------	----	-------------------------	------------

Compresión Admisible	Fa	[lb/pulg ²]	13657.22061
----------------------	----	-------------------------	-------------

Esfuerzo de Compresión Fc

Esfuerzo de Compresión	Fc	[lb/pulg ²]	13134.74985
------------------------	----	-------------------------	-------------

Compresión	Fc	[lb/pulg ²]	13134.74985
------------	----	-------------------------	-------------

$$F_c \leq F_a$$

Esfuerzo de Compresión Admisible	Fa	[lb/pulg ²]	13657.22061
Esfuerzo de Compresión	Fc	[lb/pulg ²]	13134.74985

PERFIL PARA MARCO EXTERIOR BIEN SELECCIONADO

Recuadro de confirmación

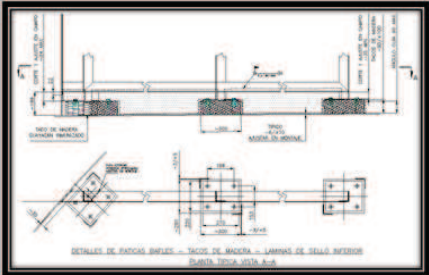
Figura 4. 32. Perfil para marco exterior de deflector

Fuente: el Autor

- c. Para calcular las medidas de los apoyos de deflectores se deben ingresar los datos que indica la Figura 4. 33.

APOYOS DE BAFLES

El apoyo de los bafles será de madera Guayacán Pechiche, la selección de esto será de acuerdo a la carga total que resistirá cada baffle y el número de apoyos que tendrá cada baffle:



Número de apoyos en el baffle	Nap	[unidades]	3
Carga total	Ctotal	[lb]	18865.03978
Fuerza que soporta cada apoyo	Rapoyo	[lb]	6288.346593
Longitud de Apoyo	a	[pulg]	12
Ancho de Apoyo	b	[pulg]	12
Área de Contacto o apoyo	b*a	[pulg ²]	144

$$\sigma_c = \frac{R_{apoyo}}{b * a}$$

Esfuerzo promedio de compresión	σ_c	[lb/pulg ²]	43.66907356
---------------------------------	------------	-------------------------	-------------

Esfuerzo teórico	σ_t	[lb/pulg ²]	66
------------------	------------	-------------------------	----

MEDIDAS DE APOYO DE BAFLE CORRECTAS

Datos a ingresar

Recuadro de confirmación

Figura 4. 33. Apoyos de deflectores internos
Fuente: el Autor

En el Anexo 8 se muestra el resumen de datos calculados.

CAPITULO 5

5 REQUISITOS PARA EL MONTAJE

El montaje del tanque es muy importante ya que de esto depende el buen funcionamiento del mismo, para esto el estándar API 650 da algunas recomendaciones para realizarlo de la mejor manera. PEC Cía. Ltda. Cuenta con procedimientos calificados para realizar este tipo de trabajo, en este capítulo se explicará la manera o forma de realizar el montaje del tanque y de los deflectores internos o baffles.

Esto servirá como información adicional a lo realizado en este trabajo de grado, para poder anticiparse a cualquier imprevisto o problema durante el montaje de un tanque de lavado con deflectores internos.

Para esto el procedimiento da algunas recomendaciones a seguir previo al montaje de un tanque y son las siguientes:⁶⁸

- a. Preparación del terreno
- b. Anillos o base de fundación
- c. Nivelación
- d. Orientación
- e. Pendiente para drenaje

La orientación deberá estar debidamente marcada, tanto los ejes principales como cada 45° siendo 0° el norte de planta, para la construcción se seguirá en sentido horario.

Demarcación exacta de los ejes principales y resalte del centro de la base, mediante pintura.

Ubicado el centro del tanque se tomará el radio exterior del fondo y con una cinta métrica se trazará el perímetro sobre el anillo o base de hormigón. En la Figura 5.1, se puede ver el anillo de hormigón previo al montaje de un tanque.

⁶⁸ PEC Cía. Ltda. (2013). PEC-39PR-035 (Rev. 0). Quito: PEC. Cía. Ltda. Pág.: 4.



Figura 5. 1. Vista del anillo de hormigón previo al montaje de un tanque
Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

5.1 MONTAJE Y SOLDADURA DEL FONDO DEL TANQUE

Se montará la plancha central y se trazará los ejes principales para la ubicación del centro, al que se soldará una varilla pivote sobre la plancha, y se comprobará nuevamente el radio del tanque.⁶⁹

Cuando el fondo este provisto de planchas anulares (Anular plate) debe asegurarse de mantener radios apropiados, uniendo levemente con puntos de soldadura provisional, como se observa en la Figura 5. 2.

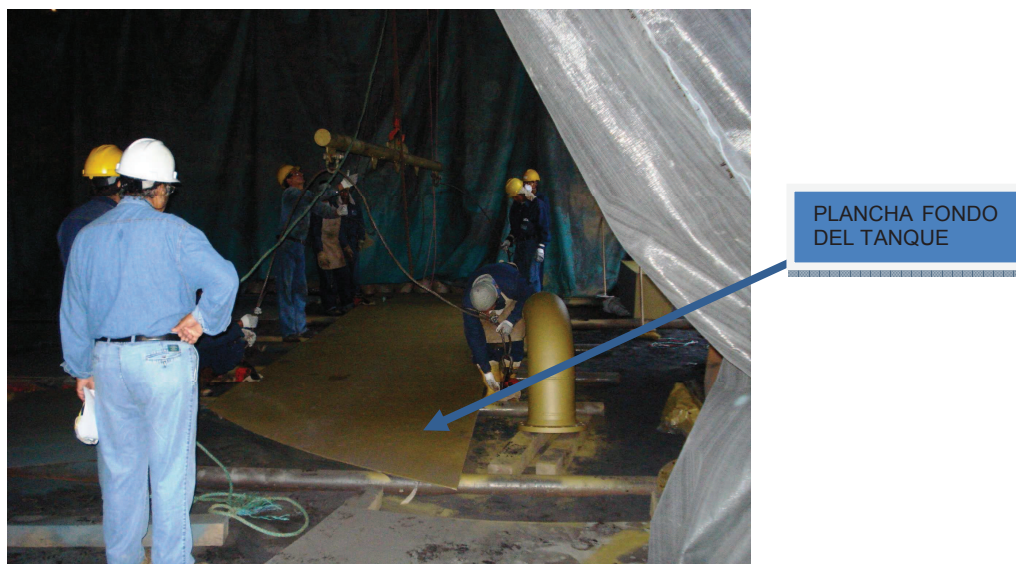


Figura 5. 2. Montaje de las planchas del fondo del tanque
Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

La tolerancia para el radio externo es aquella dada por la última edición de API Standard 650 o por las especificaciones del Cliente.

⁶⁹ PEC Cía. Ltda. (2013). PEC-39PR-035 (Rev. 0). Quito: PEC. Cía. Ltda. Pág.: 5.

La colocación de las planchas será realizada de acuerdo con los traslapes que se muestren en los planos AFC; soldaduras provisionales pueden ser realizadas para unir las planchas a fin de realizar cualquier ajuste.

Cuando el fondo no requiera planchas anulares, se procederá a conformar y soldar las pinzas en las juntas traslapadas de la zona periférica del fondo, de acuerdo a la Figura 5. 3.⁷⁰

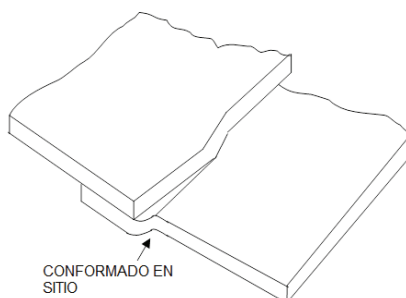


Figura 5. 3. Traslape de planchas del fondo del tanque cuando no existen placas anulares
Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

La soldadura del fondo se realizara siguiendo estrictamente la secuencia dada en la Figura 5. 4 y Figura 5. 5. Los números indican la secuencia y las flechas indican la dirección en la que soldadura se realiza.

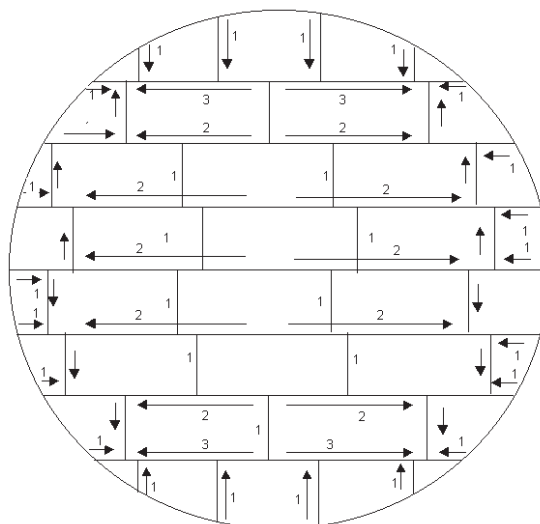


Figura 5. 4. Secuencia de soldadura para fondo y techo del tanque
Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

⁷⁰ PEC Cía. Ltda. (2013). PEC-39PR-035 (Rev. 0). Quito: PEC. Cía. Ltda. Pág.: 5.



Figura 5. 5. Soldadura de las placas del fondo del tanque
Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

Concluida la soldadura de las planchas anulares o el conformado y soldadura de las pinzas está terminado, se puede iniciar el montaje del primer anillo y continuar simultáneamente con la soldadura del fondo.

Las dimensiones de las juntas traslapadas del fondo, indicadas en los planos AFC se deben mantener en lo posible; sin embargo, estos pueden variar acorde con las tolerancias de los procesos de rolado. De todas maneras, el mínimo traslape de la junta es una in de acuerdo con las especificaciones API Standard 650.

5.2 MONTAJE DE LAS BASES DE LAS COLUMNAS DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TECHO

Luego de que el fondo del piso se encuentra montado, se marcará el sitio en donde se colocará la base de la columna para el tanque, la geometría de la base será de acuerdo al diseño realizado con los parámetros del capítulo 3 en el punto 3.2.4.3.

5.3 MONTAJE DE LA COLUMNA SOPORTANTE PARA EL TECHO

Una vez terminado el montaje de las bases y de haber verificado si el sitio de montaje de las mismas es el correcto se procede a lo siguiente:⁷¹

⁷¹ Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 157.

- 1) Con la ayuda de un teclé se instalará la columna central sobre la base ya montada anteriormente y se emporna. Debido a que el montaje del techo provoca una desviación de la vertical, los pernos se aprietan cuando ya esté montado el techo, como se observa en la Figura 5. 6.



Figura 5. 6. Montaje de columna central

Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

- 2) En el momento que se monta la columna inmediatamente se debe soldar el disco central y montar las correas, para luego ajustar los pernos de unión de la base con la columna y finalmente soldar los ángulos de la base de la columna con la base del tanque.
- 3) Mientras se nivela la columna central y se coloca el techo y demás accesorios la base estará sujeta con cables tensados, como se observa en la Figura 5. 7.



Figura 5. 7. Columna central montada y sujeta con cables tensados

Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

5.4 MONTAJE Y SOLDADURA DEL CUERPO DEL TANQUE

Luego de que las planchas pasan por el proceso de rolado y demás procesos para alcanzar las medidas requeridas de acuerdo al diseño y planos AFC se procede a realizar el montaje del cuerpo del tanque para esto, previo a la instalación del primer anillo, el diámetro interno del cuerpo se verifica.

Con la ayuda de una grúa se colocan las placas del primer anillo del tanque contra el piso del tanque, como se observa en la Figura 5. 8. Se sueldan las planchas una a una con especial cuidado para las planchas del fondo, la penetración del cordón de soldadura debe ser la necesaria para evitar cualquier falla por presión cuando el tanque este lleno.⁷²



Figura 5. 8. Soldadura de las planchas del primer anillo al anillo del fondo del tanque

Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

Adyacente al diámetro externo del cuerpo, se sueldan temporalmente pequeños toques de plancha, los cuales sirven de guía para colocar el primer anillo y con propósitos de centrado utilizando punzones o cuñas, como se observa en la Figura 5. 9.

⁷² Bustamante, L y González, J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería La Libertad. Quito: EPN. Pág.: 160.



Figura 5. 9. Planchas utilizadas para centrar las planchas del cuerpo del tanque

Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

Clips de montaje (cuadrantes) serán soldados en un sector próximo a las juntas verticales para facilitar el ensamble de las placas con ayuda de “chicagos”. Los clips se sueldan en tres sitios. En la Figura 5. 10 se puede observar los clips de montaje y los chicagos.

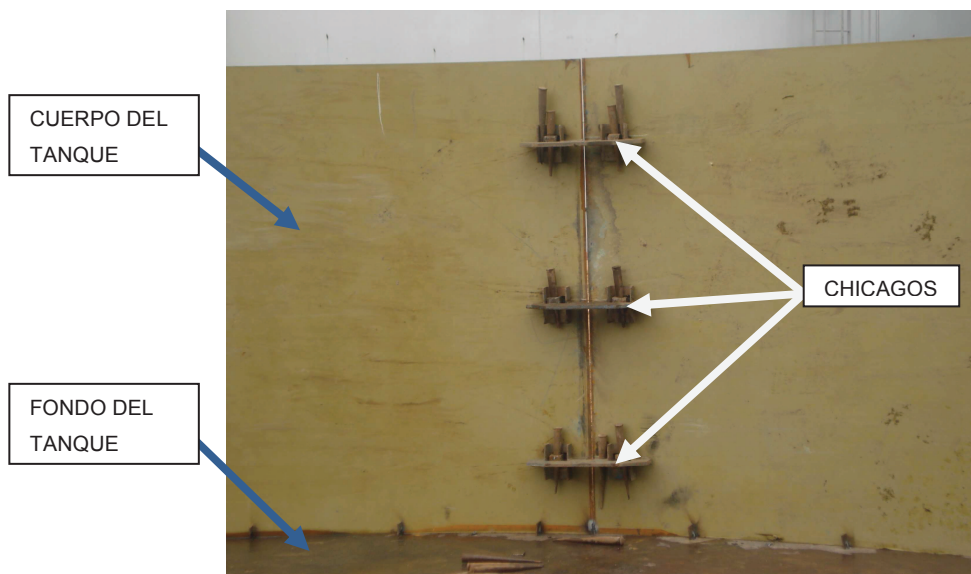


Figura 5. 10. Ilustración donde se indica la ubicación de chicagos

Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

Al inicio de la instalación las planchas del cuerpo serán montadas de acuerdo a la orientación dada en los planos para construcción AFC. La continuación del ensablaje de plancha a plancha se la realizará con la ayuda de “chicagos”

(Figura 5. 10), punzones, soldaduras de punteo y tramos soldados, con el fin de mantener la seguridad en el ensamble.⁷³

Una vez iniciada la instalación de los anillos del cuerpo, es aconsejable trabajar en el mismo hasta que esté totalmente cerrado, como indica la Figura 5. 11.



