



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“CÁLCULO, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN
Y MONTAJE DE TANQUES
ATMOSFÉRICOS”**

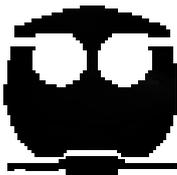
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

GUILLERMO GARZA PUIG





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi padre, esperando que el cielo le ampare.

... y he aquí la parte de la tesis que más trabajo me ha costado escribir. Por tres motivos: 1º- porque será la parte más leída; 2º- porque no tengo muy claro si debo nombrar en los agradecimientos de la tesis a personas que quizá han contribuido negativamente a su desarrollo (¡gracias por sacarme del laboratorio!); 3º- porque seguro que me olvidaré de alguien y lo lamentaré eternamente.

Dedico este trabajo a mi madre, Blanca grande, y hermana, Blanca chica, también a mi máma postiza; que es mi tía conchita, quienes con intuición y generosidad (¡no sólo económica!), me apoyaron siempre. No es posible no reconocer a quien, sin deberla, se involucró; Andrés.

A mis tíos; los que creían y los que no.

A mis primos; que no importaba si creían, sólo saber que estarían.

A Cecilia, por estar y soportar.

A mis amigos, fuente constante de motivación; y “crudas” de reflexión.

Gracias:

A mis profesores, porque ellos sembraron la semilla y fertilizaron mi inquietud de conocer.

A los ingenieros: Olivares y Mendoza, por incrementar mis dudas durante el desarrollo de mi tesis.

A mi asesor, por dejar volar mi imaginación.

A mis nuevos compañeros de trabajo, por la desesperación que nos ocasionamos.

ÍNDICE

	Página
Introducción	1
Objetivo	2
Alcance	2
CAPÍTULO 1. DEFINICIONES GENERALES	3
— 1.1 <i>Líquidos</i>	3
— 1.2 <i>Tanques Atmosféricos</i>	4
CAPÍTULO 2. CÁLCULOS PARA DIMENSIONAR TANQUES ATMOSFÉRICOS	6
— 2.1 <i>Introducción</i>	6
— 2.2 <i>Tanques Diseñados Sobre La Base De API 650</i>	6
— 2.3 <i>Tanques Diseñados Sobre La Base De API 620</i>	26
— 2.4 <i>Tanques De Aluminio Diseñados Sobre La Base De ANSI B96.1.</i>	34
— 2.5 <i>Tanques Diseñados Sobre La Base De AWWA D100.</i>	37
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LOS TANQUES ATMOSFERICOS.	39
— 3.1 <i>Diseño Del Fondo</i>	39
— 3.2 <i>Juntas Del Techo Y Del Ángulo Superior</i>	40
— 3.3 <i>Diseño Del Envolvente</i>	42
— 3.4 <i>Diseño Del Techo</i>	52
CAPÍTULO 4. PRINCIPALES MATERIALES COMERCIALES QUE SE USAN EN LA INDUSTRIA PARA FABRICAR TANQUES ATMOSFÉRICOS.	61
— 4.1 <i>GENERALIDADES</i>	61
CAPÍTULO 5. ESCALERAS DE ACCESO Y MEZZANINE.	64
— 5.1 <i>Requerimientos Para Escaleras</i>	64
— 5.2 <i>Requerimientos Para Plataformas Y Pasarelas</i>	65
CAPÍTULO 6. SOLDADURA: PROCEDIMIENTOS INDUSTRIALES PARA SOLDADURA EN LA FABRICACIÓN DE TANQUES ATMOSFÉRICOS.	66
— 6.1 <i>Introducción</i>	66
— 6.2 <i>Tipos De Soldadura</i>	66
— 6.3 <i>Tamaño De La Soldadura</i>	69
— 6.4 <i>Tipos De Procesos De Soldadura</i>	69
CAPÍTULO 7. ACABADOS PARA LOS TANQUES ATMOSFÉRICOS.	71
— 7.1 <i>Introducción</i>	71
— 7.2 <i>Clasificación De Ambientes</i>	71
— 7.3 <i>Guía De Selección Del Sistema De Protección</i>	72
— 7.4 <i>Selección Del Sistema</i>	73
— 7.5 <i>Requerimientos Ambientales</i>	80
— 7.6 <i>Aplicación De Los Recubrimientos</i>	81

CAPITULO 8. RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CIMENTACIÓN DE TANQUES ATMOSFÉRICOS.	84
— 8.1 Capacidad De Carga	84
— 8.2 Asentamientos Totales	84
— 8.3 Asentamientos Diferenciales	84
— 8.4 Cimentaciones Superficiales	85
— 8.5 Tipos De Cimentaciones Superficiales	93
— 8.6 Estabilización Del Subsuelo	97
— 8.7 Cimentaciones Profundas	98
— 8.8 Recomendaciones	104
CAPITULO 9. INSTRUMENTOS PARA MEDICION Y CONTROL DE NIVEL EN TANQUES ATMOSFERICOS.	105
— 9.1 DEFINICIÓN: Medición De Nivel	105
— 9.2 Razones De Medir Nivel	105
— 9.3 Principios De Medición	106
— 9.4 Medidor De Nivel Por Presión	111
CAPÍTULO 10. EJEMPLO ILUSTRATIVO DEL CÁLCULO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO.	115
— 10.1 Planteamiento	115
— 10.2 Cálculo Del Espesor De Las Placas Del Cuerpo (Envolvente) Del Tanque	116
— 10.3 Revisión Del Cuerpo Por Estabilidad Contra Buckling Por Viento	117
— 10.4 Cálculo Del Espesor Para La Placa Del Fondo Del Tanque	118
— 10.5 Cálculo Del Espesor De La Tapa Del Tanque	118
— 10.6 Revisión De La Junta Frágil Cuerpo-Tapa	119
— 10.7 Cálculo De Estructura De Soporte Del Techo	120
CAPITULO 11. RECOMENDACIONES PARA EL MANTENIMIENTO DE TANQUES ATMOSFÉRICOS.	121
— 11.1. Alcance	121
— 11.2 Evaluación Del Techo Del Tanque	122
— 11.3 Evaluación Del Envolvente Del Tanque	123
— 11.4 Evaluación Del Fondo Del Tanque	124
ANEXO A. ÍNDICE DE ABREVIATURAS	126
BIBLIOGRAFÍA.	129

INTRODUCCIÓN.

Para el ingeniero químico es tan amplia la gama de posibilidades de especialización en diseño de equipo que es difícil definir las (y definirse en) todas.

El presente trabajo de tesis tiene como finalidad acercar los criterios generales del diseño de tanques atmosféricos para almacenamiento de agua, mismos que se pueden extrapolar a otros líquidos almacenados en este tipo de recipientes, a los ingenieros, o estudiantes de ingeniería, que enfrenten la necesidad de contar con un recipiente para almacenamiento de líquidos. La aplicación del almacenamiento puede ser el trasvase, homogenización, almacenamiento de materia prima o bien, de producto terminado.

A lo largo de este trabajo se han intentado simplificar de una forma razonable y coherente, las consideraciones que deben ser tomadas en cuenta para un rápido desarrollo del diseño, de un tanque de almacenamiento atmosférico para agua.

Al final de este trabajo se muestra un cálculo ilustrativo para el diseño de un tanque de almacenamiento de agua con capacidad nominal de 30,000 bls.

OBJETIVO.

Crear una referencia rápida y práctica para el cálculo y diseño de tanques atmosféricos para almacenamiento de agua, que pueden ser cilíndricos verticales, de acero o aluminio, soldados, cerrados o abiertos en su parte superior.

ALCANCE.

Tanques atmosféricos de fondo plano, cuerpo cilíndrico, con techo fijo tipo cónico, domo o sombrilla, con las presiones de diseño permitidas por el API STD 650^(6,7), API STD 620⁽⁸⁾, ANSI B96.1⁽⁹⁾ y AWWA D 100-05⁽¹⁰⁾, para almacenamiento de agua.

CAPÍTULO 1. DEFINICIONES GENERALES

La cantidad de sustancias que se pueden almacenar es tan grande, que es necesario establecer algunos conceptos básicos para delimitar las aplicaciones para las que son adecuados los tanques de almacenamiento atmosférico. Como criterio básico, los tanques de almacenamiento sólo pueden contener sustancias líquidas, por ello, la norma 30 de la National Fire Protection Association (NFPA) establece una definición ampliamente utilizada para definir a los líquidos.

1.1 LÍQUIDOS.

Un material es líquido cuando posee una fluidez mayor de 300, correspondiente a la penetración de asfalto, de acuerdo al método de prueba descrito en la norma D5⁽¹³⁾ de la American Society for Tests and Materials (ASTM).

Penetración.- consistencia de un material bituminoso expresado como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra del material bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura.

La definición anterior permite diferenciar los fluidos que se pueden almacenar en tanques atmosféricos, ya que estos tanques, de acuerdo al código 650 del American Petroleum Institute (API), solamente deben utilizarse para contener fluidos líquidos. Por otro lado, la norma NFPA 30 establece la clasificación de los líquidos de acuerdo a su punto de inflamación.

Líquidos inflamables.- Cualquier líquido con punto de inflamación menor a 100°F (37.8°C) y una presión de vapor REID no mayor de 39.8 psia (274.4 kPa) a 100°F (37.8°C).

- ☛ Clase 1 A.- Punto de inflamación inferior a 73°F (22.8°C) y punto de ebullición inferior a 100°F (37.8°C).
- ☛ Clase 1 B.- Punto de inflamación inferior a 73°F (22.8°C) y punto de ebullición de 100°F (37.8°C) o mayor.
- ☛ Clase 1 C.- Punto de inflamación mayor o igual a 73°F (22.8°C) pero menor de 100°F (37.8°C).

Líquidos combustibles.- Cualquier líquido con punto de inflamación igual o mayor de 100°F (37.8°C).

- ☛ Clase II.- Líquidos con punto de inflamación de 100°F (37.8°C) o mayor, pero menor de 140°F (60°C).
- ☛ Clase II A.- Líquidos con punto de inflamación de 140°F (60°C) o mayor, pero menor de 200°F (93°C).
- ☛ Clase II B.- Líquidos con punto de inflamación de 200°F (93°C) o mayores.

Todos los hidrocarburos que se almacenan en tanques atmosféricos poseen las características anteriores.

1.2 TANQUES ATMOSFÉRICOS.

El tipo de tanque que debe utilizarse, depende básicamente de la presión de vapor del líquido a almacenar; para ello, existen dos grandes clases de tanques de almacenamiento: atmosféricos y presurizados, estos últimos se dividen a su vez en tanques de baja presión de operación cuyo intervalo va de 1 a 15 psig (6.89 a 103.42 kPa); y de alta presión de operación, mayor de 15 psig (103.42 kPa).

La máxima presión interna para tanques cerrados en su parte superior, puede incrementarse hasta 2.5 lbf / pulg², esto es posible al cubrir algunos requisitos adicionales según el apéndice F del código API 650.

El requisito más importante que señala éste apéndice, es que la presión interna multiplicada por el área de sección transversal del diámetro nominal del tanque, no debe exceder el peso nominal del material del techo, pared del envolvente, ni ninguna estructura que sea soportada en el techo o la pared del envolvente.

CAPÍTULO 2. CÁLCULOS PARA DIMENSIONAR TANQUES ATMOSFÉRICOS.

2.1 INTRODUCCION.

Los tanques de fondo plano para contener agua son construidos normalmente de acuerdo a alguna de las siguientes normas:

1. API 650 Welded steel tanks for oil storage. (Tanques de acero soldados para almacenar petróleo crudo y/o combustibles) ^(6, 7).
2. API 620 Recommended rules for design and construction of larges welded low-pressure storage tanks. (Reglas recomendadas para el diseño y construcción de tanques de almacenamiento grandes sometidos a baja presión) ⁽⁸⁾.
3. ANSI B96.1 American National Standard for welded alluminium-alloy storage tanks. (Norma Nacional Norteamericana para tanques de almacenamiento de aluminio soldados) ⁽⁹⁾.
4. AWWA D 100-05 ⁽¹⁰⁾ Standard for welded steel tanks for water storage. (Norma para tanques de acero soldados para almacenamiento de agua).

2.2 TANQUES DISEÑADOS SOBRE LA BASE DE API 650.

Este código establece los requisitos mínimos para el material, el diseño, la fabricación, el montaje, y pruebas para los tanques soldados de almacenaje de acero al carbón o acero inoxidable; verticales, cilíndricos, sobre tierra, de techo abierto o cerrado, de diversos tamaños y capacidades para presiones internas que aproximen la presión atmosférica (presiones internas que no exceden el peso de las placas del techo), pero se permite una presión interna más alta cuando se resuelven los requisitos adicionales. Esta norma se aplica solamente a los tanques donde el fondo entero se apoya uniformemente y a los tanques en servicio, no de refrigeración, que tienen una temperatura máxima de diseño de 93°C o menos.

Los requerimientos del API 650 son para tanques de fondo plano que contienen líquidos con pequeña o nula presión superficial. El criterio de diseño está basado en ecuaciones simplificadas con una cantidad mínima de análisis.

2.2.1 Diseño del Techo.

Los tanques de fondo plano con diámetro grande y techo fijo normalmente son diseñados con techos soportados en columnas. Cuando el diámetro se vuelve más pequeño, los techos auto-soportados se vuelven más económicos. Los techos de domo y cono son los más populares.

La siguiente ecuación para diseñar techos auto-soportados tipo domo se basa en el factor de seguridad (FS) cuatro:

$$P = \frac{0.0625E}{\left(\frac{R}{t}\right)^2} \quad (2.1)$$

donde:

P= Presión del techo sobre el cuerpo del tanque, en psi.

E= Módulo de elasticidad, en psi.

R= Línea que señala la distancia del radio del tanque, en pulg.

t= Espesor requerido en la placa del techo, en pulg.

El espesor requerido es obtenido asumiendo que la presión máxima consiste de una carga viva de 25 psf, con lo que se asume una carga hidrostática máxima y una carga muerta en el grueso máximo del techo de 0.5 pulg, como lo permite el API 650. De donde

P= 25 psf carga viva + 20.4 psi carga muerta

P= 0.315 psi

Tabla 2.1 Requerimientos de las diferentes normas para tanques de fondo plano.

	API 650			API 620			ANSI	AWWA
	Básico	Apéndice A	Apéndice F	Básico	Apéndice R	Apéndice Q	B96.1	D 100
P interna máxima	Atm	atm	2.5 psi	15 psi	15 psi	15 psi	atm	atm
Temperatura mínima	NE	-20°F	NE	-50°F	-60°F	-270°F	-20°F	-55°F
Temperatura máxima	200°F ^a	200°F	200°F ^a	200°F	-40°F	200°F	400°F	TA
Espesor máximo cubierta	1.75 pulg	0.50 pulg	1.75 pulg	NE	NE	NE	NE	2 pulg ^e
Espesor mínimo cubierta								
D < 50 ft	0.1875 pulg			0.1875 pulg			0.1875 pulg ^b	0.1875 pulg
50 ft < D < 120 ft	0.25 pulg			0.25 pulg			0.25 pulg ^c	0.25 pulg
120 ft < D < 200 ft	0.3125 pulg			0.3125 pulg			0.3125 pulg	0.3125 pulg
D > 200 ft	0.375 pulg			0.375 pulg				0.375 pulg
Espesor mínimo techo	0.1875 pulg			NE			0.1875 pulg	0.1875 pulg
Espesor mínimo de la placa de fondo	0.25 pulg. + CP			NE ^d			0.25 pulg	NE ^d
Ángulo superior mínimo								
D < 35 ft	2 pulg x 2 pulg x 1/16 pulg			NE		2 ½ pulg x 2 ½ pulg x ¼ pulg		NE
35 ft < D < 60 ft	2 pulg x 2 pulg x ¼ pulg			NE		2 ½ pulg x 2 ½ pulg x 5/16 pulg		NE
D > 60 ft	3 pulg x 3 pulg x 3/8 pulg			NE		3 pulg x 3 pulg x 4/8 pulg		NE

NE= no especificado, CP= corrosión permitida, TA= temperatura ambiente.

^a Esta temperatura se puede incrementar hasta los 500°F cuando se cumplen ciertas especificaciones del material y requerimientos de diseño adicionales.

^b Este espesor aplica para tanques de diámetro inferior a los 20 pies.

^c Este espesor aplica para tanques de diámetro entre los 20 y los 120 pies.

^d El espesor mínimo de cualquier placa es 0.1875 pulg. + CP.

^e Para espesores superiores a las 2 pulg, se deben cumplir algunos requerimientos especiales.

^f Para techos cónicos, el espesor de la placa puede ser calibre 7.

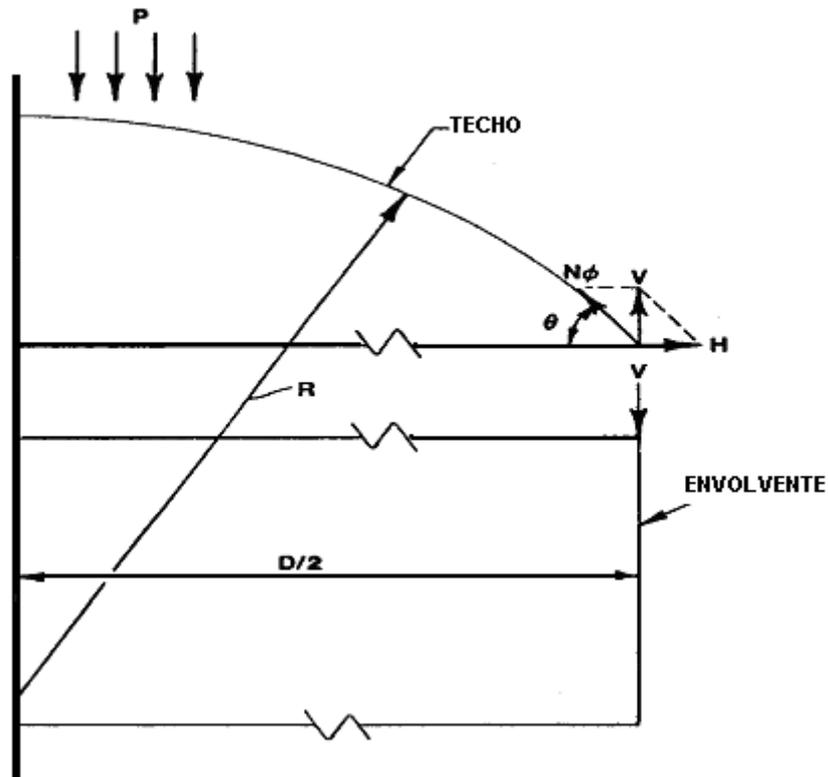


Figura 2.1

Sustituyendo $E= 29 \times 10^6$ psi, y expresado R en pies y t en pulgadas, la ecuación (2.1) queda:

$$t = \frac{R}{200} \quad (2.2)$$

donde:

t = Espesor de la placa del techo, en pulg.

R = Línea que señala la distancia del radio del tanque, en pulg.

lo cual nos da el espesor requerido en el techo.

El empalme del techo-envoltorio tiene un anillo que se endurece para prever las fuerzas de discontinuidad mostradas en la figura 2.1. La fuerza H se expresa como

$$\begin{aligned}
 H &= N_{\theta} \cos \theta \\
 H &= \frac{PR}{2} \cos \theta
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

donde:

N_{θ} = Fuerza de la argolla, en lb/pulg.

θ = Ángulo del techo respecto a la parte superior del tanque.

y el área requerida para soportar esta fuerza de tensión está dada por

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{H(D/2)}{\sigma} \\
 A &= \left(\frac{PR \cos \theta}{2} \right) \times \left(\frac{D}{2\sigma} \right) \\
 A &= \frac{DR}{4\sigma / (P \cos \theta)}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

donde:

P = Presión ejercida por la placa del techo, en psi

R = Línea que señala la distancia del radio del tanque, en pulg

H = Altura del tanque, en ft

D = Diámetro del tanque, en ft.

El API 650 asume el valor máximo para σ de la cabeza a los anillos del envolvente en 15,000 psi. El valor de P puede ser tomado como 0.315 psi. El valor máximo para el coseno de θ para R es 0.8D y es igual a 0.909. Expresando R y D en pies y A en pulg, el área requerida es

$$A = \frac{DR}{1455}$$

El código API 650 emplea la ecuación

$$A = \frac{DR}{1500} \tag{2.5}$$

para el área requerida en la junta del domo al envolvente.

El espesor requerido para los techos cónicos auto-soportados se basa en la siguiente ecuación

$$\frac{P_a}{E} = \frac{2.60 \left(\frac{t \operatorname{sen} \theta}{D} \right)^{2.5}}{FS \left(\frac{L}{2D} \right)}$$

$$\frac{P_a}{E} = \frac{10.4}{FS \tan \theta} \left(\frac{t \operatorname{sen} \theta}{D} \right)^{2.5}$$

sustituyendo $E = 29 \times 10^6$ psi y $P_a = 0.315$ psi en esta ecuación y expresando D en pies y t en pulgadas resulta en

$$t = \frac{D}{\operatorname{sen} \theta} \frac{(FS \tan \theta)^{0.4}}{326.54} \quad (2.6)$$

La figura 2.2 muestra el esquema de esta ecuación para diversos factores de seguridad. Una forma simplificada de esta ecuación empleada por API es

$$t = \frac{D}{400 \operatorname{sen} \theta} \quad (2.7)$$

donde t = espesor requerido del techo en pulgadas.

D = diámetro del tanque en pies.

θ = ángulo entre el cono y la base horizontal en grados.