Figura 5. 11. Cuerpo del tanque montado

Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

Las juntas serán aseguradas por medio de puntos de soldadura tomando en cuenta la separación entre placas y las plantillas para el radio del tanque.

Las plantillas para verificar el radio interior del tanque se hacen de playwood o de madera, de 900 mm de longitud, 100 mm de ancho y 10 mm de espesor.

Para juntas horizontales, se hará uso espaciadores para verificar y garantizar la luz o separación adecuada entre planchas de cuerpo (anillos).

Una vez completadas las soldaduras del fondo y la junta fondo-cuerpo, el montaje del techo puede iniciarse. El montaje y soldadura de los anillos restantes del cuerpo pueden ser realizados simultáneamente.

Al comenzar la soldadura de las juntas del cuerpo, una inspección radiográfica puntual de los anillos es llevada a cabo por cada soldador a fin de verificar la calidad de las mismas. Si cualquier discontinuidad encontrada, no es permitida por API 650, se deben tomar las adecuadas medidas correctivas.

⁷³ PEC Cía. Ltda. (2013). PEC-39PR-035 (Rev. 0). Quito: PEC. Cía. Ltda. Pág.: 7.

Cuando se ha concluido la instalación del último anillo y las soldaduras de las juntas verticales, el ángulo tope debe ser ensamblado y asegurado con puntos de soldadura al radio efectivo del tanque. Para eso, es aconsejable soldar las cartelas de soporte del techo y ensamblar las vigas a la estructura central, en el caso de los techos cónicos tratando de controlar y corregir la redondez y verticalidad requeridas.



Figura 5. 12. Vigas ensambladas a la columna central

Fuente: PEC Cía. Ltda., 2013

5.5 PREFABRICACIÓN Y MONTAJE DE DEFLECTORES INTERNOS (BAFLES)

5.5.1 PREFABRICACIÓN DE DEFLECTORES INTERNOS (BAFLES)

Para la prefabricación de bafles se debe tener en cuenta los siguientes requerimientos:⁷⁴

- Acondicionar un sitio de suelo firme, bien ventilado y que permita el acceso de equipos de izaje como grúas y camiones para mover y/o transportar los módulos de bafles. Se trabaja simultáneamente en:
 - a) un primer grupo de corte y armado de los marcos de ángulo o perfil,
 - b) un segundo grupo trabaja en la soldadura del marco y la lámina por el lado lámina y,

⁷⁴ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 10.

- c) un tercer grupo trabaja en la soldadura del marco y la lámina por el lado del marco.
- Cada grupo de trabajo debe tener acondicionada una mesa de trabajo metálica del tamaño del bafle de mayor dimensión, debe estar nivelada por topografía y tener las facilidades para que el grupo de montaje pueda asegurar la estructura contra la mesa con puntos de soldadura o elementos de fijación. En la Figura 5. 13 se observa una mesa de trabajo.



Figura 5. 13. Mesas de trabajo para prefabricado de bafles

Fuente: Santos CMI, 2010

- Para el armado de los marcos, se debe adecuar en la mesa de trabajo las facilidades para tener un jig de montaje, soldando topes que faciliten tener un control dimensional del marco (largo, ancho y diagonales), así mismo se deben instalar referencias para la instalación de los travesaños que van a rigidizar el marco, de tal forma que se minimicen los errores dimensionales y la posición de cada perfil.
- Una vez cortadas las partes del marco y punteadas en su sitio, se deben colocar, prensas, chicagos o pernos de montaje sobre las partes a ser soldadas con el fin de minimizar las distorsiones ocasionadas durante el proceso de soldadura.
- Se debe tener especial atención para que en cada módulo trabajen como máximo dos soldadores simultáneamente y en lados opuestos de tal manera de minimizar el aporte de calor a la estructura. Seguir las recomendaciones del diseño y aplicar en lo posible en un solo pase el cordón de soldadura y alternadamente de los intervalos dados por el diseño. Emplear electrodos de

bajo hidrógeno de 1/8" de diámetro o menor, para el caso de procesos semiautomáticos emplear alambres de 1,2 mm de diámetro o menor y ajustando la velocidad de avance para que el cordón de soldadura sea en un solo pase.

- Mantener los elementos de restricción sujetos a la estructura, hasta que esta se haya enfriado a temperatura ambiente de forma natural, sin forzar su enfriamiento con agua o aire forzado.
- Una vez terminada la soldadura del marco, se hace un control visual de la calidad de las soldaduras, posteriormente se hace un control dimensional y se verifica que las medidas se encuentren dentro de las tolerancias dadas en la Figura 3. 5, caso contrario se procede a reparar hasta tener resultados satisfactorios. En varios casos las tolerancias dimensionales se ven afectadas por pequeñas combas u ondulaciones de la estructura principal, en este caso hay que colocar el marco bajo una prensa para enderezarlos y lograr la plenitud requerida y la posterior re-verificación dimensional.
- Cada marco que es liberado por el Supervisor de Control de Calidad pasa a la siguiente estación de trabajo, donde las soldadura del lado lámina deben ser esmeriladas hasta llegar al nivel del material base, para facilitar el montaje de la misma lámina, la cual debe estar previamente cortada a las dimensiones indicadas en los planos de diseño y con los bordes alisados para facilitar el manipuleo.
- El punteado de la lámina se hace siguiendo una secuencia de puntos en lados opuestos, de la misma manera que se hace para atornillar una junta bridada, de esta manera se logra distribuir uniformemente los esfuerzos en toda la sección. Se debe prestar especial atención para que no queden aberturas mayores a 1/32" entre el marco de perfil y la lámina, en este caso se cortan los puntos y se colocan prensas para garantizar un buen contacto y se vuelven a puntear.
- La soldadura de la lámina con el marco es uno de los puntos cruciales en esta parte del proceso, ya que es donde se presentan las mayores distorsiones de los marcos por la cantidad de soldadura que se aporta. Para minimizar este

efecto, se recomiendan instalar sobre la lámina unos vigas con perfil I, que van punteadas provisionalmente sobre la misma lámina y la estructura del módulo en al menos 2 partes, dividiendo al marco total en 3 partes iguales.

- Una vez terminada la soldadura por el lado lámina (generalmente soldadura continua para este lado), se procede a la soldadura por el lado perfil o lado opuesto (soldadura alternada para este caso). El reforzamiento ayuda a mantener la planitud y dimensiones generales, las cuales se retiran cuando se haya completado la soldadura de la lámina con el marco por ambos lados.
- Se realiza una nueva inspección visual de soldaduras y un nuevo control dimensional, para garantizar el cumplimiento del diseño. De ser necesario se realizan reparaciones y se aprueban con una re-inspección.
- Es importante tener en cuenta que una vez aprobada la prefabricación de un módulo, estos se deben almacenar sobre un piso firme y colocar como máximo 5 módulos en cada apilamiento, para evitar futuras deformaciones por el peso de los módulos superiores.
- Cuando se termine la prefabricación de un módulo de un cierto tamaño, se deben adecuar nuevamente las facilidades del jig de montaje para el nuevo tamaño de módulo y continuar con los mismos controles anteriores.

5.5.2 MONTAJE DE DEFLECTORES INTERNOS (BAFLES)

5.5.2.1 Requerimientos Previos⁷⁵

- El fondo del tanque debe estar liberado por inspección visual de soldaduras, prueba de aceite (oil test) y prueba de vacío (vaccum test), previo al montaje de baffles, porque esta actividad implica ejecutar montajes definitivos sobre el piso que posteriormente dificultan o enmascaran zonas del piso debidas a los propios procesos constructivos e instalación permanentes.
- El cuerpo del tanque debe estar liberado por inspección visual de soldaduras, END, redondez, verticalidad y control de desviaciones locales (peaking & banding). Sin embargo hay que considerar que la prueba hidrostática se puede

⁷⁵ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 13.

ejecutar una vez que todo el baffle esté terminado previo al amarre definitivo de éste al cuerpo del tanque.

- Es necesario que toda la estructura de soporte del techo se encuentre esencialmente terminada, es decir que la geometría y tolerancias dimensionales del cuerpo ya no vayan a sufrir alteraciones, sin embargo es factible que se puedan dejar un par de vigas de techo sin instalar para facilitar el ingreso de las paredes de baffles durante su montaje, que posteriormente se pueden instalar y asegurar en su sitio, para retirar otras en el lado opuesto de requerirse por facilidades constructivas pero siempre controlando que no afecte a la geometría del tanque.
- Previo al montaje de baffles, se debe marcar topográficamente en el piso y en el cuerpo del tanque con pintura permanente las trayectorias de los baffles, los puntos de apoyo de cada pared de baffle al piso, los puntos de amarre del cuerpo a los baffles y entre baffles, de tal manera que se pueda hacer un control dimensional previo de todo el sistema y se puedan corregir posibles errores de planos o interferencias con bocas del cuerpo y elementos estructurales del tanque. De ser necesario se pueden corregir en campo las interferencias menores o enviar un RFI a ingeniería para resolver el inconveniente.
- Tomar en cuenta que las zonas de piso donde se van a colocar los elementos de apoyo de los baffles (tacos de madera), deben estar previamente liberadas por pintura, ya que son zonas que van a quedar tapadas de forma definitiva, siempre considerando un área mayor para que exista el traslape adecuado con la pintura de las zonas que aún no están cubiertas.

5.5.2.2 Montaje de Patas o Elementos de Apoyo⁷⁶

- Si el fondo del tanque es la única parte que debe soportar la carga total del baffle, se debe asegurar que la transferencia de carga al piso durante el proceso de construcción se lleve a efecto, implementando una inspección visual permanente para garantizar que todos los apoyos temporales y

⁷⁶ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 13-15.

permanentes estén en contacto con el piso, caso contrario tomar los correctivos inmediatos y volver a re-inspeccionar.

- Se debe prestar atención a aquellas zonas del fondo del tanque donde existen pequeñas ondulaciones hacia arriba, las cuales no están en contacto con la fundación o cama de arena. Los puntos de apoyo que coincidan en estas zonas se deben precargar aplicando una tensión con gatos hidráulicos hasta que obligue a la lámina a tomar contacto con la cama de arena, esto minimiza las desviaciones en la nivelación del baffle, luego de que se haya ejecutado la prueba hidrostática.
- Durante el montaje se debe monitorear y corregir la nivelación del baffle, ya que el fondo de alguna manera puede ceder en ciertos lugares y algunos puntos de apoyo van a quedar en el aire, esta actividad se debe ejecutar hasta que el baffle haya sido liberado del montaje. Si el baffle no está cargado al 100% al fondo, cuando se instalen los amarres al cuerpo, durante la operación se crearán momentos contra el cuerpo que ocasionarán deformaciones en las láminas.
- Si el diseño del baffle marca un número determinado de apoyos, estos se deben mantener como mínimo y permanecer durante el proceso de montaje, sea que se consideren soportes temporales o permanentes, lo importante es garantizar una distribución adecuada de la carga a la lámina del piso.
- En la Figura 5. 14. Patas de apoyo de un baffle, se observan las patas o elementos de apoyo de una pared completa de baffle, notar que estas se encuentran alineadas y la zona debajo de estas patas y el baffle se encuentra previamente pintada.