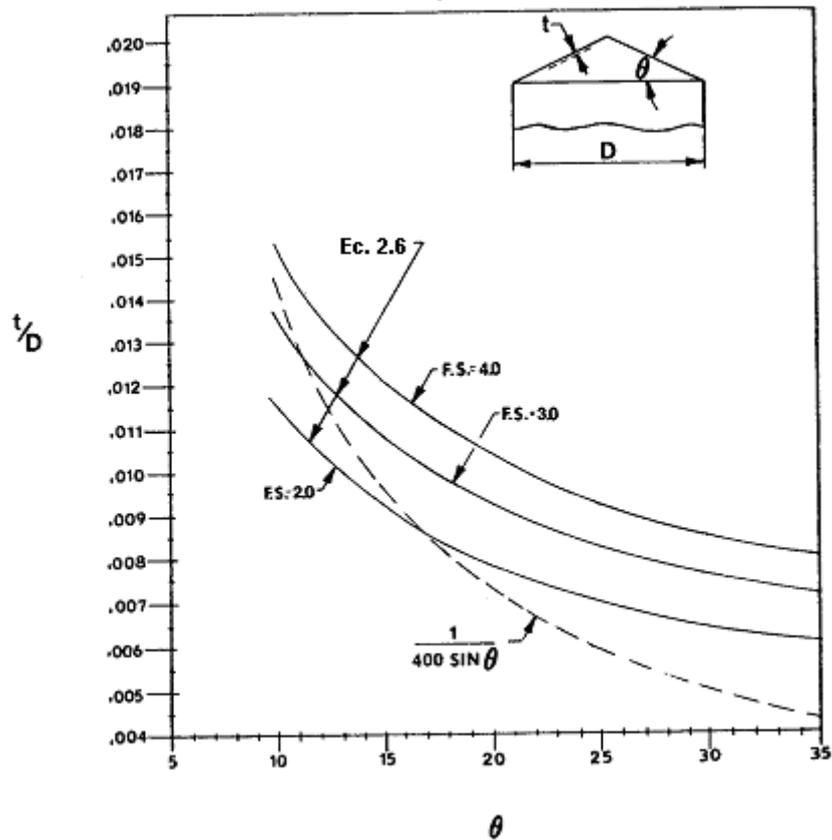


Figura 2.2

El área requerida de la junta del techo-envolvente del cono se obtiene de la ecuación 2.4. En este caso, H de la carga muerta está dada por

$$H = \frac{PD}{4 \sin \theta}$$

y

$$A = D^2 \frac{P}{8 \sigma \sin \theta} \quad (2.8)$$

Usando $\sigma = 15,000$ psi, $P = 0.315$ psi, y expresando D en pies y A en pulgadas cuadradas, el área requerida es

$$A = \frac{D^2}{2645 \sin \theta}$$

El API 650 emplea la expresión simplificada

$$A = \frac{D^2}{3000 \text{sen} \theta} \quad (2.9)$$

para el área requerida en la junta del cono-envolvente,

donde:

A = área requerida en pulgadas cuadradas

D = diámetro del tanque en pies

θ = ángulo entre la superficie del cono y la base horizontal en grados.

Para tanques con una presión interna pequeña, la presión máxima esta limitada para evitar levantamientos del tanque cuando se encuentra vacío. Por lo tanto, de la figura 2.3 la fuerza creciente debida a la presión es igual a la fuerza decreciente resultante del peso del envolvente más el techo:

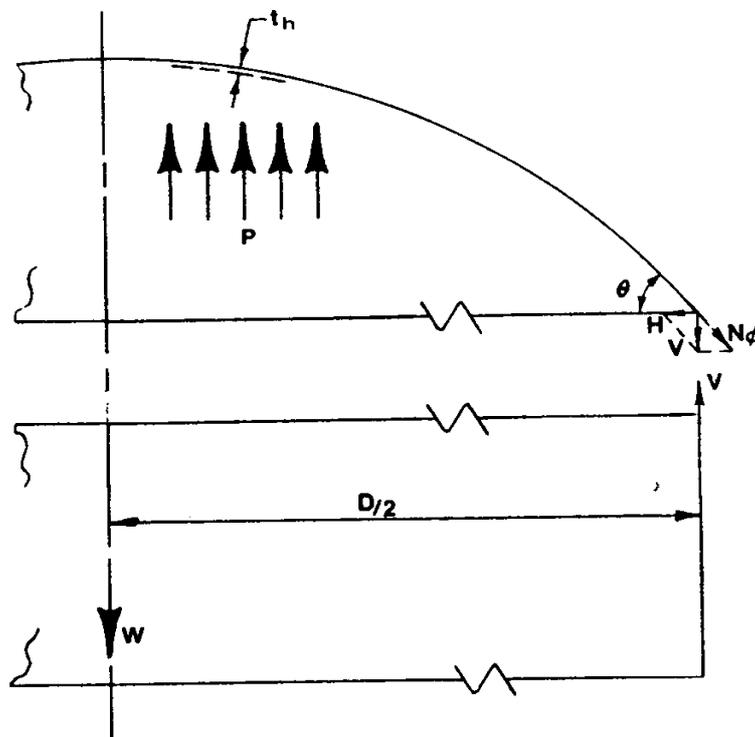


Figura 2.3

$$\frac{P \pi D^2}{4} = W + \frac{\pi D^2}{4} t_h \gamma$$

$$P = \frac{4}{\pi D^2} W + t_h \gamma$$

donde P = presión interna en pulgadas de agua

W = peso del envoltente en libras

D = diámetro del tanque en pies

t_h = espesor de la placa del techo en pulgadas

γ = 490 lb/pie³

La ecuación de la presión máxima es entonces

$$P_{\max} = \frac{0.245W}{D^2} + 8t_h \quad (2.10)$$

El nivel de esfuerzo en la en la junta del techo-envoltente debe de comprobarse.

Refiriéndose a la figura 2.3, la fuerza vertical V esta dada por

$$V = \frac{PD}{4} - t_h \gamma \frac{D}{4}$$

o

$$H = \frac{V}{\tan \theta}$$

$$H = \frac{1}{\tan \theta} \left[\frac{PD}{4} \right] - \frac{t_h \gamma D}{4}$$

el área requerida es

$$A = \frac{HD/2}{\sigma}$$

$$A = \frac{D^2}{8\sigma} \tan \theta (P - t_h \gamma)$$

o

$$P = \frac{8A\sigma \tan \theta}{D^2} + t_h \gamma$$

dejando $\sigma = 20,000$ psi y $\gamma = 490$ lb/pie³, esta ecuación se reduce a la ecuación aproximada

$$P_{\max} = \frac{30,800A \tan \theta}{D^2} + 8t_h \quad (2.11)$$

donde P = presión interna en pulgadas de agua

A = área requerida en la junta del techo-envolvente en pulgadas cuadradas

θ = ángulo como se define en la figura 2.3

D = diámetro del tanque en pies

t_h = espesor del techo en pulgadas.

La ecuación 2.11 puede ser reescrita para calcular la junta del área requerida como

$$A = \frac{D^2(P - 8t_h)}{30800 \tan \theta} \quad (2.12)$$

El API 650 considera que puede ocurrir una falla cuando el esfuerzo en la junta del área supera 32,000 psi. Esto es un incremento del 60% sobre el esfuerzo permitido de 20,000 psi empleado en la ecuación 2.11. Entonces la presión de falla puede ser expresada como

$$P_f = 1.6P - 4.8t_h \quad (2.13)$$

donde P_f = presión de falla en pulgadas de agua

P = presión de diseño en pulgadas de agua

t_h = espesor del techo en pulgadas.

El segundo término en la ecuación 2.13 es un factor de ajuste que correlaciona esta ecuación con datos experimentales.

Cuando la junta del techo-envolvente es diseñada para que la falla ocurra en ésta debido a la excesiva presión de superficie, en lugar de que ocurra en el techo o el envolvente, esta junta es llamada frágil. La ecuación de diseño de una junta frágil puede ser obtenida al sustituir la ecuación 2.10 en la 2.13, lo cual resulta en

$$\frac{0.245W}{D^2} + 8t_h = 1.6P - 4.8t_h$$

o

$$P = \frac{0.245W}{1.6D^2} + 8t_h$$

sustituyendo esta ecuación en la ecuación 2.12 resulta

$$A = \frac{0.153W}{30,800 \tan \theta} \quad (2.14)$$

donde A = área del techo-envolvente tangible requerida en pulgadas cuadradas

W = peso del envolvente

θ = ángulo del techo respecto al eje horizontal en grados

Note que la falla de la junta frágil es posible sólo cuando la soldadura es aplicada por un solo lado.

2.2.2 Diseño de la Pared Envolvente.

El API 650 incluye dos métodos para el diseño de la pared envolvente. El primero, llamado *el método de un pie*, consiste en el cálculo del espesor requerido de la pared del envolvente, en la dirección de A en la figura 2.4. Basado en la presión hidrostática a 1 pie a partir del punto X, que es la circunferencia aparente entre las distancias A y B. Este método considera que la placa del fondo sobre el segmento B es rígida hasta el punto X y el esfuerzo

máximo ocurre en un punto mayor de X. Este punto es arbitrariamente colocado a un pie.

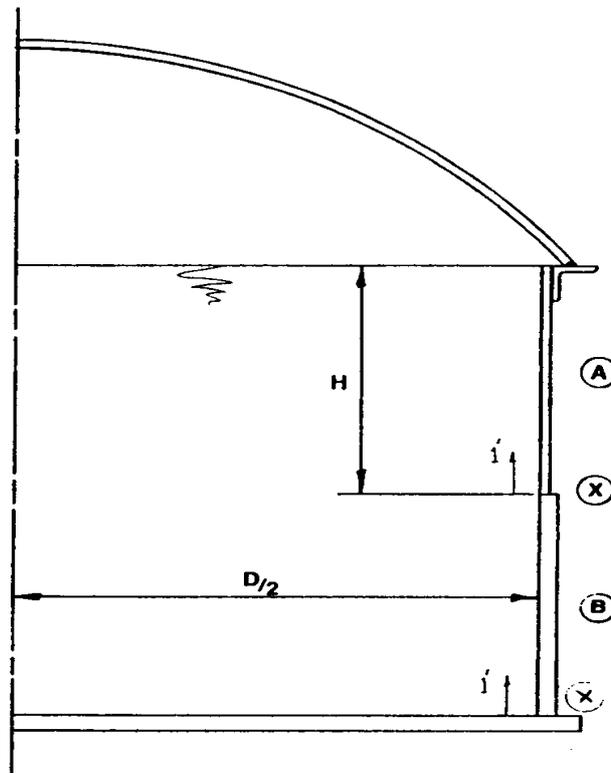


Figura 2.4

En el punto X el esfuerzo de la argolla está dado por

$$S = \frac{PD}{2t}$$

o

$$t = \frac{G\gamma(H-1)D}{2S}$$

definiendo $\gamma = 62.4$ psf y sumando la corrosión permitida esta expresión resulta en

$$t = \frac{2.6D(H-1)G}{S} + CP \quad (2.15)$$

donde CP = corrosión permitida en pulgadas

D = diámetro del tanque en pies

G = densidad relativa del líquido

H = altura del líquido en pies

S = esfuerzo permitido en psi

t = espesor requerido en pulgadas

El segundo método, *método del punto variable*, es una extensión del método de un pie en el cual se calcula de forma más exacta la localización del máximo esfuerzo cerca de la junta del techo o la pared envolvente con diferentes espesores.

En este caso se asume que la dirección del fondo tendrá una bisagra en la junta de la placa del fondo. De este modo la deflexión debida a la presión interna en la junta será igual a la deflexión debida a un fuerza aplicada en la "tijera" como se muestra en la figura 2.5.

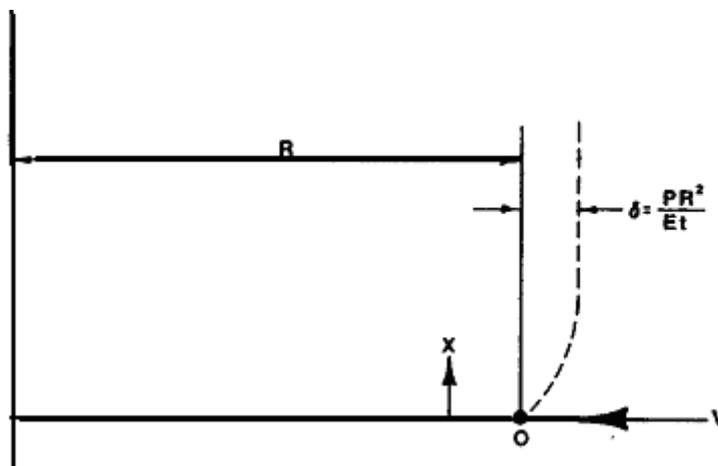


Figura 2.5

De este modo tenemos

$$\delta_u = \delta_p$$

$$\frac{V}{2\beta^3 D} = \frac{PR^2}{Et}$$

o

$$V = \frac{2\beta^3 DPR^2}{Et}$$

el esfuerzo de la argolla en cualquier punto a lo largo del cilindro cerca de la junta esta dado por

$$N_{\theta} = PR(1 - C_{\beta x})$$

donde $C_{\beta x}$ esta dado por la ecuación

$$C_{\beta x} = e^{-\beta x} \cos \beta x$$

Tomando la derivada de esta ecuación con respecto a x e igualando a cero resulta en el punto máximo para N_{θ} . Esto ocurre en

$$x = \frac{3\pi}{4\beta}$$

y

$$N_{\theta} = PR \left(1 - e^{-3\pi/4} \cos \frac{3\pi}{4} \right)$$

$$N_{\theta} = 1.06 PR$$

Así

$$t = \frac{N_{\theta}}{S}$$

$$t = \frac{1.06}{S} PR$$

o, empleando la terminología de la API 650

$$t = 1.06 \left(\frac{2.6HDG}{S} \right)$$

Pruebas realizadas muestran que esta ecuación es muy conservadora porque el esfuerzo máximo puede estar varios metros alejado de la junta donde la presión se reduce y la rigidez de la segunda dirección se vuelve significativa. Se puede modificar la ecuación para el diseño de la dirección del fondo para llegar a

$$t_1 = \left(1.06 - \frac{0.463D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S}} \right) \left(\frac{2.6HDG}{S} \right) + CP \quad (2.16)$$

el espesor de la segunda dirección es determinado por alguna de las siguientes ecuaciones:

$$t_2 = \begin{cases} t_1 & \text{si } \frac{h_1}{\sqrt{rt_1}} \leq 1.375 \\ t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2.1 - \frac{h_1}{1.25\sqrt{rt_1}} \right] & \text{si } 1.375 < \frac{h_1}{\sqrt{rt_1}} < 2.625 \\ t_{2a} & \text{si } \frac{h_1}{\sqrt{rt_1}} \geq 2.625 \end{cases} \quad (2.17)$$

donde t_1 = espesor de la primera dirección en pulgadas

t_2 = espesor de la segunda dirección en pulgadas

t_{2a} = espesor de la segunda dirección calculada a partir de la ecuación de dirección superior en pulgadas

h_1 = altura de la primera dirección en pulgadas

r = radio de la pared envolvente en pulgadas.

El diseño de la dirección superior se basa en la ecuación

$$t = \frac{2.6D(H - x/12)G}{S} + CP \quad (2.18)$$

donde x es un punto de diseño variable que esta en función del espesor de la capa, el radio del tanque y la altura del líquido.

X tiene ciertas funciones, entre las más importantes destacan:

- Delimita el número de placas a emplear para cubrir la altura del tanque
- $x = \frac{3\pi}{4\beta}$ muestra, al disminuir la altura del tanque, la variación en el espesor requerido en cada placa.

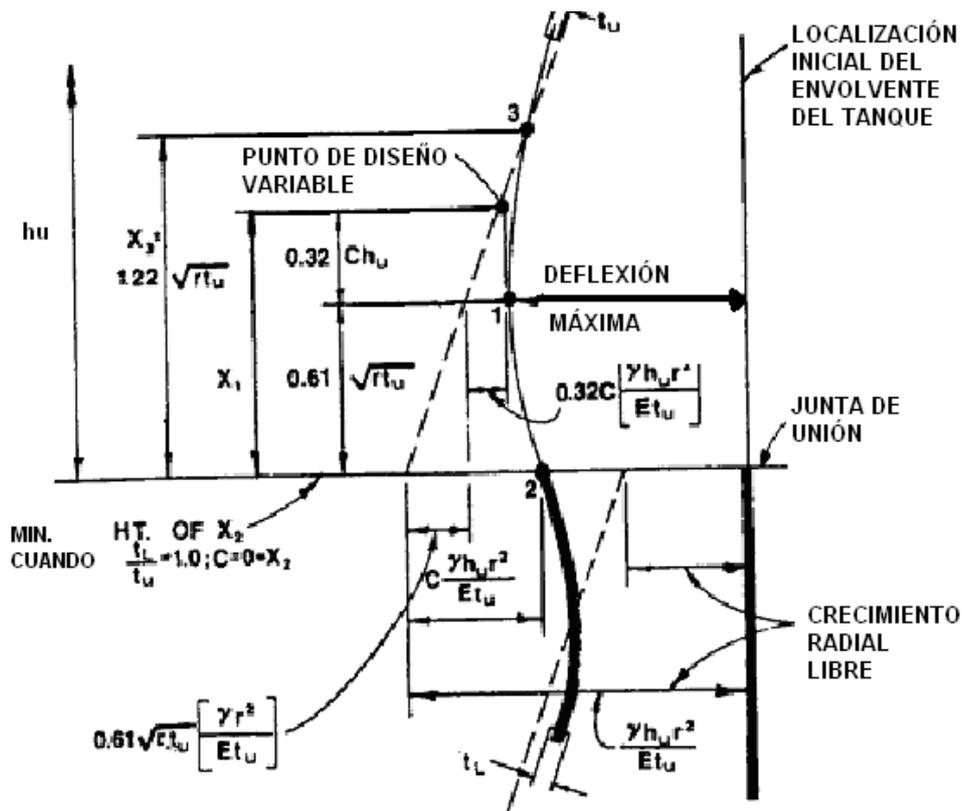


Figura 2.6

En referencia a la figura 2.6, x es el valor mínimo de x_1 , x_2 y x_3 obtenido a partir de alguna de las siguientes ecuaciones:

$$x_1 = 0.61 \sqrt{r t_u} + 0.32 C h_u$$

$$x_2 = C h_u$$

$$x_3 = 1.22 \sqrt{r t_u}$$

donde $C = \frac{\sqrt{K}(K-1)}{1+K\sqrt{K}}$

$$K = \frac{t_L}{t_u}$$

h_u = altura superior del envolvente en pulgadas

t_L = espesor del envolvente debajo en pulgadas

t_u = espesor del envolvente encima en pulgadas

Después de establecer el espesor del envolvente debido a la presión hidrostática, la estabilidad bajo la carga de viento debe ser revisada. La presión ejercida por el viento es normalmente expresada como

$$P = 0.00256V^2$$

donde P = presión del viento en psf

V = velocidad del viento en mph

El API usa 100 mph de velocidad del viento para propósitos de diseño a menos que un valor mayor sea especificado, por lo tanto

$$P = 25.6 \text{ psf}$$

Dado que la distribución de la presión puede causar un vacío en alguna parte del envolvente, el envolvente es diseñado para soportar una presión de vacío de 25.6 psf. Una ecuación simplificada para el “engrapado” del envolvente cilíndrico está dado como

$$P_{cr} = \frac{2.42E}{(1-\mu^2)^{3/4}} \left(\frac{\left(\frac{t}{D}\right)^{2.5}}{\frac{H}{D - 0.45\sqrt{t/D}}} \right)$$

o para cilindros grandes con $E = 30 \times 10^6$ psi y $\mu = 0.3$,

$$H = \frac{77.92 \times 10^6}{(FS)(P)} t \left(\frac{t}{D} \right)^{1.5}$$

sustituyendo $P = 25.6$ psf y $FS = 1.5$, esta ecuación se convierte en

$$H = 6(100t) \sqrt{\left(\frac{100t}{D} \right)^3} \quad (2.19)$$

donde H = distancia entre los endurecedores en pies

t = espesor de la pared envolvente en pulgadas

D = diámetro del tanque en pies

Los módulos de sección requeridos para la rigidez de los anillos necesarios para resistir la presión lateral se obtiene de la ecuación clásica para el "engrapado" de anillos:

$$F_{cr} = \frac{3EI}{R^3}$$

o

$$F = \frac{3EI}{(FS)R^3}$$

donde

$$F = PH$$

por lo tanto

$$I = \frac{PHR^3(FS)}{3E}$$

o

$$Z = \frac{PHD^2(FS)}{24E} \frac{C}{D} \quad (2.20)$$

El API 650 asume que el radio de la pierna sobresaliente del anillo endurecedor del diámetro del tanque no es menor que 0.015. por lo tanto, $C / D = 0.0075$. Usando $FS = 2.0$, $P = 25.6$ psf, $E = 30 \times 10^6$ psi y expresando D y H en pies, la ecuación de los módulos requeridos para la rigidez del anillo es

$$Z = 0.0001HD^2 \quad (2.21)$$

donde Z = módulos de sección requeridos para la rigidez del anillo en pulgadas cúbicas

H = altura entre los endurecedores en pies

D = diámetro del tanque en pies

2.2.3 Placas Anulares.

El espesor requerido para la placa del fondo del tanque en el API 650 está dado en la tabla 2.1 (pág. 8) En la junta de la placa de la pared envolvente-fondo, el código API 650 requiere una placa anular de extremo soldada cuyo espesor varia entre 0.25 y 0.75 pulg., y es una función del esfuerzo y espesor de la primera dirección del envolvente. El ancho de la placa anular debe ser la adecuada para soportar la columna de agua por encima en caso de arreglos en la cimentación.