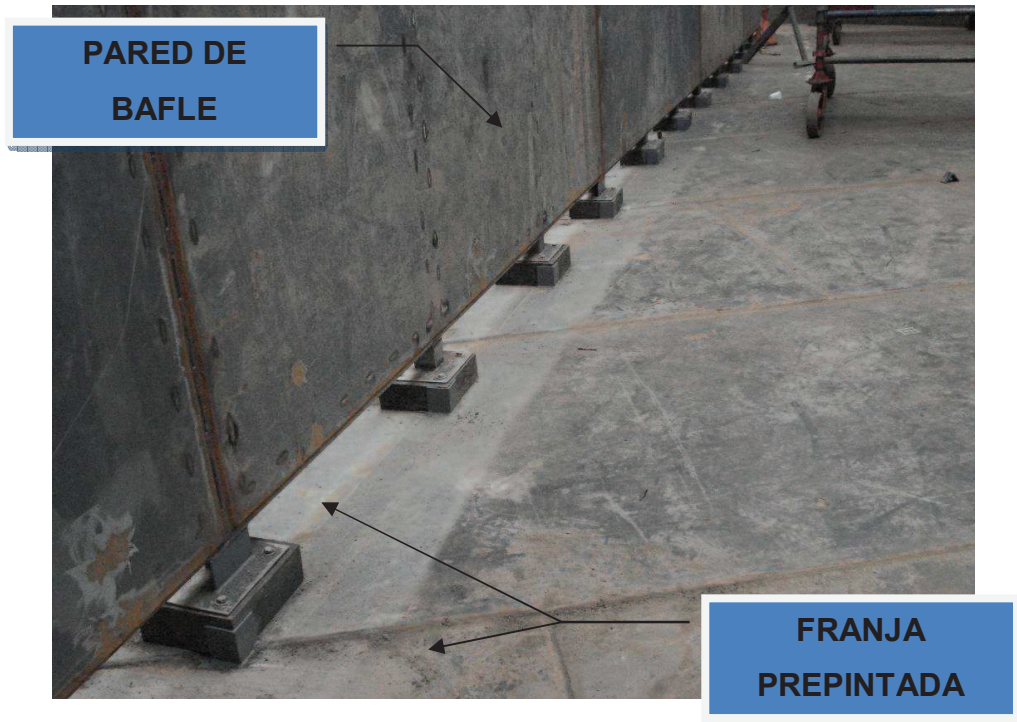


Figura 5. 14. Patas de apoyo de un bafle
Fuente: Santos CMI, 2010

- En la Figura 5. 15, se observa un soporte completo, donde se observan:
 - a) Tope soldado al piso para fijar y mantener al taco de madera en su posición, son dos opuestos en una de las diagonales
 - b) el taco de madera de guayacán inmunizado,
 - c) la placa de poyo del bafle que va atornillada al taco de madera,
 - d) el ángulo de soporte del bafle que va soldado previamente a la placa base para evitar quemar y dañar las propiedades de la madera y,
 - e) tornillos auto roscantes para sujetar la placa base al taco de madera.

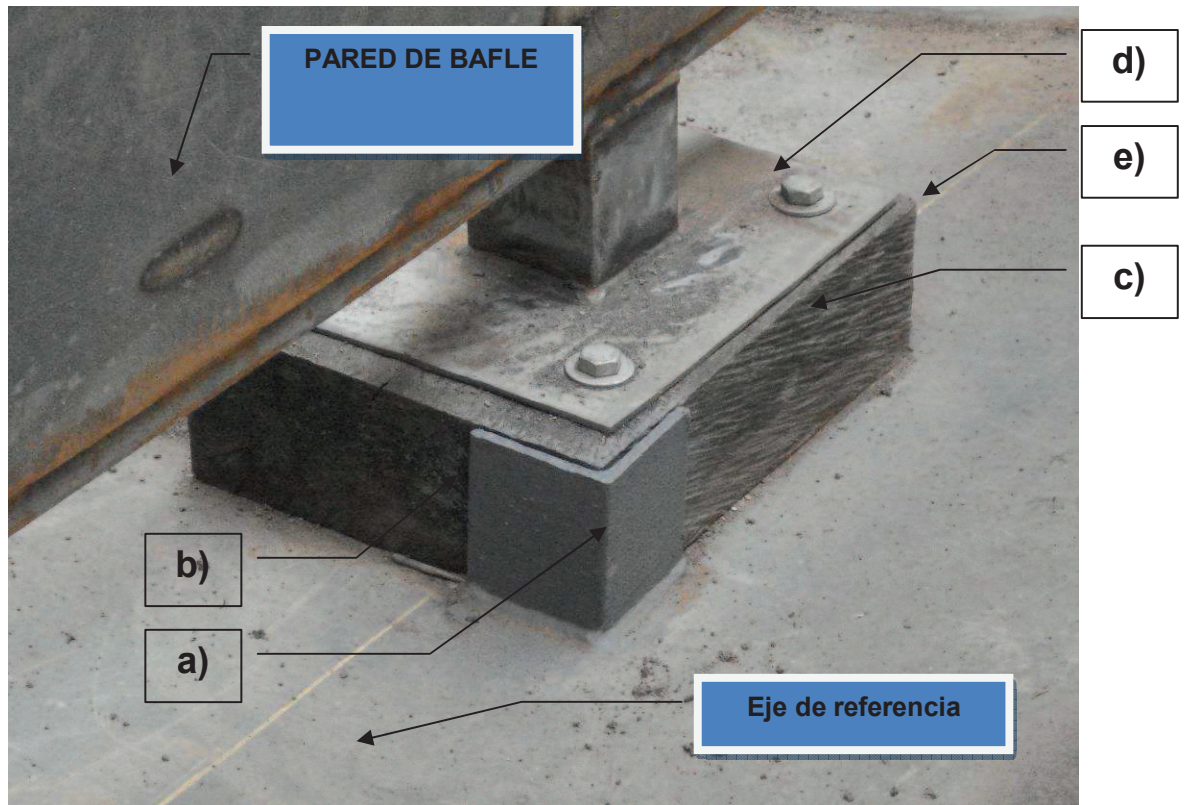


Figura 5. 15. Detalle de patas de apoyo de un bafle

Fuente: Santos CMI, 2010

5.5.2.3 Montaje de Baffles⁷⁷

- El montaje de cada pared de bafle tiene que seguir una secuencia estricta de montaje de MÓDULO, para darle estabilidad al sistema durante todo el proceso, es importante que cada módulo que se instale debe estar provisionalmente apuntalado con soportes temporales y/o tensores.
- El montaje se inicia siempre por el extremo del bafle que está junto a la pared del tanque, para que facilite en la primera sección el apuntalamiento provisional a esta zona del tanque. En la Figura 5. 16, se da una recomendación de cómo ir montando cada marco, pueden hacerse algunas variantes en campo pero el objetivo principal es tener más módulos de apoyo en la parte inferior previo al montaje de un módulo que se encuentra en el nivel superior, en este esquema el módulo que se monta primero es el N° 1 y sigue sucesivamente conforme se incrementa el valor.

⁷⁷ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 15-17.

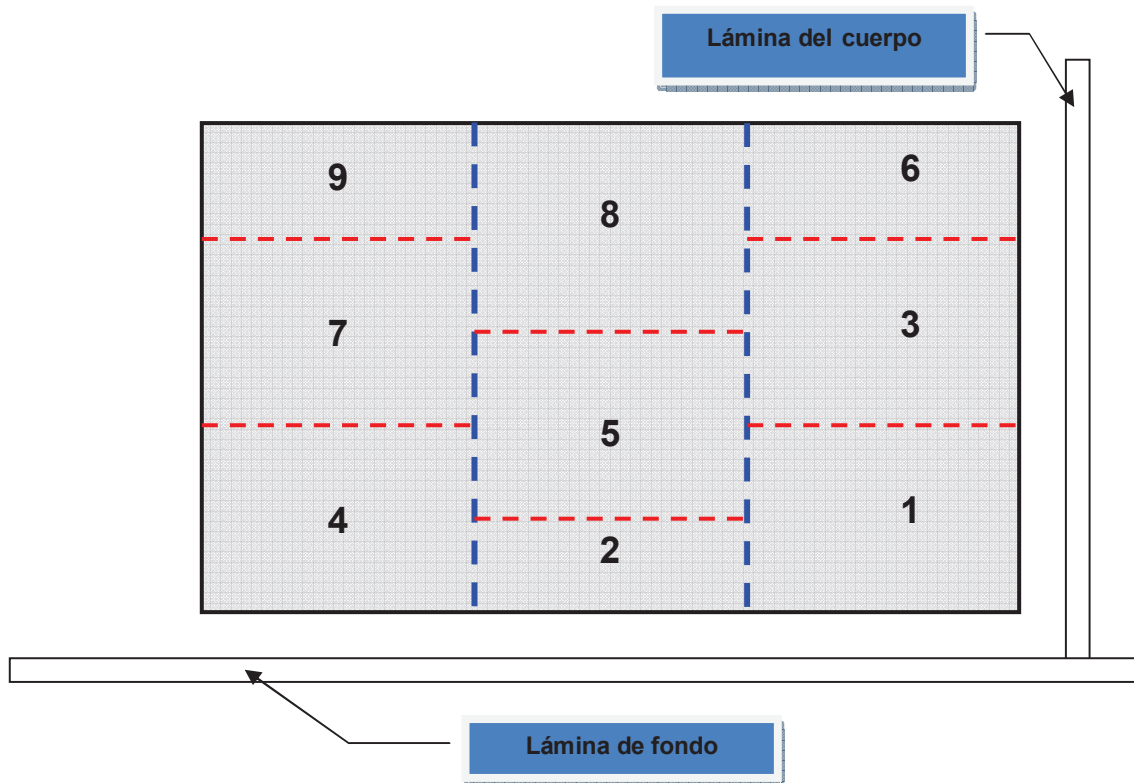


Figura 5. 16. Secuencia de Montaje de Módulos

Fuente: Santos CMI, 2010

Conforme avance la secuencia de montaje de módulos, se tiene que realizar un control permanente de la nivelación de la pared de los baffles en la parte inferior, un control de verticalidad y alineación de cada módulo y entre módulos, utilizar cuerdas, plomados, niveles y/o equipos topográficos calibrados para hacer el seguimiento del montaje.

- Las tolerancias aceptables para verticalidad, peaking y banding de todo el sistema deben al menos las dadas por el propio API-650 para el montaje del tanque. Las tolerancias de rectitud y pandeo se deben considerar las recomendaciones dadas por la AISC.
- Corregir cualquier medida fuera de tolerancia mediante chicagos o prensas en las juntas de unión entre módulos, y apuntalar con soportes provisionales entre baffles para que se vaya creando una estructura auto soportante.
- Puntear las juntas horizontales (líneas de color rojo) y las juntas verticales (líneas de color azul) conforme avanza el montaje, para dar rigidez a la estructura. Una vez que se haya completado el montaje y punteado de todos

los módulos se procederá a realizar las soldaduras definitivas en ambos lados del bafle.

- Es recomendable que se proceda ejecutando primero las soldaduras de las juntas verticales en forma descendente, para minimizar el aporte de calor a la estructura, siempre controlando la alineación de la junta con chicagos, posteriormente ejecutar las soldaduras de las juntas horizontales de forma alternada para no recalentar una sola área, de igual manera siempre controlando la alineación con chicagos.
- El supervisor de control de calidad debe verificar visualmente la calidad de las soldaduras y hará un control de las tolerancias dimensionales de todo el sistema. Cuando se hayan terminado todas las reparaciones y esté aprobado el montaje, se retiran los accesorios de alineación y los soportes temporales soldados al cuerpo para garantizar que toda la estructura descansa sobre el piso. Se subsanan todas las zonas donde se ejecutaron puntos de soldadura provisional y se re-inspeccionan por el supervisor de control de calidad.
- En la Figura 5. 17, se observan a dos paredes de bafles terminadas por montaje y soldadura, una se observa por el lado lámina y la otra por el lado perfil, se han retirado los soportes provisionales y únicamente se han dejado los amarres definitivos entre bafles.



Figura 5. 17. Paredes de bafles

Fuente: Santos CMI, 2010

5.5.2.4 Montaje de Amarres⁷⁸

- El montaje de amarres en los bafles implican 3 tipos: a) amarres del baffle al cuerpo del tanque, b) amarres del baffle al techo del tanque, y c) amarres entre bafles, donde cada uno de estos es de vital importancia instalarlo en el momento adecuado durante el montaje.
- Una vez que la parte inferior del baffle se encuentre nivelada, los amarres de techo son los primeros que deben quedar instalados definitivamente, ya que estos sirven para dar la rectitud de la pared de baffle y colocarla dentro de tolerancias. Estos amarres no deben soportar carga y deben quedar liberados

⁷⁸ Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46 (Rev. 0). Quito: Santos CMI. Pág.: 18-20.

por inspección visual, previo al montaje de láminas de techo por obvias restricciones de espacio. En la Figura 5. 18, se observa una sección de bafle con sus amarres a las vigas de techo. Adicionalmente en la Figura 3. 9, se observa un detalle típico de este tipo de soporte.

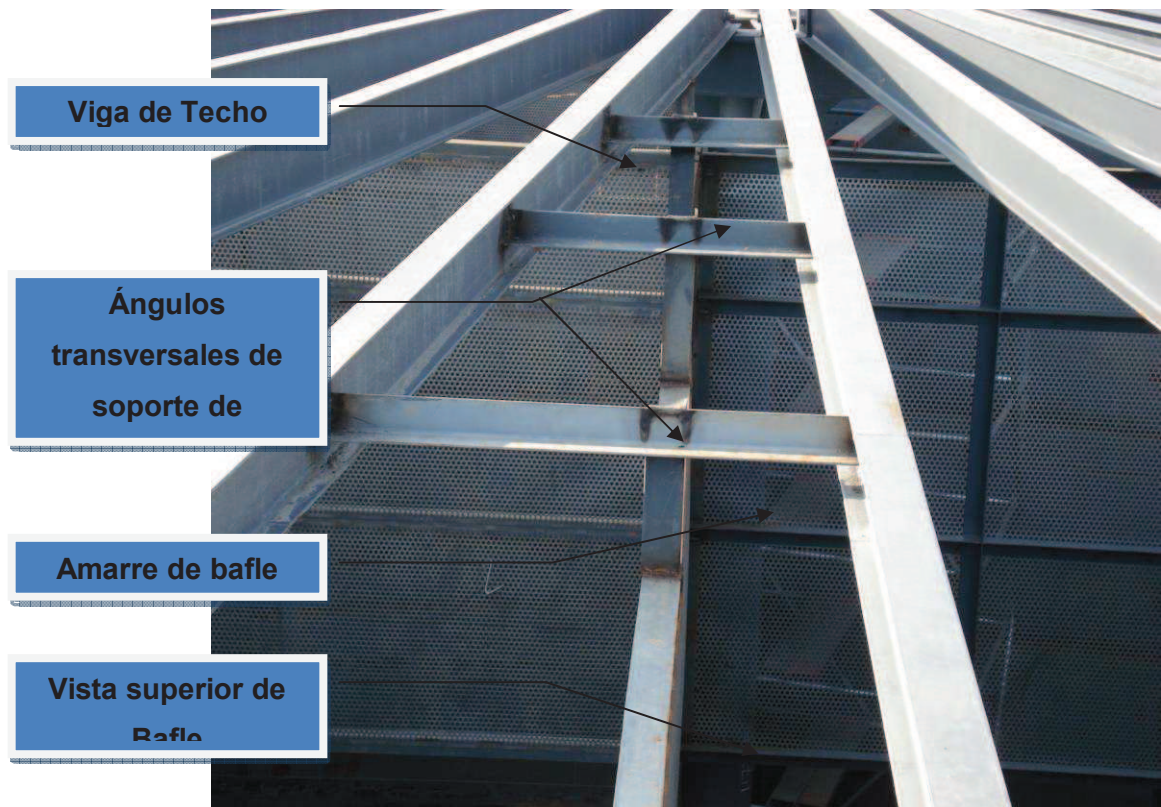


Figura 5. 18. Detalle de amarres de bafle al techo

Fuente: Santos CMI, 2010

- Posteriormente los amarres transversales entre baffles y de baffles al cuerpo del tanque deben irse completando, de tal forma que se logre formar una estructura auto portante y descansa todo el peso del baffle en las patas de apoyo al piso. En esta etapa se tiene que ir haciendo un trabajo de terminación de baffles ya que se van corrigiendo pequeñas undulaciones que se forman en las partes intermedias de las paredes y se es da la rectitud y plenitud requerida por las tolerancias.
- En la Figura 5. 17 se observan amarres inferiores e intermedios típicos entre dos paredes de baffles y en la parte superior el propio difusor viene a dar las funciones de soporte de amarre. Es muy importante que se verifique previo al montaje del difusor las medidas de este contra la distancia entre baffles, ya que

de ser necesario se pueden ajustar estas medidas en taller para garantizar un montaje adecuado.