En referencia a la figura 2.7,

$$M = \frac{wL^2}{2}$$

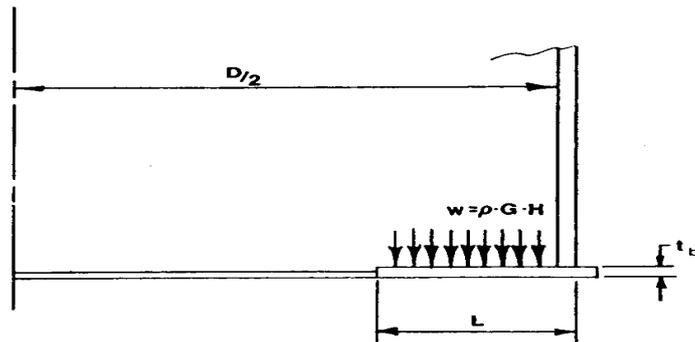
usando análisis plástico,

$$\sigma_y = \frac{4M}{t_b^2}$$

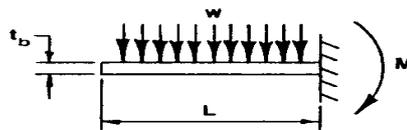
0

$$L = \sqrt{\frac{\sigma_y t_b^2}{2w}}$$

$$L = \sqrt{\frac{\sigma_y t_b^2}{2\rho GH}}$$



(a)



(b)

Figura 2.7

dejando $\rho = 62.4$ psf, $\sigma_y = 33,000$ psi, y expresando H en pies y t_b en pulgadas, la ecuación queda

$$L = \frac{195t_b}{\sqrt{GH}} \quad (\text{pero no menor que 24 pulg.}) \quad (2.22)$$

donde L = longitud de la placa anular en pulgadas

t_b = espesor de la placa anular en pulgadas

H = altura del líquido en pies

G = densidad relativa del líquido.

M = momento de torsión

2.3 TANQUES DISEÑADOS SOBRE LA BASE DE API 620.

Los tanques diseñados bajo el código API 620 tienden a ser más complicados geoméricamente y están generalmente sujetos a una presión mayor que los tanques diseñados con el API 650. en general, los requerimientos del API 620 difieren significativamente de los del API 650 debido a que el espesor de los componentes es obtenido a través del análisis del esfuerzo que considera el estado de esfuerzo biaxial, más que una serie de ecuaciones simplificadas.

El código API 620 se utiliza para diseñar y construir tanques de acero al carbón, de gran capacidad, soldados en campo, para servicio de baja presión, de instalación superficial, de un solo eje de revolución vertical, para operar en condiciones donde la temperatura del acero sea menor a 250°F (121 °C) y la temperatura atmosférica mínima sea -50°F (-46°C).

El procedimiento de análisis del esfuerzo en API 620 se basa en las ecuaciones:

$$\frac{N_{\theta}}{r_2} + \frac{N_{\phi}}{r_1} = P_r \quad (2.23A)$$

$$N_{\phi} = \frac{1}{r_2} \int r_1 r_2 (P_r \cos \phi - P_{\phi} \sin \phi) d\phi + c \quad (2.23B)$$

La ecuación 2.23B para N_{ϕ} puede ser determinada para cualquier configuración empleando la suma de fuerzas obtenidas de un diagrama de cuerpo libre. La ventaja del diagrama de cuerpo libre es que las fuerzas con excepción de la presión pueden ser consideradas sin hacer un proceso de integración. Una vez determinada N_{ϕ} , el valor de N_{θ} se obtiene de la ecuación 2.23A como

$$\frac{N_{\theta}}{R_2} + \frac{N_{\phi}}{R_1} = P \quad (2.23C)$$

donde N_{ϕ} es la suma de fuerzas en una sección transversal dada.

2.3.1 Criterios de Esfuerzo Permisible.

El esfuerzo permisible se refiere la máxima fuerza que puede soportar un material o un arreglo de placas antes de sufrir daño estructural.

El requerimiento del espesor de la API 620 para los componentes en tensión es determinado por el mayor de los valores obtenidos en estas dos expresiones:

$$t = \frac{N_{\phi}}{SE} \quad (2.24)$$

$$t = \frac{N_{\theta}}{SE}$$

donde t = espesor requerido del componente en pulgadas

N_{θ} = fuerza de la argolla en lb/pulg

N_{ϕ} = fuerza meridional en lb/pulg

S = esfuerzo extensible permisible en psi

E = eficiencia de la junta

El criterio de API 620 para los componentes en compresión son los siguientes.

-Esfuerzo Compresivo en la Dirección Axial sin Esfuerzo en la Dirección Circunferencial.

Este esfuerzo es el que resulta de la compresión entre las placas del techo y fondo a través de la placa del envolvente.

Las reglas para este caso se basan en el ensamble axial del envolvente cilíndrico como es dado en

$$\sigma_1 = \frac{T_{cr}}{t} 0.06E \left(\frac{t}{r} \right)$$

Con $E = 30,000,000$ psi y un factor de seguridad 10, esta ecuación se convierte en

$$\sigma = 1.8 \times 10^6 \left(\frac{t}{T} \right) \quad (2.25)$$

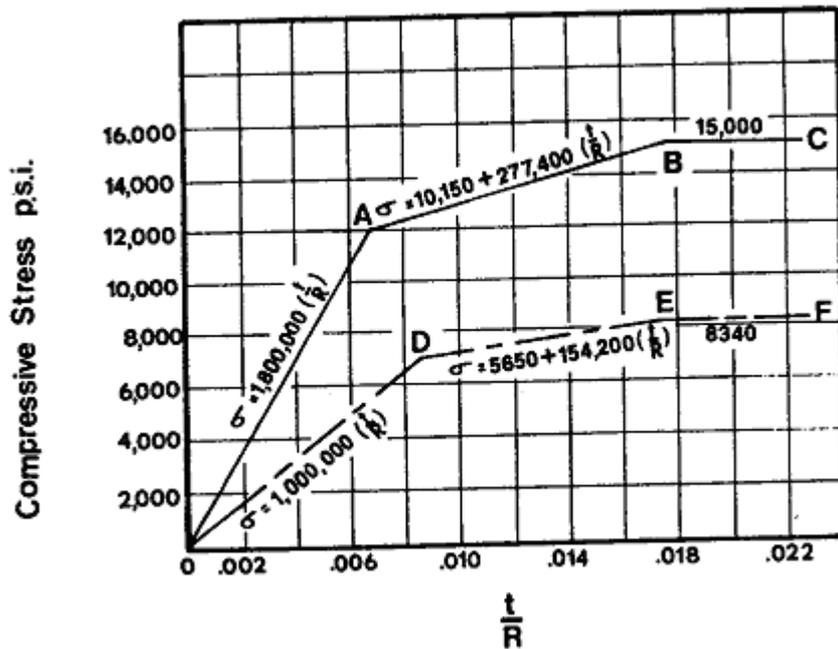


Figura 2.8

Para prevenir el esfuerzo en esta ecuación por exceder el esfuerzo sensible permisible del material se establece el valor arbitrario de 15,000 psi como límite superior del esfuerzo compresible permisible. Esto se muestra en la figura 2.8 como la línea OABC, donde AB es la línea de transición entre la ecuación 2.25 y el límite superior de 15,000 psi.

-Esfuerzo Compresivo con Igual Magnitud en las Direcciones Meridional y Circunferencial.

Este esfuerzo es el que resulta de la compresión entre las placas del techo y las placas de la pared del envolvente.

La ecuación gobernante se obtiene de la ecuación

$$N = -Q \cot \alpha \phi$$

$$N_{\theta} = \frac{-d\theta}{d\phi}$$

$$M_{\phi} = \frac{-D}{r} \left(\frac{d\theta}{d\phi} \right)$$

$$M_{\theta} = \mu M_{\phi}$$

$$\theta = \text{pendiente}$$

$$\theta = \frac{1}{Et} \left(\frac{d^2 Q}{d\phi^2} \right)$$

$$W = \text{deflexión radial}$$

$$W = \frac{r}{Et} (N_{\theta} - \mu N_{\phi})$$

para el ensamble de un envolvente esférico con un factor de seguridad 4. empleando $E = 30,000,000$ psi, la ecuación resulta en

$$\sigma = 937,500 \left(\frac{t}{T} \right)$$

que es aproximada en API 620 como

$$\sigma = 1,000,000 \left(\frac{t}{T} \right) \quad (2.26)$$

Este valor es 1.8 veces menor que el dado en la ecuación 2.25. con esto, el limite de la ecuación 2.26 se establece como $15,000 / 1.8 = 8340$ psi. También, ODEF en la figura 2.8 es el criterio usado para componentes que tienen un esfuerzo compresivo de igual magnitud en las direcciones meridional y circunferencial.

-Esfuerzo Compresivo con Magnitudes Diferentes en las Direcciones Meridional y Circunferencial.

Este esfuerzo es el que resulta de la compresión entre las placas del techo y las placas de la pared del envoltente, debido a la diferencia de peso de dichas placas.

El criterio para este caso se basa en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{(\text{estres mayor}) + 0.8(\text{estres menor})}{\text{estres determinado por OABC en}} \leq 1.0 \quad (2.27a)$$

la fig. 2.8 usando R para la fuerza mayor

$$\frac{1.8(\text{estres menor})}{\text{estres determinado por OABC en}} \leq 1.0 \quad (2.27b)$$

la fig. 2.8 usando R para la fuerza menor

-Esfuerzo Compresivo en una Dirección y el Esfuerzo de Tensión en Otra Dirección.

El criterio se basa en la suposición en la capacidad del componente para resistir una fuerza de compresión en una dirección dada hasta reducirse en una fuerza de tensión que se incrementa en otra dirección. La relación de gobierno se deriva como sigue. Sea

$$M = \frac{\text{estres de compresion actual}}{\text{estres de compresion permisible}} \\ \text{proveniente de OABC en la fig. 2.8}$$

y

$$N = \frac{\text{estres de tension actual}}{\text{estres de tension permisible}}$$

Entonces

$$M^2 + MN + N^2 = 1.0 \quad (2.28)$$

La interacción de esta ecuación con la ecuación 2.25 se muestra en la figura 2.9.

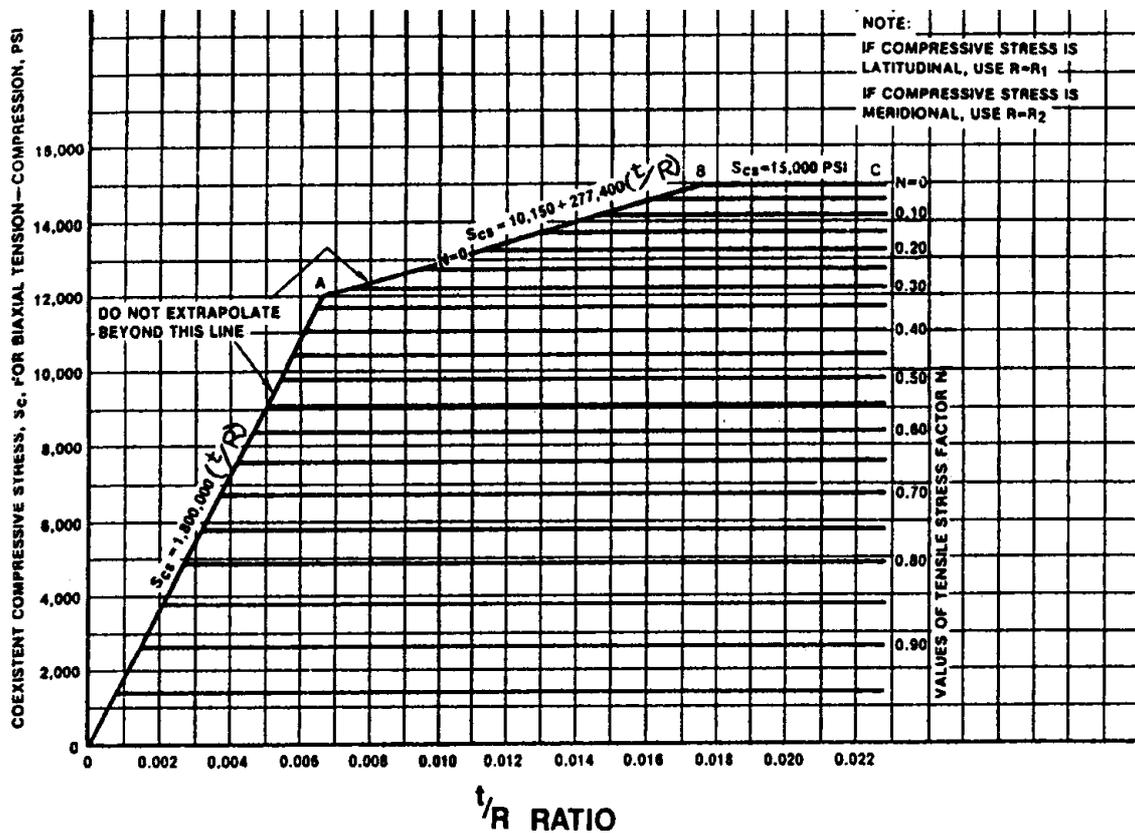


Figura 2.9 Diagrama de esfuerzo biaxial para tensión y compresión combinadas en acero en un nivel de intervalo de esfuerzo de 30,000 a 38,000 psi.