- En la Figura 5. 19, se observan este tipo de soportes típicos, los cuales están conformados por un doble ángulo soldados entre sí en uno de los lados, al igual que en el caso anterior la medida de cada amarre debe verificarse con la medida real en el sitio de instalación para garantizar un función esperada de estos elementos.

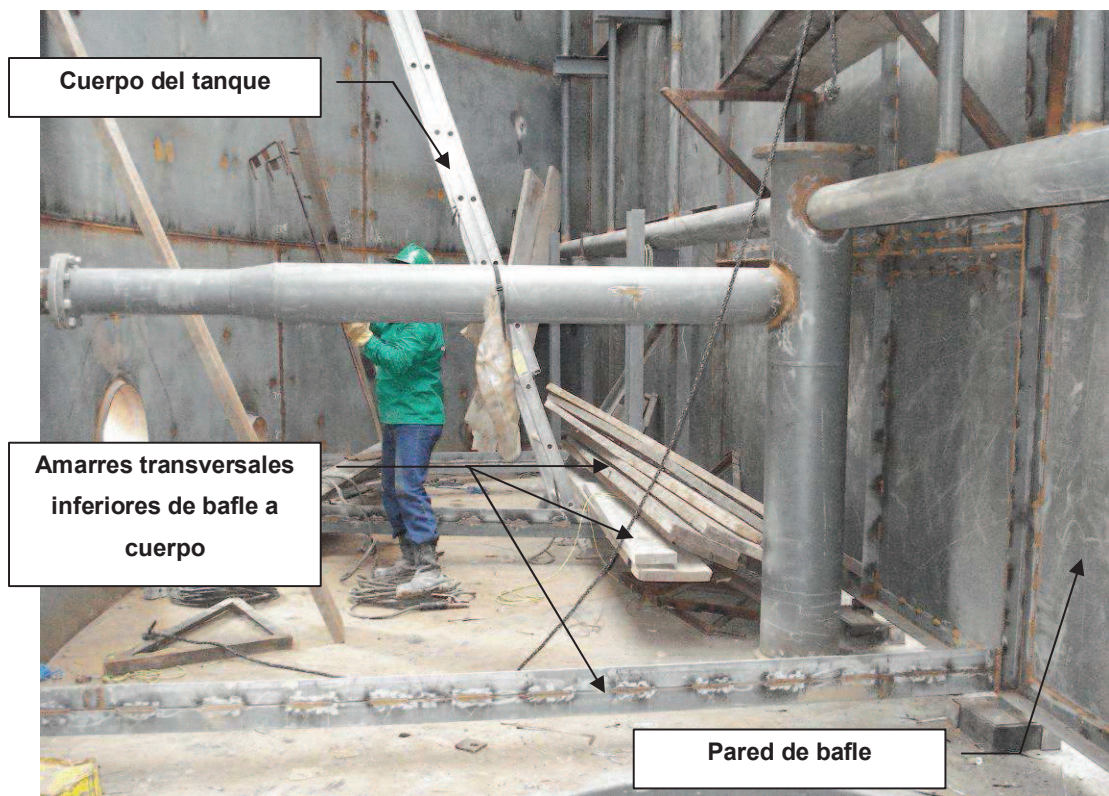


Figura 5. 19. Amarres transversales inferiores entre bafle y cuerpo del tanque

Fuente: Santos CMI, 2010

- En este punto, el tanque puede ser sometido a prueba hidrostática, si se han completado todas las inspecciones de soldadura y se hayan liberado dimensionalmente todos los baffles y sus elementos que actualmente están instalados.
- Posterior a la prueba hidrostática, se hace una inspección de todo el sistema ya que puede darse que ciertas zonas del fondo del tanque sufran pequeños hundimientos por los asentamientos del terreno durante la prueba y, sea necesario ajustar algunas patas del apoyo del bafle al piso del tanque. Una

vez verificado y aceptado nuevamente el control dimensional y tolerancias del bafle, se completa el montaje de soportes que van alineados del bafle al cuerpo del tanque y se instala la lámina de sello en la parte lateral entre el bafle y el cuerpo del tanque las láminas de sello entre los tacos de madera, el bafle y el piso.

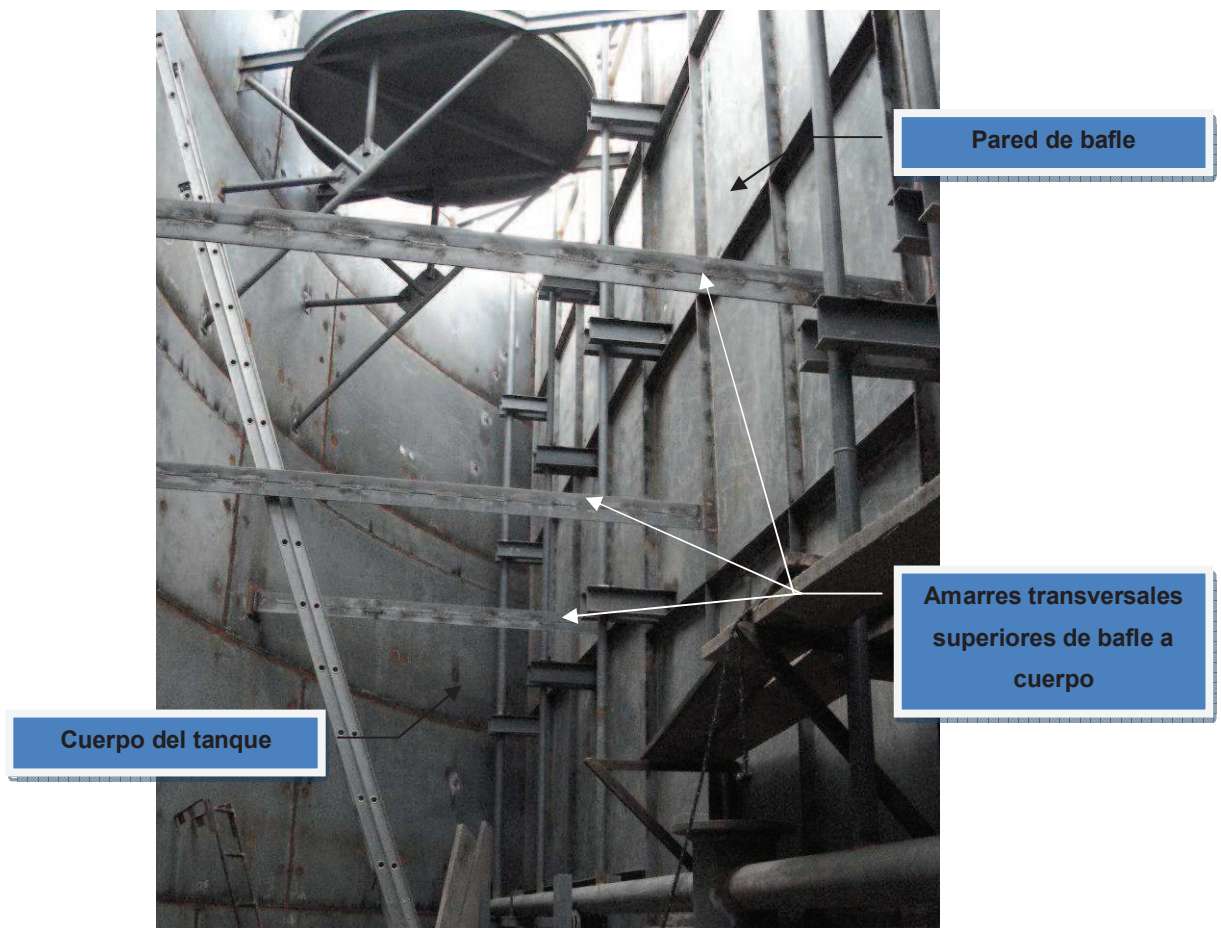


Figura 5. 20. Amarres transversales superiores entre bafle y cuerpo del tanque

Fuente: Santos CMI, 2010

CAPITULO 6

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se elaboró una hoja de cálculo que presenta un completo informe del diseño del tanque solicitado, que se ajusta al estándar API 650 con todas las restricciones, ventajas y recomendaciones del mismo, así como también la estructura soportante del techo y los deflectores internos al estándar ANSI/AISC 360. Además arroja un resumen de todos los datos calculados, lo que sirve para presentar una memoria de cálculo a los clientes que solicitan el diseño del tanque.
- El diseño del proceso de separación forma una parte fundamental en el dimensionamiento del tanque, de esto dependa el diámetro y la altura del mismo, para lo cual se debe realizar un correcto análisis para determinar unas adecuadas medidas del ancho de flujo w y la longitud efectiva L_{eff} .
- Para el dimensionamiento del tanque hay que tomar muy en cuenta el tiempo de retención del crudo que es dato proporcionado por el cliente, ya que de esto depende una correcta separación.
- Para el diseño del cuerpo del tanque es importante seleccionar el método correcto de cálculo de espesores para las planchas que conformarán el cuerpo, dependiendo del diámetro del mismo, ya que esto puede ayudar a disminuir el costo en materiales.
- El diseño, montaje y construcción de los deflectores internos se debe realizar independientemente del diseño del tanque, puesto que el montaje de los deflectores internos, no tiene que afectar el equilibrio para el que se encuentra diseñado el tanque.

6.2 RECOMENDACIONES

- Cuando se utiliza la hoja de cálculo, se debe tener abierto la menor cantidad de ventanas de Excel u otro programa o aplicación.
- Se podría adicionar una hoja adicional, que realice un análisis de costos unitarios.
- Ajustar el diámetro del tanque a un valor múltiplo de 5, con lo cual se facilita el ajuste de los cálculos de la hoja excel.

CAPITULO 7

7 BIBLIOGRAFÍA

Stewart M. y Arnold K. (2009). *Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting*. Oxford, USA: Elsevier Inc.

Villavicencio E. G. (2012). *Maestría en Gestión en la Industria de los Hidrocarburos: Recolección, Transporte y Distribución del Gas Natural y el Crudo Tomo IV (4ta. ed.)*. Santa Cruz, Bolivia: U VIRTUAL Centro de Excelencia.

Aguirre E. y Vivas Y. (2005). *Elaboración del Manual de Operaciones de la Estación de Flujo Elías 11 (EEF-11), Ubicada en el Campo Socorro Oeste, Estado Anzoátegui. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero de Petróleo)*. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Marfisi S. y Salager J. L. (2004). *Deshidratación de Crudo: Principios y Tecnología, Cuaderno FIRP N° 853 PP*. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes.

American Petroleum Institute. (2007). *API 650: Welded Tanks for Oil Storage (11ava. Ed.)*. Washington D.C., USA: American Petroleum Institute.

Inglesa. (2004). *Diseño de Tanques de Almacenamiento*. México: Inglesa.

MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito. (2013). *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC): Capítulo 2, Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente*. Quito, Ecuador: MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito.