2.3.2 Anillos de Compresión.

Como se muestra en la figura 2.3, existen fuerzas horizontales desbalanceadas las juntas del techo-envolvente y el cono-envolvente. Estas fuerzas deben ser soportadas por un anillo de compresión “en un punto de la región”. La región puede estar en compresión o en tensión, dependiendo de la dirección de discontinuidad así como de las fuerzas del aro. La API 620 supone que porciones del techo, envolvente y cono mostradas en la figura 2.13 son parte de la región del anillo de compresión. La fuerza total dada en la siguiente ecuación supone que está soportada en la región del anillo:

$$Q = N_{\phi r} W_h + N_{\theta s} W_c + HR \quad (2.28)$$

donde Q = fuerza total en la región del anillo en libras

$N_{\phi r}$ = fuerza meridional en el techo o cono (lb/pulg)

$N_{\theta s}$ = fuerza circunferencial en el envolvente (lb/pulg)

W_h = longitud efectiva del techo o cono como se determina de la fig. 2.13
en pulgadas

W_c = longitud efectiva del envolvente como se determina de la fig. 2.13
en pulgadas

H = fuerza horizontal desbalanceada en la junta (lb/pulg)

R = radio del tanque en la junta en pulgadas.

El área total requerida en la junta es determinada por

$$A = \begin{cases} \frac{Q}{15,000} & \text{cuando } Q \text{ es compresiva} \\ \frac{Q}{SE} & \text{cuando } Q \text{ es tensible} \end{cases} \quad (2.30)$$

donde A = área requerida en pulgadas cuadradas

S = esfuerzo de tensión permisible en psi

E = eficiencia de la junta

En la figura 2.10 se muestran algunos arreglos para anillos.

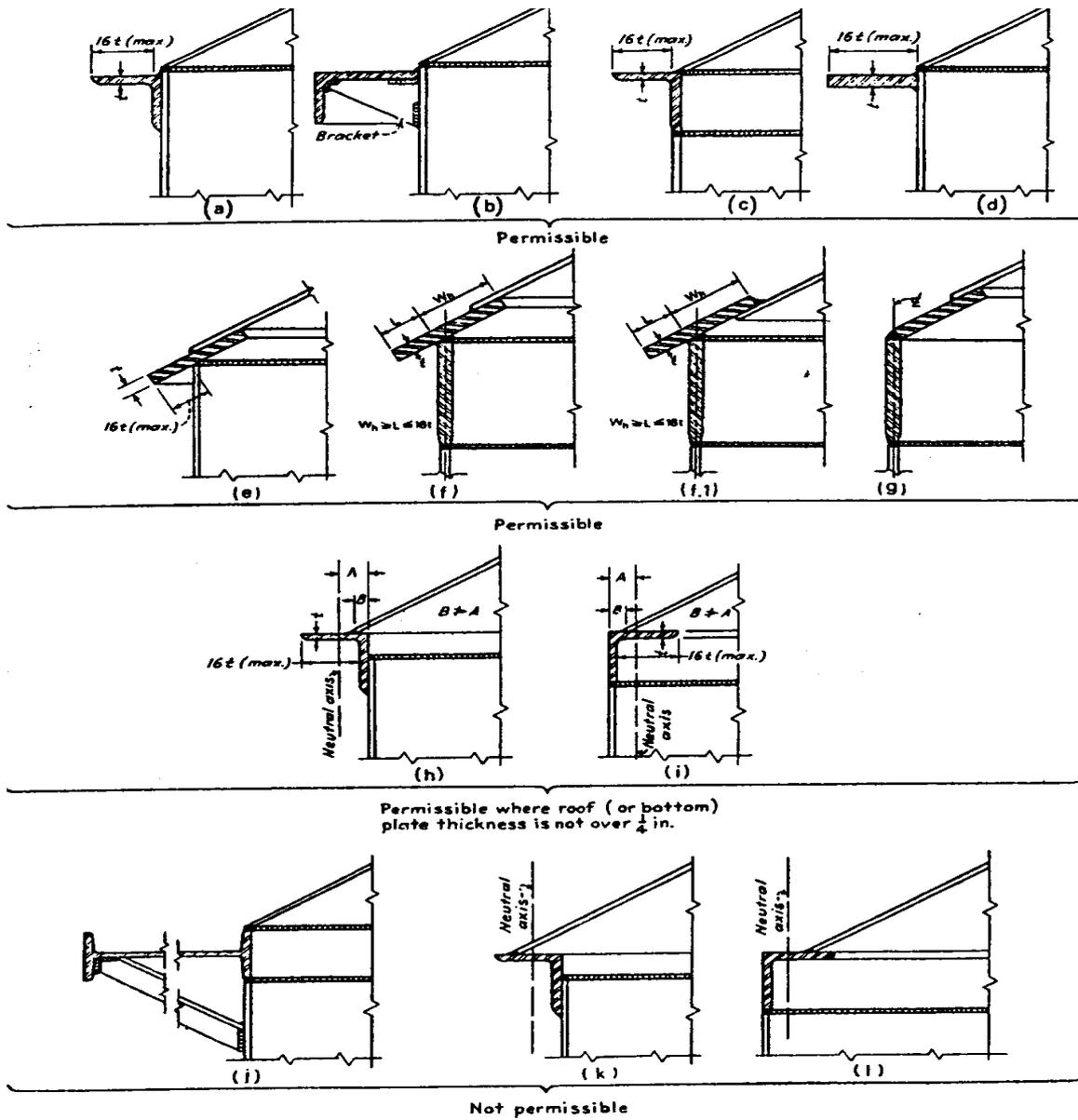


Figura 2.10 Detalles de construcción, permitidos y no permitidos, de la junta-anillo de compresión.

2.4 TANQUES DE ALUMINIO DISEÑADOS SOBRE LA BASE DE ANSI B96.1.

Las reglas para los tanques de la ANSI B96.1 siguen el mismo criterio general que los del API 650. Las diferencias de los requerimientos de presión, temperatura y espesores mínimos de las placas entre los tanques de aluminio y los de acero están dadas en la tabla 2.1 (pág. 8).

2.4.1 Reglas de Diseño.

El diseño de techos de domo se obtiene de la siguiente ecuación, y se basa en un factor de seguridad 4, de este modo

$$P = \frac{0.0625E}{\left(\frac{R}{t}\right)^2}$$

Usando $E = 8,000,000$ psi a 400°F , esta ecuación se reduce a

$$t = \frac{R}{707} \sqrt{p} \quad (2.31)$$

Donde t = espesor del domo del techo en pulgadas

R = radio del techo en pies

p = carga, muerta o viva en psf

el área requerida de la junta del techo-envolvente se obtiene a partir de la ecuación 2.4

$$A = \frac{DRP \cos \theta}{4\sigma} \quad (2.32)$$

Un valor conservador para el $\cos \theta$ es tomado como 1.0. Por lo tanto,

$$A = \frac{DRP}{4\sigma} \quad (2.33)$$

Donde A = el área requerida de la junta del techo-envolvente (pulg²)

P = cargas, viva o muerta en psf

R = radio esférico del domo del techo en pies

D = diámetro del envolvente en pies

σ = esfuerzo de tensión permisible del techo, envolvente o área de la junta, cualquiera que se escoja en psi

El espesor requerido del techo cónico autosoportado se obtiene de la siguiente expresión, que es similar a la ecuación 2.6

$$t = DP^{0.4} \frac{(FS \tan \theta)^{0.4}}{897 \sin \theta} \quad (2.34)$$

La ANSI B96.1 usa una aproximación de esta ecuación, que para el diseño de techos cónicos esta dada por

$$t = \frac{D\sqrt{P}}{1414 \sin \theta} \quad (2.35)$$

donde t = espesor requerido del techo cónico en pulgadas

D = diámetro del tanque en pies

P = suma de las cargas viva y muerta en psf

θ = ángulo entre la superficie del cono y la base horizontal en grados

El área requerida de la junta del cono del techo-envolvente se obtiene de la ecuación 2.8 como

$$A = \frac{PD^2}{8\sigma \sin \theta} \quad (2.36)$$

donde A = área requerida (pulg²)

P = cargas viva y muerta en psf

D = diámetro del tanque en pies

S = esfuerzo de tensión permisible en psi

θ = ángulo entre la superficie del cono y la base horizontal en grados

El diseño de envolventes de aluminio está basado en la ecuación 2.15, que se basa a su vez en método de “un pie” dado por

$$t = \frac{2.6D(H-1)G}{fe} + CP \quad (2.37)$$

donde t = espesor del envolvente en pulgadas

D = diámetro del tanque en pies

H = altura del liquido en pies

G = densidad relativa del liquido

f = esfuerzo de tensión permisible del aluminio en psi

e = eficiencia de la junta

La ANSI B96.1 no contiene reglas para anillos intermedios de rigidez. Para tanques abiertos arriba, los anillos de rigidez son necesarios, los que se basan en la ecuación 2.20. En este caso, H esta definida como altura rebasada del tanque, y la ecuación 2.20 se convierte en

$$Z = \frac{PHD^2}{48E} \left(\frac{FS}{\sqrt{t/2D}} \right) \quad (2.38)$$

en un cuerpo elástico,

$$f = E\varepsilon \quad (2.39)$$

Y para un endurecedor en la curva, la relación entre la torsión y la curvatura es

$$\varepsilon = \frac{t}{2R} \quad (2.40)$$

Por lo tanto, de las ecuaciones 2.39 y 2.40

$$\frac{t}{2D} = \frac{t}{2E}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 2.38 y usando un factor de seguridad 2.0, la expresión para los módulos de sección requerida Z, resulta

$$Z = 0.084 \frac{PHD^2}{f} \quad (2.41)$$

Donde Z = módulos de sección requeridos (pulg³)

P = presión del viento en el tanque en psf

H = altura del tanque en pies

D = diámetro del tanque en pies

f = esfuerzo permisible por los anillos de dureza en psi

2.5 TANQUES DISEÑADOS SOBRE LA BASE DE AWWA D100-05.

Muchos tanques de almacenamiento están contruidos de acuerdo a la Norma para tanques de acero soldados para almacenar agua de la AWWA. El esfuerzo de tensión máximo permisible en las placas como lo permite la norma es 15,000 psi a menos que se emplee el Apéndice C. Este apéndice permite valores mayores de esfuerzo cuando los requerimientos adicionales, como la selección limitada de material o los criterios de dureza son resueltos.