- Santos CMI. (2010). 10-PR-7.5.1-M46: Montaje de Baffles en Tanques de Proceso tipo API-650 (Rev. 00). Quito, Ecuador: Santos CMI.
- PEC Cía. Ltda. (2013). PEC-39PR-035: Montaje de Tanques de Almacenamiento (Rev. 0). Quito, Ecuador: PEC, Cía. Ltda.
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2010). Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction (AISC).
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2010). Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design (9na. ed.). Chicago, USA: American Institute of Steel Construction (AISC).
- Armijos S. y Medina G. (2010). Propiedades Físico-mecánicas de las Maderas tipo A: Guayacan Pechiche, Colorado, Sande y Mascarey: Aplicación al Diseño del Paradero en el IASA II. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil). Escuela Politécnica del Ejercito, Quito, Ecuador.
- Fernández G. (1983). Resistencia de Materiales, Tomo II: Flexión de placas circulares, sometidas a cargas simétricas. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación.
- Bustamante L. y González J. (2007). Desarrollo de un Software para Diseño de Tanques Atmosféricos de Techo Cónico para Hidrocarburos Almacenados en Refinería la Libertad. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Barrera R. y Batallas E. (1994). Estandarización de la Estructura para Tanques de Almacenamiento de Techo Cónico. (Proyecto previo a la obtención de Ingeniero Mecánico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO 1

MATERIALES PERMITIDOS PARA LÁMINAS Y ESFUERZOS ADMISIBLES PARA PRUEBA DE DISEÑO Y PRUEBA HIDROSTÁTICA

Tabla A1. 1. Materiales permitidos para láminas y esfuerzos admisibles

Plate Specification	Grade	Minimum Yield Strength MPa (psi)	Minimum Tensile Strength MPa (psi)	Product Design Stress S_d MPa (psi)	Hydrostatic Test Stress S_t MPa (psi)
ASTM Specifications					
A 283M	C	205 (30,000)	380 (55,000)	137 (20,000)	154 (22,500)
A 285M	C	205 (30,000)	380 (55,000)	137 (20,000)	154 (22,500)
A 131M	A, B, CS	235 (34,000)	400 (58,000)	157 (22,700)	171 (24,900)
A 36M	—	250 (36,000)	400 (58,000)	160 (23,200)	171 (24,900)
A 131M	EH 36	360 (51,000)	490 ^a (71,000 ^a)	196 (28,400)	210 (30,400)
A 573M	400	220 (32,000)	400 (58,000)	147 (21,300)	165 (24,000)
A 573M	450	240 (35,000)	450 (65,000)	160 (23,300)	180 (26,300)
A 573M	485	290 (42,000)	485 ^a (70,000 ^a)	193 (28,000)	208 (30,000)
A 516M	380	205 (30,000)	380 (55,000)	137 (20,000)	154 (22,500)
A 516M	415	220 (32,000)	415 (60,000)	147 (21,300)	165 (24,000)
A 516M	450	240 (35,000)	450 (65,000)	160 (23,300)	180 (26,300)
A 516M	485	260 (38,000)	485 (70,000)	173 (25,300)	195 (28,500)
A 662M	B	275 (40,000)	450 (65,000)	180 (26,000)	193 (27,900)
A 662M	C	295 (43,000)	485 ^a (70,000 ^a)	194 (28,000)	208 (30,000)
A 537M	1	345 (50,000)	485 ^a (70,000 ^a)	194 (28,000)	208 (30,000)
A 537M	2	415 (60,000)	550 ^a (80,000 ^a)	220 (32,000)	236 (34,300)
A 633M	C, D	345 (50,000)	485 ^a (70,000 ^a)	194 (28,000)	208 (30,000)
A 678M	A	345 (50,000)	485 ^a (70,000 ^a)	194 (28,000)	208 (30,000)
A 678M	B	415 (60,000)	550 ^a (80,000 ^a)	220 (32,000)	236 (34,300)
A 737M	B	345 (50,000)	485 ^a (70,000 ^a)	194 (28,000)	208 (30,000)
A 841M	—	345 (50,000)	485 ^a (70,000 ^a)	194 (28,000)	208 (30,000)
CSA Specifications					
G40.21M	260W	260 (37,700)	410 (59,500)	164 (23,800)	176 (25,500)
G40.21M	300W	300 (43,500)	450 (65,300)	180 (26,100)	193 (28,000)
G40.21M	350WT	350 (50,800)	480 ^a (69,600 ^a)	192 (27,900)	206 (29,800)
G40.21M	350W	350 (50,800)	450 (65,300)	180 (26,100)	193 (28,000)
National Standards					
	235	235 (34,000)	365 (52,600)	137 (20,000)	154 (22,500)
	250	250 (36,000)	400 (58,300)	157 (22,700)	171 (25,000)
	275	275 (40,000)	430 (62,600)	167 (24,000)	184 (26,800)
ISO 630					
E 275	C, D	265 (38,400)	425 (61,900)	170 (24,700)	182 (26,500)
E 355	C, D	345 (50,000)	490 ^a (71,000 ^a)	196 (28,400)	210 (30,400)

ANEXO 2

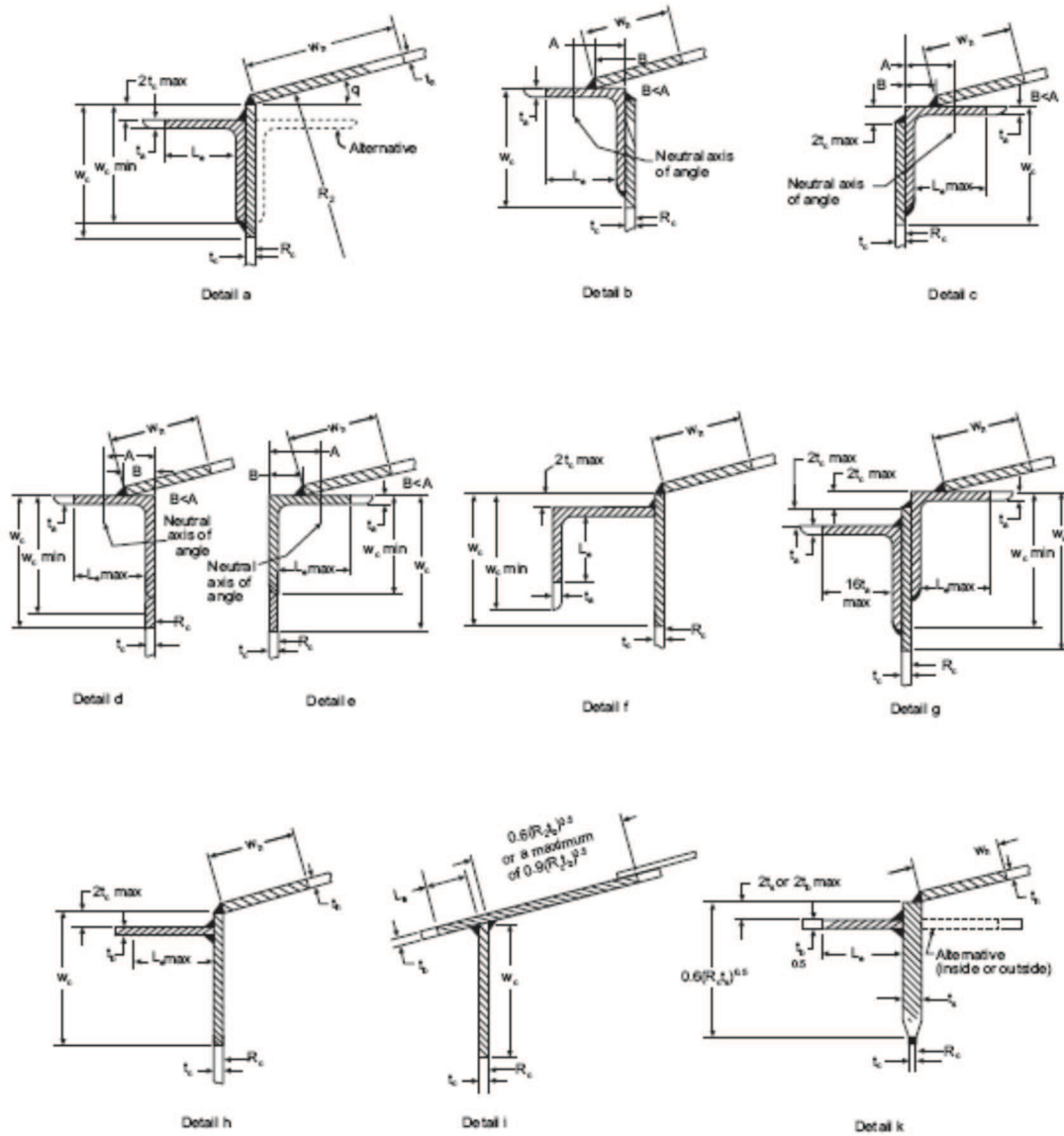


Figura A2. 1. Detalles permitidos por la API 650 para anillos de compresión

NOTAS:

A: distancia desde el filo del anillo hasta el eje neutral del ángulo.

B: distancia desde el filo del anillo hasta el tope de la lámina del techo.

W_c : máxima longitud considerada del cuerpo, se calcula con $W_c = 0.6(R_c * t_s)^{0.5}$.

R_c : radio interior del tanque (radio nominal del tanque – espesor del último anillo).

W_h : máxima longitud considerada del techo, se calcula con $W_h = 0.3(R_2 * t_h)^{0.5}$.

t_s : espesor del último anillo + placa de refuerzo, caso contrario $t_s = t_c$, t_c espesor del último anillo.

$R_2 = R_c / \sin \theta$, donde θ es la pendiente del techo. R_2 es distancia perpendicular al techo hasta el eje neutral.

t_h : espesor de las placas del techo.

t_a : espesor de la pata del ángulo.

t_b : espesor de la barra o ala del ángulo.

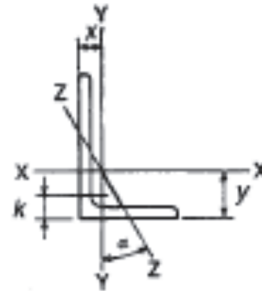
ANGLES

Equal legs and unequal legs
Properties for designing

Size and Thickness	k	Weight per Ft	Area	AXIS X-X				AXIS Y-Y				AXIS Z-Z		
				I	S	r	y	I	S	r	x	r	Tan α	
In.	In.	Lb.	In. ²	In. ⁴	In. ³	In.	In.	In. ⁴	In. ³	In.	In.	In.		
L 5×3½×	¾	1¼	19.8	5.81	13.9	4.28	1.55	1.75	5.55	2.22	0.977	0.996	0.748	0.464
	¾	1½	16.8	4.92	12.0	3.65	1.56	1.70	4.83	1.90	0.991	0.951	0.751	0.472
	½	1	13.6	4.00	9.99	2.99	1.58	1.66	4.05	1.56	1.01	0.906	0.755	0.479
	¾	¾	12.0	3.53	8.90	2.64	1.59	1.63	3.63	1.39	1.01	0.883	0.758	0.482
	¾	¾	10.4	3.05	7.79	2.29	1.60	1.61	3.18	1.21	1.02	0.861	0.762	0.486
	¾	¾	8.7	2.56	6.60	1.94	1.61	1.59	2.72	1.02	1.03	0.838	0.766	0.489
¾	¾	7.0	2.06	5.39	1.57	1.62	1.56	2.23	0.830	1.04	0.814	0.770	0.492	
L 5×3 ×	¾	1	15.7	4.61	11.4	3.55	1.57	1.80	3.06	1.39	0.815	0.795	0.644	0.349
	½	1	12.8	3.75	9.45	2.91	1.59	1.75	2.58	1.15	0.829	0.750	0.648	0.357
	¾	¾	11.3	3.31	8.43	2.58	1.60	1.73	2.32	1.02	0.837	0.727	0.651	0.361
	¾	¾	9.8	2.86	7.37	2.24	1.61	1.70	2.04	0.888	0.845	0.704	0.654	0.364
	¾	¾	8.2	2.40	6.26	1.89	1.61	1.68	1.75	0.753	0.853	0.681	0.658	0.368
	¾	¾	6.6	1.94	5.11	1.53	1.62	1.66	1.44	0.614	0.861	0.657	0.663	0.371
L 4×4 ×	¾	1½	18.5	5.44	7.67	2.81	1.19	1.27	7.67	2.81	1.19	1.27	0.778	1.000
	¾	1	15.7	4.61	6.66	2.40	1.20	1.23	6.66	2.40	1.20	1.23	0.779	1.000
	½	¾	12.8	3.75	5.56	1.97	1.22	1.18	5.56	1.97	1.22	1.18	0.782	1.000
	¾	¾	11.3	3.31	4.97	1.75	1.23	1.16	4.97	1.75	1.23	1.16	0.785	1.000
	¾	¾	9.8	2.86	4.36	1.52	1.23	1.14	4.36	1.52	1.23	1.14	0.788	1.000
	¾	¾	8.2	2.40	3.71	1.29	1.24	1.12	3.71	1.29	1.24	1.12	0.791	1.000
¾	¾	6.6	1.94	3.04	1.05	1.25	1.09	3.04	1.05	1.25	1.09	0.795	1.000	
L 4×3½×	¾	¾	11.9	3.50	5.32	1.94	1.23	1.25	3.79	1.52	1.04	1.00	0.722	0.750
	¾	¾	10.6	3.09	4.76	1.72	1.24	1.23	3.40	1.35	1.05	0.978	0.724	0.753
	¾	¾	9.1	2.67	4.18	1.49	1.25	1.21	2.95	1.17	1.06	0.955	0.727	0.755
	¾	¾	7.7	2.25	3.56	1.26	1.26	1.18	2.55	0.994	1.07	0.932	0.730	0.757
	¾	¾	6.2	1.81	2.91	1.03	1.27	1.16	2.09	0.806	1.07	0.909	0.734	0.759