El esfuerzo de compresión permisible para varios miembros es calculado de la ecuación

$$S = XY \quad (2.42)$$

donde X = 15,000 psi o $\frac{18,000 \text{ psi}}{1 + \frac{L^2}{18,000r^2}}$, cualquiera que sea menor

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{para } t/R \geq \\ \frac{2}{3} \frac{100t}{R} \left[2 - \frac{2}{3} (100t) \right] & \text{para } t/R < 0.015 \end{cases}$$

donde

S = esfuerzo permisible en psi

t = espesor en pulgadas

R = radio en pulgadas

L = longitud efectiva en pulgadas

r = radio de gravitación en pulgadas

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LOS TANQUES ATMOSFERICOS.**3.1 DISEÑO DEL FONDO.****a) Dimensiones de la placa de fondo.**

Las placas del fondo deben tener un espesor nominal mínimo de 8 mm (5/16 pulg), o resistir una fuerza de 0,610 kPa (12,75 lb/pie²), sin incluir la tolerancia por corrosión. Las placas deben tener forma rectangular y un ancho mínimo de 1829 mm (6 pies). Las placas de las orillas del fondo sobre las que descansa la pared envolvente del tanque que lleven un extremo rectangular, deben tener un ancho mínimo de 1829 mm (6 pies) en dicho extremo. Para el traslape de placas en la orilla del fondo el método de preparación debe ser como se indica en la Figura 3.1.

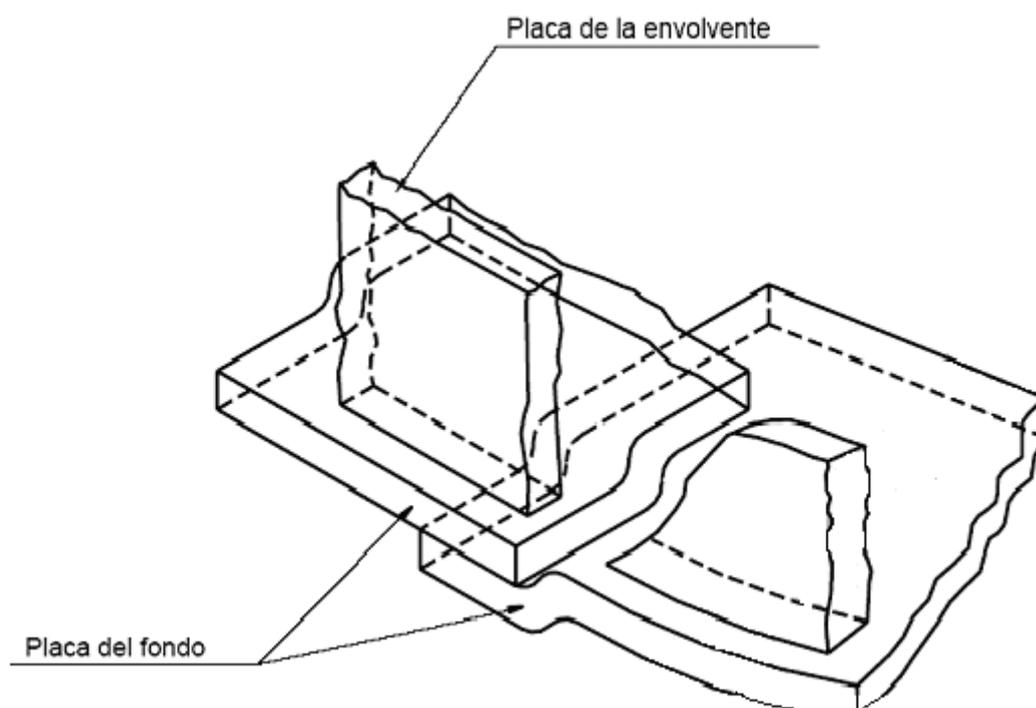


Fig. 3.1 método de preparación de las placas traslapadas del fondo, debajo de la pared envolvente del tanque.

b) Fijación de la pared envolvente con el fondo.

La fijación del borde inferior del primer anillo de la pared envolvente con las placas del fondo debe hacerse con soldadura de filete continuo sobre ambos lados de la placa de la pared envolvente. El tamaño de cada soldadura de filete no debe ser mayor de 13 mm (1/2 pulg) ni menor que el espesor de la placa más delgada en la junta, de acuerdo con los valores mínimo que se indica en Tabla No. 3.1:

Espesor Nominal de la Placa de la Pared Envolvente		Tamaño Mínimo de Filete de la Soldadura	
Mm	(pulg)	mm	(pulg)
T = 5	(3/16)	5	(3/16)
5 < t ≤ 19	(3/16 < t ≤ 3/4)	6	(1/4)
19 < t ≤ 32	(3/4 < t ≤ 1 1/4)	8	(5/16)
32 < t ≤ 45	(1 1/4 < t ≤ 1 3/4)	10	(3/8)

Tabla 3.1**3.2 JUNTAS DEL TECHO Y DEL ÁNGULO SUPERIOR.**

El tipo de sujeción del techo, así como la del ángulo de soporte va a depender de lo siguiente:

- Las placas del techo, como mínimo, deben soldarse con un filete de soldadura completo y continuo sobre todas las juntas en la parte superior. También deben permitirse las soldaduras a tope.
- Las placas del techo se deben soldar al ángulo superior del tanque con soldadura de filete continuo, solamente sobre el lado superior.
- Las secciones del ángulo superior para techos autoportados se deben unir por soldadura a tope teniendo una fusión y penetración completa.
- Una opción que tiene el diseñador (o el fabricante) para tanques con techos autoportados tipo cono, domo, o sombrilla, es que en la orilla del ángulo de coronamiento pueden soldar una solera la cual descansara en la parte plana del ángulo, para mejorar las condiciones soldadas.

e) Excepto para tanques abiertos y con techo cónico autosoportado así como tanques con la unión techo-pared envolvente bridada, como tanques con una extensión en la parte superior formando un ángulo con la proyección hacia afuera. La pared envolvente del tanque debe ser suministrada con un ángulo superior (anillo de coronamiento) no menor que los siguientes tamaños: para los tanques con un diámetro menor o igual a 11 m (35 pies), ángulo de 51 X 51 X 5 mm (2 X 2 X 3/16 pulg); para tanques con un diámetro mayor que 11 m (35 pies) pero menor o igual a 18 m (60 pies) ángulo de 51 X 51 X 6 mm (2 X 2 X 1/4 pulg) y para tanques con un diámetro mayor que 18 m (60 pies) ángulo de 76 X 76 X 10 mm (3 X 3 X 3/8 pulg).

f) Para tanques con un diámetro menor o igual a 9 m (30 pies) y un techo cónico soportado, la orilla superior de la pared envolvente puede estar bridada (tener una extensión doblada a 90°) en lugar de instalar un ángulo superior, ver detalle C de la Figura 3.2. Este tipo de construcción se puede usar en tanques con techo autosoportados, si el área total de la sección transversal del cruce satisface el área expuesta requerida para la construcción del ángulo superior.

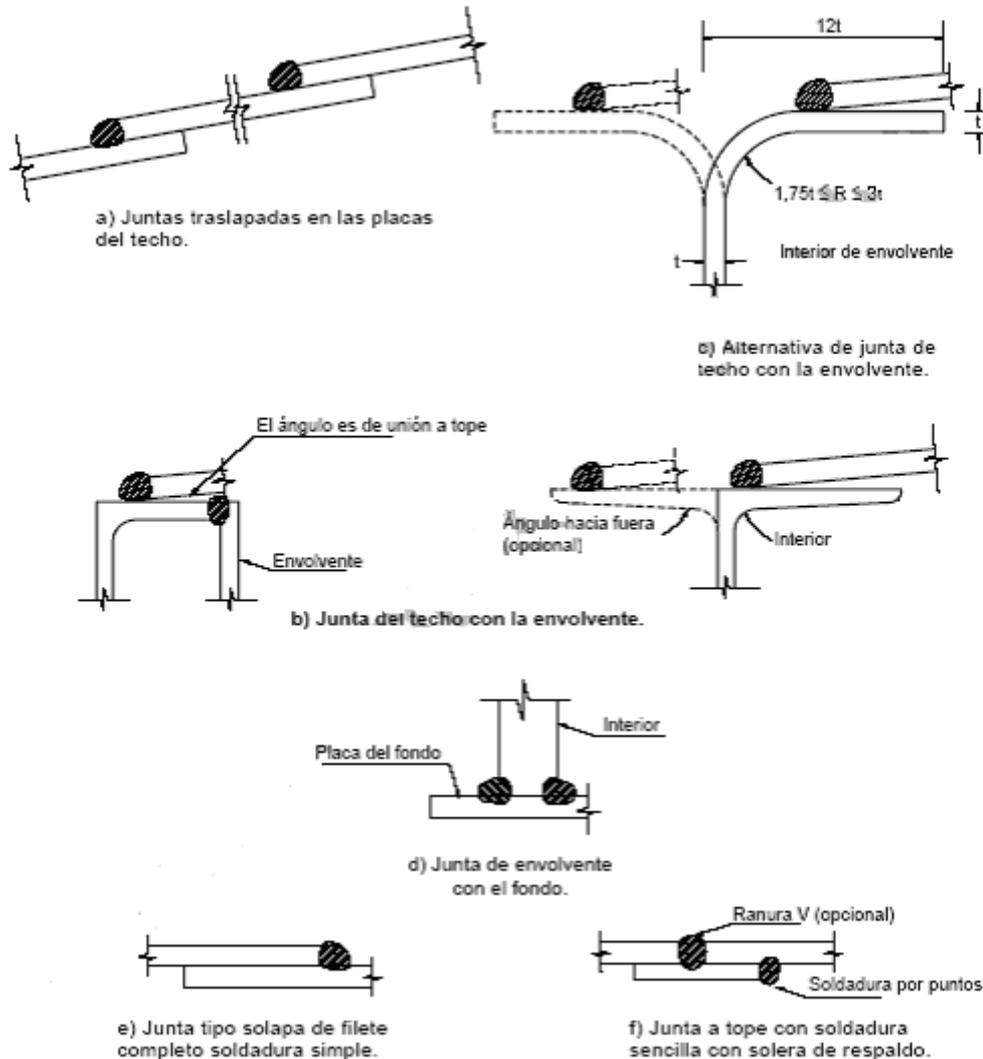


Fig. 3.2 Tipos de juntas en el fondo y en el techo (Unión placas del fondo).

3.3 DISEÑO DE LA PARED ENVOLVENTE.

a) Esfuerzos de trabajo.