Figura A2. 2. Detalles recomendados por el manual de la AISC

ANGLES
Equal legs and unequal legs
Properties for designing



Size and Thickness	k	Weight per Ft	Area	AXIS X-X				AXIS Y-Y				AXIS Z-Z	
				I	S	r	y	I	S	r	x	r	Tan α
in.	in.	Lb.	in. ²	in. ⁴	in. ³	in.	in.	in. ⁴	in. ³	in.	in.	in.	in.
L 4 x3 x 1/2	1/16	11.1	3.25	5.05	1.89	1.25	1.33	2.42	1.12	0.864	0.827	0.639	0.543
	3/16	9.8	2.87	4.52	1.68	1.25	1.30	2.18	0.992	0.871	0.804	0.641	0.547
	1/4	8.5	2.48	3.95	1.46	1.26	1.28	1.92	0.866	0.879	0.782	0.644	0.551
	5/16	7.2	2.09	3.38	1.23	1.27	1.26	1.65	0.734	0.887	0.759	0.647	0.554
	3/8	5.8	1.69	2.77	1.00	1.28	1.24	1.36	0.599	0.896	0.736	0.651	0.558
L 3 1/2 x3 1/2 x 1/2	1/16	11.1	3.25	3.64	1.49	1.06	1.06	3.64	1.49	1.06	1.06	0.683	1.000
	3/16	9.8	2.87	3.26	1.32	1.07	1.04	3.26	1.32	1.07	1.04	0.684	1.000
	1/4	8.5	2.48	2.87	1.15	1.07	1.01	2.87	1.15	1.07	1.01	0.687	1.000
	5/16	7.2	2.09	2.45	0.976	1.08	0.990	2.45	0.976	1.08	0.990	0.690	1.000
	3/8	5.8	1.69	2.01	0.794	1.09	0.968	2.01	0.794	1.09	0.968	0.694	1.000
L 3 1/2 x3 x 1/2	1/16	10.2	3.00	3.45	1.45	1.07	1.13	2.33	1.10	0.881	0.875	0.621	0.714
	3/16	9.1	2.65	3.10	1.29	1.08	1.10	2.09	0.975	0.889	0.853	0.622	0.718
	1/4	7.9	2.30	2.72	1.13	1.09	1.08	1.85	0.851	0.897	0.830	0.625	0.721
	5/16	6.6	1.93	2.33	0.954	1.10	1.06	1.58	0.722	0.905	0.808	0.627	0.724
	3/8	5.4	1.56	1.91	0.776	1.11	1.04	1.30	0.589	0.914	0.785	0.631	0.727
L 3 1/2 x2 1/2 x 1/2	1/16	9.4	2.75	3.24	1.41	1.09	1.20	1.36	0.760	0.704	0.705	0.534	0.486
	3/16	8.3	2.43	2.91	1.26	1.09	1.18	1.23	0.677	0.711	0.682	0.535	0.491
	1/4	7.2	2.11	2.56	1.09	1.10	1.16	1.09	0.592	0.719	0.660	0.537	0.496
	5/16	6.1	1.78	2.19	0.927	1.11	1.14	0.939	0.504	0.727	0.637	0.540	0.501
	3/8	4.9	1.44	1.80	0.755	1.12	1.11	0.777	0.412	0.735	0.614	0.544	0.506
L 3 x3 x 1/2	1/16	9.4	2.75	2.22	1.07	0.898	0.932	2.22	1.07	0.898	0.932	0.584	1.000
	3/16	8.3	2.43	1.99	0.954	0.905	0.910	1.99	0.954	0.905	0.910	0.585	1.000
	1/4	7.2	2.11	1.76	0.833	0.913	0.888	1.76	0.833	0.913	0.888	0.587	1.000
	5/16	6.1	1.78	1.51	0.707	0.922	0.865	1.51	0.707	0.922	0.865	0.589	1.000
	3/8	4.9	1.44	1.24	0.577	0.930	0.842	1.24	0.577	0.930	0.842	0.592	1.000
1/2	3.71	1.09	0.982	0.441	0.939	0.820	0.962	0.441	0.939	0.820	0.596	1.000	

Figura A2. 3. Detalles recomendados por el manual de la AISC

ANGLES

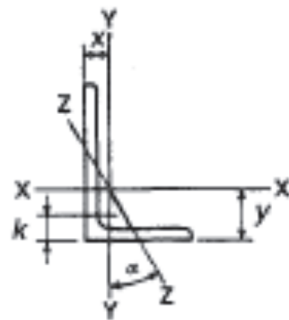
Equal legs and unequal legs
Properties for designing

Size and Thickness	k	Weight per Ft	Area	AXIS X-X				AXIS Y-Y				AXIS Z-Z		
				I	S	r	y	I	S	r	x	r	Tan α	
				In. ⁴	In. ³	In.	In.	In. ⁴	In. ³	In.	In.	In.		
L 3 x 2½ x	½	⅞	8.5	2.50	2.08	1.04	0.913	1.00	1.30	0.744	0.722	0.750	0.520	0.667
	⅜	⅞	7.6	2.21	1.88	0.928	0.920	0.978	1.18	0.664	0.729	0.728	0.521	0.672
	¼	¾	6.6	1.92	1.66	0.810	0.928	0.956	1.04	0.581	0.736	0.706	0.522	0.676
	⅜	⅞	5.6	1.62	1.42	0.688	0.937	0.933	0.898	0.494	0.744	0.683	0.525	0.680
	¼	¾	4.5	1.31	1.17	0.561	0.945	0.911	0.743	0.404	0.753	0.661	0.528	0.684
	⅜	⅞	3.39	0.996	0.907	0.430	0.954	0.888	0.577	0.310	0.761	0.638	0.533	0.688
L 3 x 2 x	½	⅞	7.7	2.25	1.92	1.00	0.924	1.08	0.672	0.474	0.546	0.583	0.428	0.414
	⅜	¾	6.8	2.00	1.73	0.894	0.932	1.06	0.609	0.424	0.553	0.561	0.429	0.421
	¼	¾	5.9	1.73	1.53	0.781	0.940	1.04	0.543	0.371	0.559	0.539	0.430	0.428
	⅜	¾	5.0	1.46	1.32	0.664	0.948	1.02	0.470	0.317	0.567	0.516	0.432	0.435
	¼	¾	4.1	1.19	1.09	0.542	0.957	0.963	0.392	0.260	0.574	0.493	0.435	0.440
	⅜	¾	3.07	0.902	0.842	0.415	0.966	0.970	0.307	0.200	0.583	0.470	0.438	0.446
L 2½ x 2½ x	½	⅞	7.7	2.25	1.23	0.724	0.739	0.806	1.23	0.724	0.739	0.806	0.487	1.000
	⅜	⅞	5.9	1.73	0.984	0.566	0.753	0.762	0.984	0.566	0.753	0.762	0.487	1.000
	¼	¾	5.0	1.46	0.849	0.482	0.761	0.740	0.849	0.482	0.761	0.740	0.489	1.000
	⅜	¾	4.1	1.19	0.703	0.394	0.769	0.717	0.703	0.394	0.769	0.717	0.491	1.000
	¼	¾	3.07	0.902	0.547	0.303	0.778	0.694	0.547	0.303	0.778	0.694	0.495	1.000
	⅜	¾	2.75	0.809	0.509	0.293	0.793	0.764	0.291	0.196	0.600	0.514	0.427	0.631
L 2½ x 2 x	½	⅞	5.3	1.55	0.912	0.547	0.768	0.831	0.514	0.363	0.577	0.581	0.420	0.614
	⅜	¾	4.5	1.31	0.788	0.466	0.776	0.809	0.446	0.310	0.584	0.559	0.422	0.620
	¼	¾	3.62	1.06	0.654	0.381	0.784	0.787	0.372	0.254	0.592	0.537	0.424	0.626
	⅜	¾	2.75	0.809	0.509	0.293	0.793	0.764	0.291	0.196	0.600	0.514	0.427	0.631
	½	⅞	4.7	1.36	0.479	0.351	0.594	0.636	0.479	0.351	0.594	0.636	0.389	1.000
	⅜	¾	3.92	1.15	0.416	0.300	0.601	0.614	0.416	0.300	0.601	0.614	0.390	1.000
L 2 x 2 x	¼	¾	3.19	0.938	0.348	0.247	0.609	0.592	0.348	0.247	0.609	0.592	0.391	1.000
	⅜	¾	2.44	0.715	0.272	0.190	0.617	0.569	0.272	0.190	0.617	0.569	0.394	1.000
	¼	¾	1.65	0.484	0.190	0.131	0.626	0.546	0.190	0.131	0.626	0.546	0.396	1.000
	⅜	¾	1.65	0.484	0.190	0.131	0.626	0.546	0.190	0.131	0.626	0.546	0.396	1.000

Figura A2. 4. Detalles recomendados por el manual de la AISC

ANGLES

Equal legs and unequal legs
Properties for designing



Size and Thickness	k	Weight per Ft	Area	AXIS X-X				AXIS Y-Y				AXIS Z-Z	
				I	S	r	y	I	S	r	x	r	Tan α
In.	In.	Lb.	In. ²	In. ⁴	In. ³	In.	In.	In. ⁴	In. ³	In.	In.	In.	
L 1½x1½x¼	¼	2.77	0.813	0.227	0.227	0.529	0.529	0.227	0.227	0.529	0.529	0.341	1.000
	⅜	2.12	0.621	0.179	0.144	0.537	0.506	0.179	0.144	0.537	0.506	0.343	1.000
L 1½x1½x⅜	⅜	2.34	0.688	0.139	0.134	0.449	0.466	0.139	0.134	0.449	0.466	0.292	1.000
	½	1.80	0.527	0.110	0.104	0.457	0.444	0.110	0.104	0.457	0.444	0.293	1.000
L 1½x1½x½	⅜	1.92	0.563	0.077	0.091	0.369	0.403	0.077	0.091	0.369	0.403	0.243	1.000
	½	1.48	0.434	0.061	0.071	0.377	0.381	0.061	0.071	0.377	0.381	0.244	1.000
L 1½x1½x⅝	⅜	0.900	0.266	0.032	0.040	0.345	0.327	0.032	0.040	0.345	0.327	0.221	1.000
L 1 x1 x¼	¼	0.800	0.234	0.022	0.031	0.304	0.296	0.022	0.031	0.304	0.296	0.196	1.000

Figura A2. 5. Detalles recomendados por el manual de la AISC

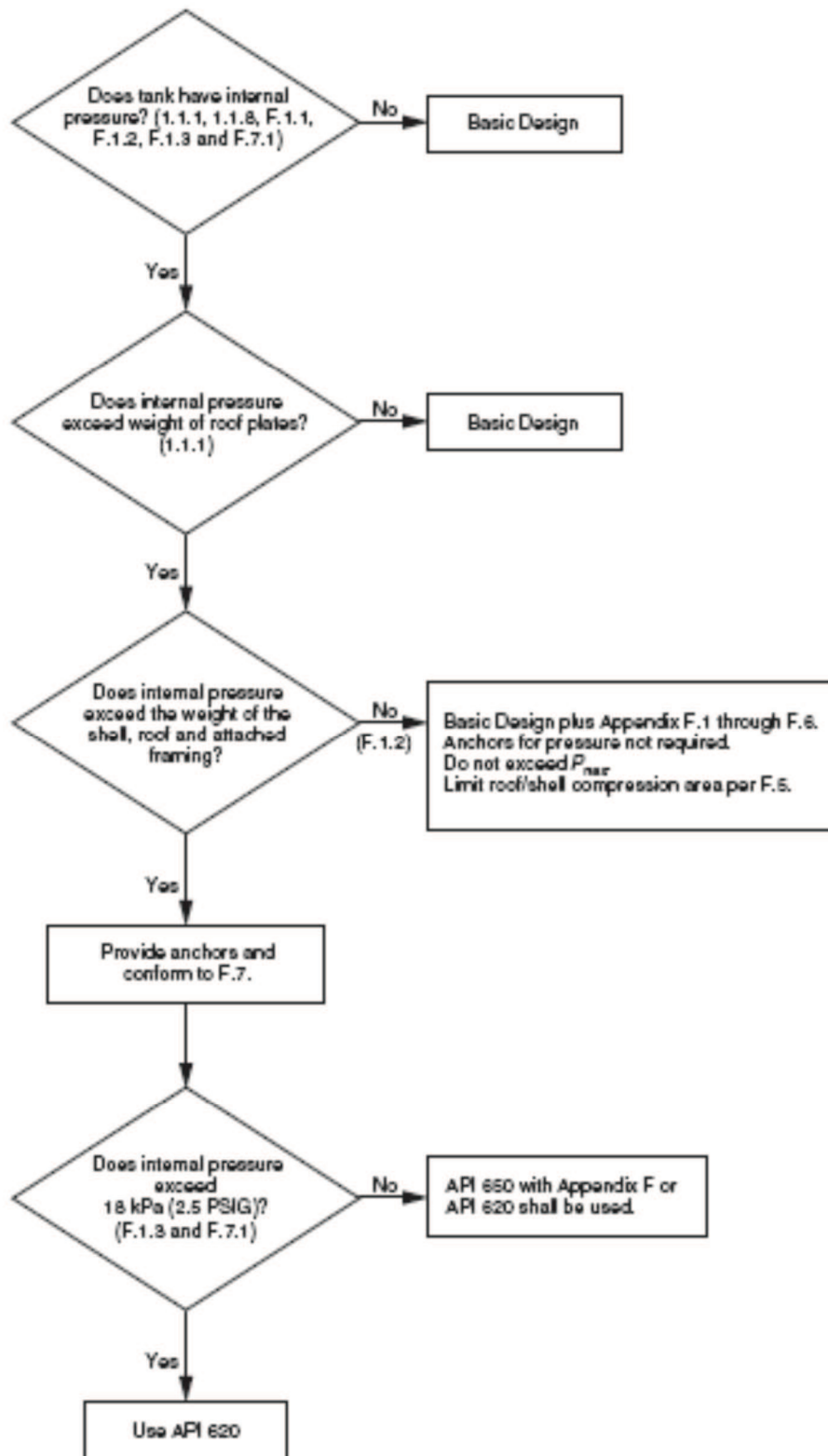


Figura A2. 6. Diagrama de Flujo recomendado por la API 650 para cálculo de presión interna

ANEXO 3

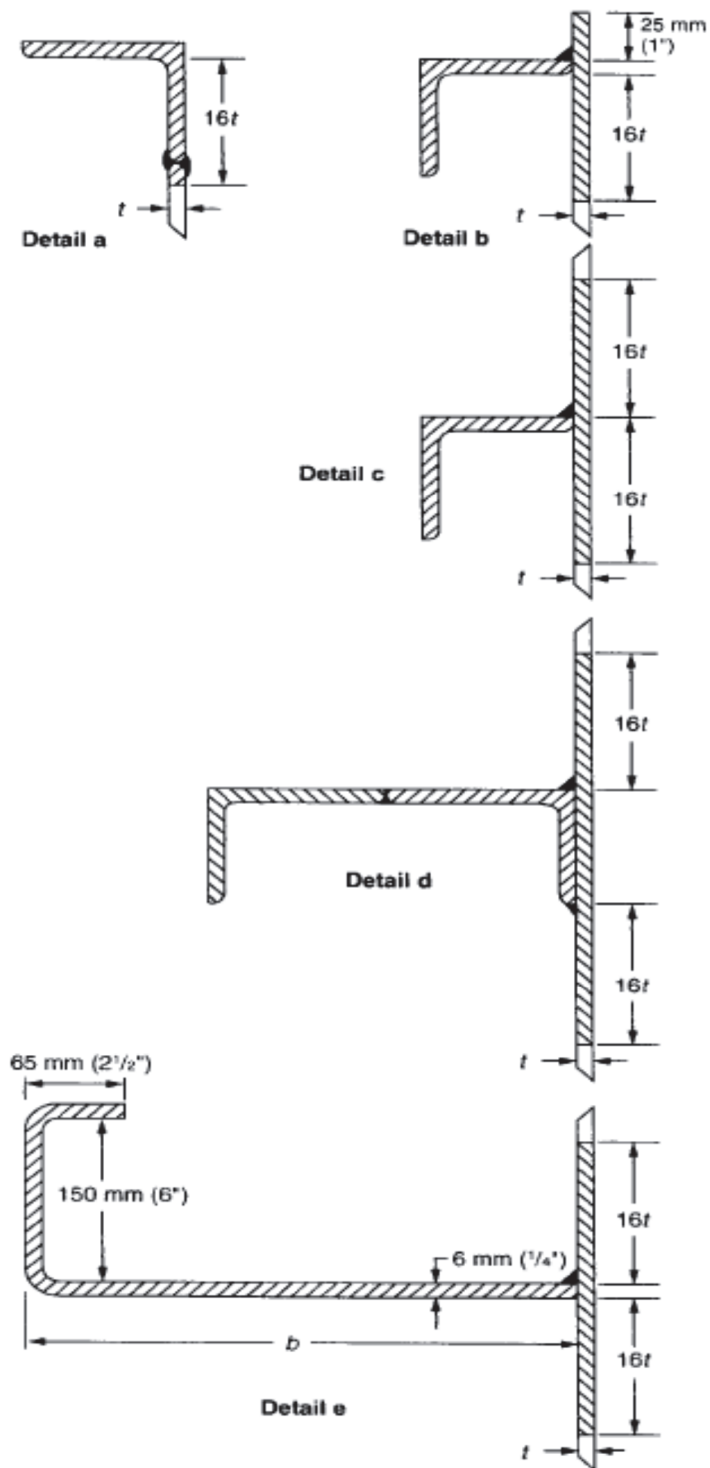


Figura A3. 1. Juntas típicas para vigas intermedias de viento

Tabla A3.1 1. Módulo de Sección [cm³(in³)] de Anillos de Rigidez sobre Anillos del Tanque

Column 1		Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6
Member Size		Shell Thickness [mm (in.)]				
mm	in.	5 (³ / ₁₆)	6 (¹ / ₄)	8 (⁵ / ₁₆)	10 (³ / ₈)	11 (⁷ / ₁₆)
Top Angle: Figure 3-18, Detail a						
64 × 64 × 6.4	2½ × 2½ × ¼	6.86 (0.41)	7.01 (0.42)	—	—	—
64 × 64 × 7.9	2½ × 2½ × 5/16	8.30 (0.51)	8.48 (0.52)	—	—	—
76 × 76 × 9.5	3 × 3 × 3/8	13.80 (0.89)	14.10 (0.91)	—	—	—
Curb Angle: Figure 3-18, Detail b						
64 × 64 × 6.4	2½ × 2½ × ¼	27.0 (1.61)	28.3 (1.72)	—	—	—
64 × 64 × 7.9	2½ × 2½ × 1/16	31.1 (1.89)	32.8 (2.04)	—	—	—
76 × 76 × 6.4	3 × 3 × ¼	38.1 (2.32)	39.9 (2.48)	—	—	—
76 × 76 × 9.5	3 × 3 × 3/8	43.0 (2.78)	52.6 (3.35)	—	—	—
102 × 102 × 6.4	4 × 4 × ¼	57.6 (3.64)	71.4 (4.41)	—	—	—
102 × 102 × 9.5	4 × 4 × 3/8	65.6 (4.17)	81.4 (5.82)	—	—	—
One Angle: Figure 3-18, Detail c (See Note)						
64 × 64 × 6.4	2½ × 2½ × ¼	28.5 (1.68)	29.6 (1.79)	31.3 (1.87)	32.7 (1.93)	33.4 (2.00)
64 × 64 × 7.9	2½ × 2½ × 5/16	33.1 (1.98)	34.6 (2.13)	36.9 (2.23)	38.7 (2.32)	39.5 (2.40)
102 × 76 × 6.4	4 × 3 × ¼	58.3 (3.50)	60.8 (3.73)	64.2 (3.89)	66.6 (4.00)	67.7 (4.10)
102 × 76 × 7.9	4 × 3 × 5/16	68.3 (4.14)	71.6 (4.45)	76.2 (4.66)	79.4 (4.82)	80.8 (4.95)
127 × 76 × 7.9	5 × 3 × 5/16	90.7 (5.53)	95.2 (5.96)	102.0 (6.25)	106.0 (6.47)	108.0 (6.64)
127 × 89 × 7.9	5 × 3½ × 5/16	101.0 (6.13)	106.0 (6.60)	113.0 (6.92)	118.0 (7.16)	120.0 (7.35)
127 × 89 × 9.5	5 × 3½ × 3/8	116.0 (7.02)	122.0 (7.61)	131.0 (8.03)	137.0 (8.33)	140.0 (8.58)
152 × 102 × 9.5	6 × 4 × 3/8	150.0 (9.02)	169.0 (10.56)	182.0 (11.15)	191.0 (11.59)	194.0 (11.93)
Two Angles: Figure 3-18, Detail d (See Note)						
102 × 76 × 7.9	4 × 3 × 5/16	186 (11.27)	191 (11.78)	200 (12.20)	207 (12.53)	210 (12.81)
102 × 76 × 9.5	4 × 3 × 3/8	216 (13.06)	222 (13.67)	233 (14.18)	242 (14.60)	245 (14.95)
127 × 76 × 7.9	5 × 3 × 5/16	254 (15.48)	262 (16.23)	275 (16.84)	285 (17.34)	289 (17.74)
127 × 76 × 9.5	5 × 3 × 3/8	296 (18.00)	305 (18.89)	321 (19.64)	333 (20.26)	338 (20.77)
127 × 89 × 7.9	5 × 3½ × 5/16	279 (16.95)	287 (17.70)	300 (18.31)	310 (18.82)	314 (19.23)
127 × 89 × 9.5	5 × 3½ × 3/8	325 (19.75)	334 (20.63)	350 (21.39)	363 (22.01)	368 (22.54)
152 × 102 × 9.5	6 × 4 × 3/8	456 (27.74)	468 (28.92)	489 (29.95)	507 (30.82)	514 (31.55)
Formed Plate: Figure 3-18, Detail e						
b = 10	—	—	341 (23.29)	375 (24.63)	392 (25.61)	399 (26.34)
b = 12	—	—	427 (29.27)	473 (31.07)	496 (32.36)	505 (33.33)
b = 14	—	—	519 (35.49)	577 (37.88)	606 (39.53)	618 (40.78)
b = 16	—	—	615 (42.06)	687 (45.07)	723 (47.10)	737 (48.67)
b = 18	—	—	717 (48.97)	802 (52.62)	846 (55.07)	864 (56.99)
b = 20	—	—	824 (56.21)	923 (60.52)	976 (63.43)	996 (65.73)
b = 22	—	—	937 (63.80)	1049 (68.78)	1111 (72.18)	1135 (74.89)
b = 24	—	—	1054 (71.72)	1181 (77.39)	1252 (81.30)	1280 (84.45)
b = 26	—	—	1176 (79.99)	1317 (86.35)	1399 (90.79)	1432 (94.41)
b = 28	—	—	1304 (88.58)	1459 (95.66)	1551 (100.65)	1589 (104.77)
b = 30	—	—	1436 (97.52)	1607 (105.31)	1709 (110.88)	1752 (115.52)
b = 32	—	—	1573 (106.78)	1759 (115.30)	1873 (121.47)	1921 (126.66)
b = 34	—	—	1716 (116.39)	1917 (125.64)	2043 (132.42)	2096 (138.17)
b = 36	—	—	1864 (126.33)	2080 (136.32)	2218 (143.73)	2276 (150.07)
b = 38	—	—	2016 (136.60)	2248 (147.35)	2398 (155.40)	2463 (162.34)
b = 40	—	—	2174 (147.21)	2421 (158.71)	2584 (167.42)	2654 (174.99)

ANEXO 4

Suelos Cohesivos	Velocidad de ondas de corte, Vs (m/s)	Resistencia al corte No drenada, Su (Kpa)	Espesor del estrato (m)
Blandos	<200	<25	>20
Semiblandos	200-400	25-50	>25
Duros	400-750	50-100	>40
Muy duros	>750	100-200	>60

Suelos Granulares	Velocidad de ondas de corte, Vs (m/s)	Valores N del SPT	Espesor del estrato (m)
Sueltos	<200	4-10	>40
Semidensos	200-750	10-30	>45
Densos	>750	>30	>100

Perfil tipo	Descripción	S	Cm
S1	Roca o suelo firme	1,0	2,5
S2	Suelos intermedios	1,2	3,0
S3	Suelos blandos y estrato profundo	1,5	2,8
S4	Condiciones especiales de suelo	2,0*	2,5

(*) Este valor debe tomarse como mínimo, y no substituye los estudios de detalle necesarios para construir sobre este tipo de suelos.

ANEXO 5

Tabla A5. 1. Tabulación de zonas sísmicas para áreas fuera de los EE.UU

LOCACIÓN	ZONA SÍSMICA	LOCACIÓN	ZONA SÍSMICA
ASIA		ÁREA DEL OCÉANO PACÍFICO	
Turquía		Islas Carolina	
Ankara	2B	Koror, Paulau	2B
Karamursel	3	Ponape	0
ÁREA DEL OCÉANO ATLÁNTICO		ISLA JOHNSTON	1
Azores	2B	KWAJALEIN	1
Bermuda	1	ISLA MARIANA	
CARIBE		Guarn	3
Islas Bahamas	1	Saipan	3
Zona Canal	2B	Tinain	3
Islas Leeward	3	ISLA MARCUS	1
Puerto Rico	3	OKINAWA	3
Isla Trinidad	2B	ISLAS FILIPINA	3
NORTE AMÉRICA		ISLAS SAMOA	3
Groenlandia	1	ISLA WAKE	0
Islandia			
Keflavik	3		

Tabla A5. 2. Factor de zona sísmica

FACTOR SÍSMICO (DE LA FIGURA E1.1 U OTRA FUENTE)	FACTOR DE ZONA SÍSMICA (ACELERACIÓN HORIZONTAL)
1	0.075
2A	0.15
2B	0.20
3	0.30
4	0.40

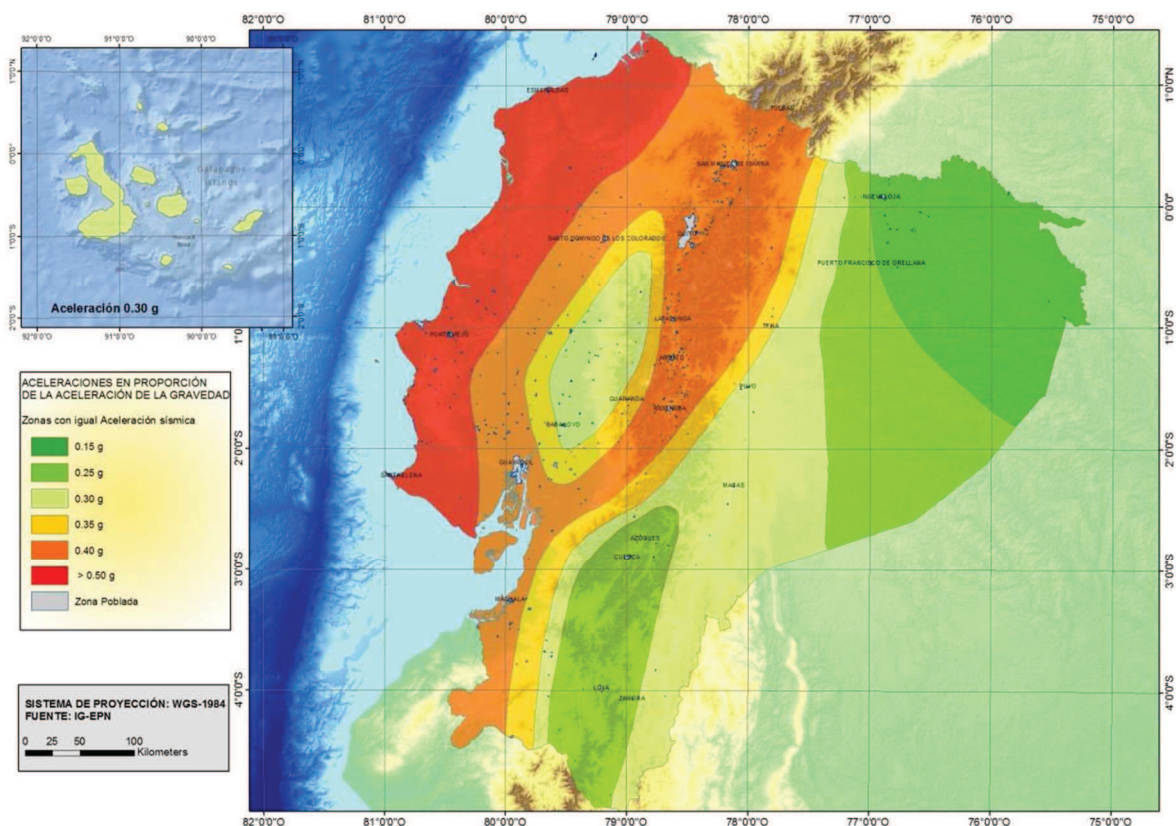


Figura A5. 1. Zonas sísmicas en el Ecuador

Fuente: NEC, 2013

Tabla A5. 3. Factor de zona sísmica

ZONA SISMICA	I	II	III	IV	V	VI
VALOR FACTOR Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.4	≥ 0.50
CARACTERIZACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Fuente: NEC, 2013

ANEXO 6

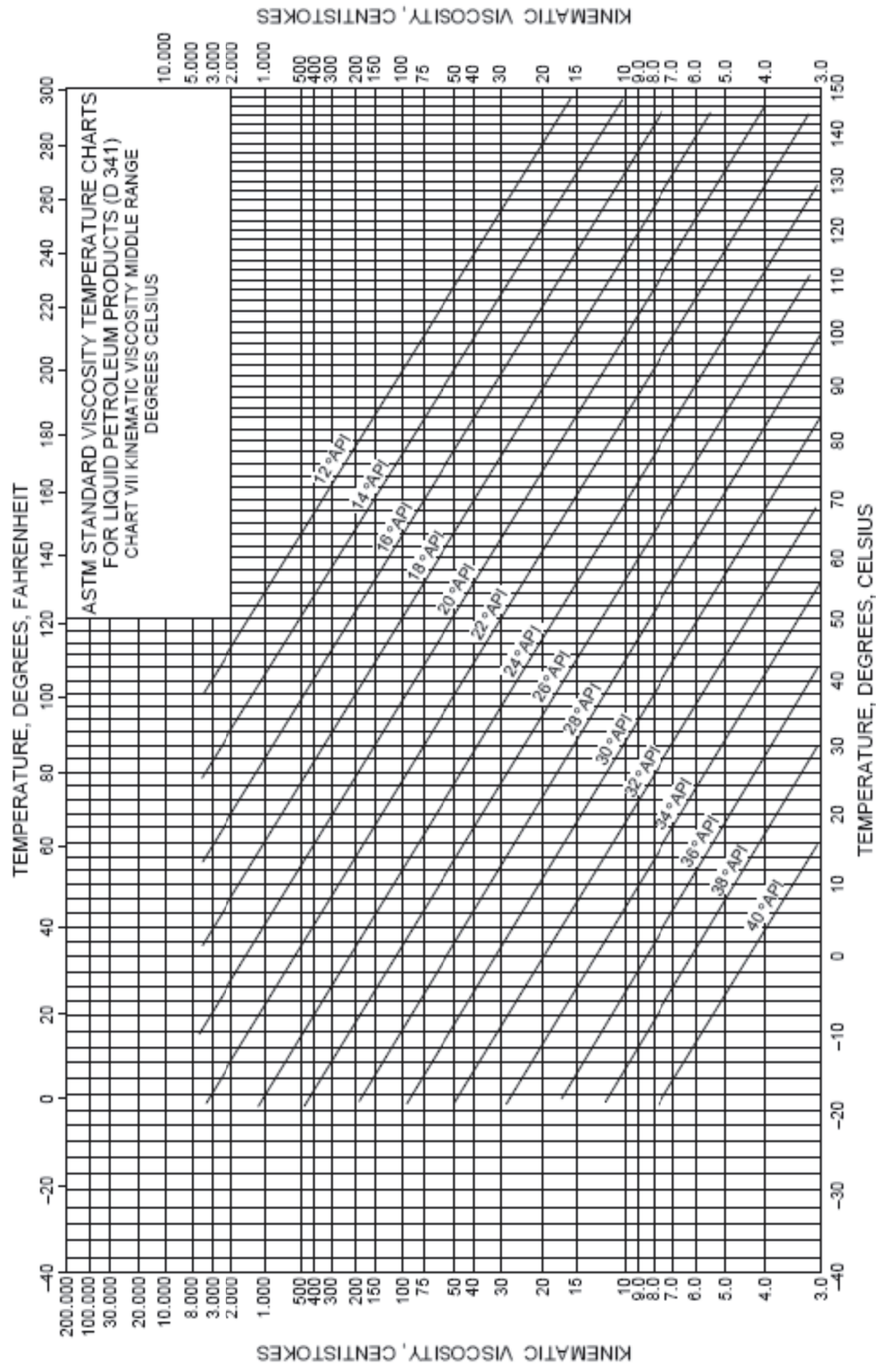


Figura A6. 1. Gráfica de Viscosidad vs. Temperatura para varios tipos de crudo.

ANEXO 8
RESUMEN DE DATOS CALCULADOS DEL EJEMPLO ILUSTRATIVO DEL
CAPITULO 4

Tabla A8. 1. Datos de diseño

ALTURA DEL TANQUE	[pies]	[m]
	16	4.87656202
DIÁMETRO DEL TANQUE	[pies]	[m]
	65	19.8110332
CAPACIDAD DEL TANQUE	[barriles]	[m3]
	8000	1271.90054
GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL PRODUCTO	0.89	
PRESIÓN INTERNA DE DISEÑO	[psi]	[kPa]
	0.12908175	0.88998766
PRESIÓN EXTERNA DE DISEÑO (DEPRESIÓN EN VACÍO)	[psi]	[kPa]
	0.046	0.31715896
TEMPERATURA INICIAL DEL CRUDO	[°F]	[°C]
	77	25
TEMPERATURA DE OPERACIÓN EN EL TANQUE	[°F]	[°C]
	158	70
VELOCIDAD DEL VIENTO	[mph]	[km/h]
	25	40.225
CAUDAL DE INGRESO	[bopd]	[m3/h]
	1509.6	10

Tabla A8. 2. Materiales

Láminas del fondo	ASTM A-36
Láminas del cuerpo	ASTM A-36
Láminas del techo	ASTM A-36
Ángulo junta cuerpo -techo	ASTM A-36

Tabla A8. 3. Cálculo de espesores por el método de un pie

Espesor del primer anillo t1	[pulg]	[mm]
	0.16630388	4.22411853
Espesor del segundo anillo t2	[pulg]	[mm]
	0.13862284	3.52102026
Espesor del tercer anillo t3	[pulg]	[mm]
	0.11094181	2.81792198
Espesor del cuarto anillo t4	[pulg]	[mm]
	0.08326078	2.11482371

Tabla A8. 4. Espesor para el fondo del tanque

Espeor lámina del fondo sin CA	0.19	[pulg]
Corrosión admisible	0.125	[pulg]
Espeor lámina del fondo con CA	0.3125	[pulg]

Tabla A8. 5. Ángulo para la unión techo - cuerpo

ANGULOS PARA LA JUNTA CUERPO TECHO	
MEDIDAS Y ESPESOR [PULG]	ÁREA [PULG2]
L3x3x1/2	2.75

Espesor para el techo del tanque:

Espeor de la plancha del techo 0.25 [pulg]

Tabla A8. 6. Peso del tanque

DESCRIPCIÓN	[lb]	[kg]
Peso de los ángulos	1919.51311	870.675791
Peso planchas fondo del tanque	50879.555	23078.5591
Peso techo del tanque	33899.3107	15376.4561
Peso estructura soportante	14979.64	6794.64487
Peso primer anillo	8344.44571	3784.97382
Peso segundo anillo	5585.27367	2533.43545
Peso tercer anillo	4166.36652	1889.83052
Peso cuarto anillo	4166.36652	1889.83052
Peso Total de Tanque	123940.471	56218.4062

Tabla A8. 7. Análisis sísmico

Factor de Escala	Q		1
Coefficiente de Aceleración de Sitio Base	Fa		1.34
Coefficiente de Velocidad de Sitio Base	Fv		1.375
Factor de Importancia	I		1.5
Factor de Modificación de Respuesta Impulsivo	Rwi		3.5
Factor de Modificación de Respuesta Compulsivo	Rwc		2
Periodo Convectivo	Tc		5.49515618
Transición de dependencias regionales	TL		4
Factor TS	TS		0.5130597
Aceleración Sísmica pico en la Tierra	Sp		0.23
Parámetro de Aceleración Máxima del Terreno	S0		0.23
Parámetro de Aceleración Espectral T = 0.2 seg	SDS		0.7705
Parámetro de Aceleración Espectral a 1 segundo	SD1		0.3953125
Coefficiente de Ajuste Aceleración Espectral	K		1.5
Aceleración espectral impulsiva	Ai		0.33021429
Aceleración espectral convectiva	Ac		0.02640906
Peso Total del Contenido del Tanque Basado en la Gravedad Específica	WP	[lb]	4016479.08
Peso Efectivo Impulsivo	Wi	[lb]	1139647.1
Peso Efectivo Compulsivo	Wc	[lb]	2694362.49
Peso total del techo del tanque	Wr	[lb]	50625.8238
Peso total tanque y accesorios	Ws	[lb]	39161.6055
Distancia para Fuerzas Impulsivas	Xi	[pies]	6
Distancia para Fuerzas Convectivas	XC	[pies]	8.50305426
Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del techo	Xr	[pies]	16.3783083
Altura desde el fondo del tanque hasta el centro de gravedad del cuerpo del tanque	Xs	[pies]	8

Momento de volteo base tanque

Mrw

[lb-pie]

2703788.25

Tabla A8. 8. Datos para el cálculo de la relación de anclaje

Fuerza resistente debido al contenido del tanque, por unidad de circunferencia del cuerpo cilíndrico, usada para resistir el momento al volteo	wa	[lb/pie]	853.03296
Peso del cuerpo del tanque y el techo soportado en el cuerpo	wt	[lb/pie]	365.345538
Elevación debida a la presión del producto	wint	[lb/pie]	61679.9363

$$J = \frac{M_{rv}}{D^2 [w_t * (1 - 0.4 * A_v) + w_a - 0.4 * w_{int}]}$$

Relación de anclaje

J

-0.02716729

El tanque está auto anclado

ESTRUCTURA SOPORTANTE DEL TECHO

DISEÑO DE CORREAS

Tipo de Correas		C9#13.4	
Número de correas seleccionado	N	[unidades]	34
Carga uniforme	Cu	[lb]	435.5
Momento máximo	Mmáx	[lb-pulg]	193128.934
Reacción R1	R1	[lb]	1362.89132
Reacción R2	R2	[lb]	2508.03264
Peso neto de las correas	Pn	[lb]	14807
Carga crítica	Pcc	[lb]	46338.305

COLUMNAS COMPUESTAS POR DOS CANALES

Canal Vertical		C3x4.1	
Canal Horizontal		C4x5.4	
Esfuerzo permisible	Cma	[lb/pulg2]	28105.9883
Esfuerzo de Compresión que Soporta la Columna	Fc	[lb/pulg2]	16603.6803
Carga máxima que soporta la columna	Pccm	[lb]	78544.7671
Peso columnas	Pcolumnas	[lb]	304

COLUMNAS DE SECCIÓN TUBULAR

Diametro nominal	d	[pulg]	4
Espesor de tubería	t	[pulg]	0.237
Esfuerzo permisible	Cma	[lb/pulg ²]	15369.4056
Esfuerzo de Compresión que Soporta la Columna	Fc	[lb/pulg ²]	14672.2224
Carga máxima que soporta la columna	Pccm	[lb]	48548.3759
Peso columnas	Pcolumnas	[lb]	172.64

DISEÑO DE LAS BASES DE COLUMNA CENTRAL

Tipo de perfil de la base		C7#9.8	
Carga máxima que soporta el perfil	Pbase	[lb]	17510.4

DISEÑO DE CARTELAS

Material de cartelas		ASTM A-36	
Espesor de Cartela	tcar	[pulg]	0.25
Tamaño de soldadura		[pulg]	1/8
Ancho de la cartela	Acar	[pulg]	5.906
Ubicación de agujero de cartela	ecar	[pulg]	4.7249
Carga que soporta la cartela	Pcar	[lb]	2508.03264
Longitud de la soldadura	dcar	[pulg]	10.3

DISEÑO DE DISCO CENTRAL

Material de disco central		ASTM A-36	
Radio exterior del disco	Rd	[pulg]	20.84023
Radio interior del disco	rd	[pulg]	4
Espesor del disco central	h	[pulg]	0.34479783

DISEÑO DEL PROCESO

ENTRADA DE CALOR REQUERIDO

Entrada de calor	q	[kW]	3924
------------------	---	------	------

DIÁMETRO DE LA GOTA DE AGUA

Diametro de gota de agua para corte de agua del 1%	dm1%	[μm]	662.670173
Corte de agua	Wc	[%]	1%
Diametro de gota de agua	dm	[μm]	144.976437

VELOCIDAD DE SEPARACIÓN (LEY DE STOKE)

Velocidad descendente de la gota de agua	V_t	[ft/seg]	0.00013718
--	-------	----------	------------

ECUACIÓN DE SEDIMENTACIÓN

$$wL_{eff} = 800 \left(\frac{Q_o \mu_o}{(\Delta SG) d_m^2} \right)$$

Longitud de separación disponible real	L	[ft]	133.93271
Ancho real del canal	W _{real}	[pulg]	195

ECUACIÓN DE TIEMPO DE RETENCIÓN

$$h w L_{eff} = 0.56 (t_r)_o Q_o$$

Altura efectiva del canal de flujo	h	[in]	19.4207867
------------------------------------	---	------	------------