El valor del esfuerzo máximo a la tensión (esfuerzo máximo de trabajo permisible), del material seleccionado para el diseño del tanque antes de aplicar el factor de eficiencia de la junta soldable debe estar de acuerdo con los valores indicados en la Tabla No. 3.2.

Los esfuerzos para el diseño estructural deben estar de acuerdo con los esfuerzos permisibles de trabajo dados en el inciso 3.4 listado c.

Especificación de La placa	Grado	Mínimo esfuerzo De cedencia lb/pulg ² MPa	Mínimo esfuerzo De tensión lb/pulg ² MPa	Esfuerzo de diseño del producto S _d lb/pulg ² MPa	Esfuerzo de prueba Hidrostática S _t lb/pulg ² Mpa
Especificación ASTM					
A 283 (A 183M)	C (C)	30000 (205)	55000 (380)	20000 (137)	22500 (154)
A 285 (A 285M)	C (C)	30000 (205)	55000 (380)	20000 (137)	22500 (154)
A 131 (A-131M)	A, B, CS (A, B, CS)	34000 (235)	58000 (400)	22700 (157)	24900 (171)
A 36 (A 36M)	-----	36000 (250)	58000 (400)	23200 (160)	24900 (171)
A 131 (A 131M)	EH 36 (EH 36)	51000 (360)	71000 (490)	28400 (196)	30400 (210)
A 573 (A 573M)	58 (400)	32000 (220)	58000 (400)	21300 (147)	24000 (165)
A 573 (A 573M)	65 (450)	35000 (240)	65000 (450)	23300 (160)	26300 (180)
A 573 (A 573M)	70 (485)	42000 (290)	70000 (485)	28000 (193)	30000 (208)
A 516 (A 516M)	55 (380)	30000 (205)	55000 (380)	20000 (137)	22500 (154)
A 516 (A 516M)	60 (415)	32000 (220)	60000 (415)	21300 (147)	24000 (165)
A 516 (A 516M)	65 (450)	35000 (240)	65000 (450)	23300 (160)	26300 (180)
A 516 (A 516M)	70 (485)	38000 (260)	70000 (485)	25300 (173)	28500 (195)
A 662 (A 662M)	B (B)	40000 (275)	65000 (450)	26000 (180)	27900 (193)
A 662 (A 662M)	C (C)	43000 (295)	70000 (485)	28000 (194)	30000 (208)
A 537 (A 537M)	1 (1)	50000 (345)	70000 (485)	28000 (194)	30000 (208)
A 537 (A 537M)	2 (2)	60000 (415)	80000 (550)	32000 (220)	34300 (236)
A 633 (A 633M)	C, D (C, D)	50000 (345)	70000 (485)	28000 (194)	30000 (208)
A 678 (A 678M)	A (A)	50000 (345)	70000 (485)	28000 (194)	30000 (208)
A 678 (A 678M)	B (B)	60000 (415)	80000 (550)	32000 (220)	34300 (236)
A 737 (A 737M)	B (B)	50000 (345)	70000 (485)	28000 (194)	30000 (208)
A 841 (A 841M)	Clase 1 (Clase 1)	50000 (345)	70000 (485)	28000 (194)	30000 (208)
A 841 (A 841M)	Clase 2 (Clase 2)	60000 (415)	80000 (550)	32000 (220)	34300 (236)
Especificaciones CSA (de CANADA)					
G40.21	260W (38W)	38000 (260)	60000 (410)	24000 (164)	25700 (176)
G40.21	300W (44W)	44000 (300)	65000 (450)	26000 (180)	27900 (193)
G40.21	350WT (50WT)	50000 (345)	70000 (485)	28000 (194)	30000 (208)
G40.21	350W (50W)	50000 (345)	65000 (450)	26000 (180)	27900 (193)
Estándares Nacionales (de USA)					
	235	34000 (235)	52600 (365)	20000 (137)	22500 (154)
	250	36000 (250)	58300(400)	22700 (157)	25000 (171)
	275	40000 (275)	62600(430)	24000 (167)	26800 (184)
ISO 630					
E 275	C, D	38400 (265)	59500 (410)	23800 (164)	25500 (175)
E 355	C, D	50000 (345)	71000 (490)	28400 (196)	30400 (210)

Tabla 3.2. Materiales de placas admisibles ASTM o equivalentes y esfuerzos permitidos.

b) Cargas.

Las cargas se calculan suponiendo que el tanque está completamente lleno de agua a una temperatura de 16°C (60°F) con un peso específico de 1 kg/dm³ (62,4 lb/pies³) o del líquido que se almacene, si éste es más pesado que el agua. La tensión en cada anillo se debe calcular 305 mm (12 pulg) arriba de la junta horizontal inferior del anillo en cuestión. En el cálculo de estos esfuerzos,

el diámetro del tanque se toma como el diámetro nominal del anillo del fondo (1er. anillo).

Las cargas radiales aisladas sobre el envolvente del tanque tales como las causadas por cargas pesadas sobre las plataformas y pasarelas elevadas entre tanques, deben ser distribuidas por secciones estructurales roladas, costillas de placa o miembros ensamblados preferentemente en posición horizontal.

Una vez diseñado el tanque este se debe revisar por condiciones de estabilidad esto es revisar si los espesores determinados soportan las condiciones de viento y sismo del lugar donde se va instalar, para la revisión por sismo se debe utilizar el procedimiento del apéndice E del API 650 o equivalente.

c) Cálculo de espesores de la pared envolvente.

Los cálculos del espesor del envolvente se muestran en la ecuación 2.37, solamente se debe sustituir f_e por S_d , que es el esfuerzo permisible para las condiciones de diseño.

La tabla 3.3 muestra los espesores mínimos.

Diámetro nominal del Tanque en S.I. (m)	Espesor nominal del Tanque en S.I. (mm)	Diámetro nominal del Tanque en U.S. (pies)	Espesor nominal del Tanque en U.S. (pulg)
< 15	5	< 50	3 / 16
15 hasta < 36	6	50 hasta < 120	1 / 4
36 hasta 60	8	120 hasta 200	5 / 16
> 60	10	> 200	3 / 8

Tabla 3.3. Espesor mínimo de las placas de la pared envolvente.

El espesor requerido en la pared envolvente de los tanques, debe ser el mayor espesor de diseño calculado, incluyendo la tolerancia por corrosión permisible, o el espesor de la pared envolvente calculado para resistir la prueba hidrostática, pero no debe ser menor que lo indicado en la Tabla 3.3.

Las placas de la pared envolvente deben tener un ancho nominal mínimo de 1829 mm (72 pulg). Estas placas deben ser soldadas a tope y deben escuadrarse correctamente.

Los espesores de la pared envolvente calculados deben verificarse por estabilidad para evitar la flexión a partir de la velocidad de viento. Si en la revisión por estabilidad se requieren vigas intermedias o incrementar el espesor de la pared envolvente, ambas condiciones deben ser usadas.

d) Arreglo de los elementos de la pared envolvente.

Se diseña de manera que los anillos queden perfectamente verticales. A menos que se especifique otra cosa, las placas de la pared envolvente en las juntas horizontales a tope, tienen un eje vertical común.

Las juntas verticales de los anillos adyacentes no deben ser colineales; dichas juntas deben estar separadas por una distancia mínima de $5t$ siendo t el espesor de la placa más gruesa en la junta.

El bisel en V o en U, asimétrico en las juntas a tope, puede quedar hacia el interior o exterior de la pared envolvente.

Para tanques que tienen la unión techo-pared envolvente bridada, la pared envolvente debe reforzarse con un ángulo fijado al borde superior (anillo de coronamiento) de la misma y no deben ser menores que los tamaños indicados en el inciso 3.2 listado e).

El ángulo del párrafo anterior, se fija al borde superior del tanque con soldadura doble continua y puede colocarse por fuera o por dentro de la pared envolvente.

e) Juntas verticales.

Deben ser juntas a tope, de penetración y fusión completa para conseguir doble soldadura o por otros métodos con los cuales se obtenga la misma calidad de depósito de soldadura en el interior y exterior de las superficies por soldar.

f) Juntas horizontales.

Deben ser de penetración y fusión completas. Como alternativa, los ángulos superiores pueden unirse a traslape con el envolvente con doble soldadura.

g) Aberturas en la pared envolvente.

Los siguientes requisitos deben ser con el objeto de restringir el uso de accesorios que van unidos a la pared envolvente por medio de soldadura.

La forma y dimensiones de las placas de refuerzo en la pared envolvente, se ilustran en las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5. La cara de la brida debe ser adecuada para el empaque y el atornillado empleado, los empaques deben ser seleccionados de acuerdo al servicio y al medio ambiente donde esté localizado el tanque. Las aberturas en la pared envolvente de tanques que requieren para alojar una boquilla bridada o roscada mayor de DN 50 (NPS 2) deben ser reforzadas. Todas las conexiones (boquillas registro de hombre o de limpieza) que requieran refuerzo deben ser unidas con soldadura de penetración completa a la pared envolvente ver figura 3.5. El área mínima de la sección transversal del refuerzo requerido, no debe ser menor que el producto del diámetro vertical del agujero cortado en la pared envolvente del tanque por el espesor de la placa de la pared envolvente. El área de la sección transversal

del refuerzo debe ser medida verticalmente, coincidiendo con el diámetro de la abertura.

Excepto para las aberturas y conexiones a ras del fondo, todos los refuerzos deben estar dentro de una distancia hacia arriba y hacia abajo del eje de la abertura igual a la distancia vertical de la abertura en la placa de la pared envolvente del tanque. El refuerzo puede hacerse por cualquiera de los siguientes métodos o por una combinación de estos:

g.1.1) El aditamento de la brida para el ajuste

g.1.2) Placa de refuerzo.

g.1.3) Parte del cuello puede ser considerada como área del refuerzo, siempre y cuando se cumpla lo siguiente: que el material del cuello de la boquilla sea igual que el de la pared envolvente, o que el material especificado para el cuello de la boquilla sus esfuerzos de cedencia y tensión no sean menor que el 70% y 80% respectivamente de los esfuerzos del material del tanque.

g.1.4) Sobre-espesor en las placas de la abertura de la pared envolvente: Se considera como placa de refuerzo siempre y cuando el sobre-espesor usado como espesor actual menos el espesor calculado requerido en la aplicación de la abertura; se hayan considerado todas las condiciones de carga más la tolerancia por corrosión permisible.

Para cuello de accesorio, se pueden considerar como área de refuerzo de la pared envolvente lo siguiente, a excepción cuando lo impida g.1.3:

g.2.1) Parte del cuello de la boquilla que se extiende hacia el exterior de la pared envolvente en una distancia igual a cuatro veces el espesor del cuello o si el espesor del cuello se reduce dentro de esa distancia, se considera únicamente hasta el punto de transición.

g.2.2) Parte del cuello de la boquilla colocada dentro del espesor de la placa de la pared envolvente.

g.2.3) Parte del cuello de la boquilla que se extiende hacia el interior del tanque en una distancia igual a cuatro veces el espesor del cuello.

La resistencia adicional de la soldadura que une al accesorio con la pared envolvente o a la placa de refuerzo intermedia o a ambas, debe ser cuando menos igual a la parte proporcional de las fuerzas que pasan a través de todo el refuerzo y su impacto se transmita al accesorio.

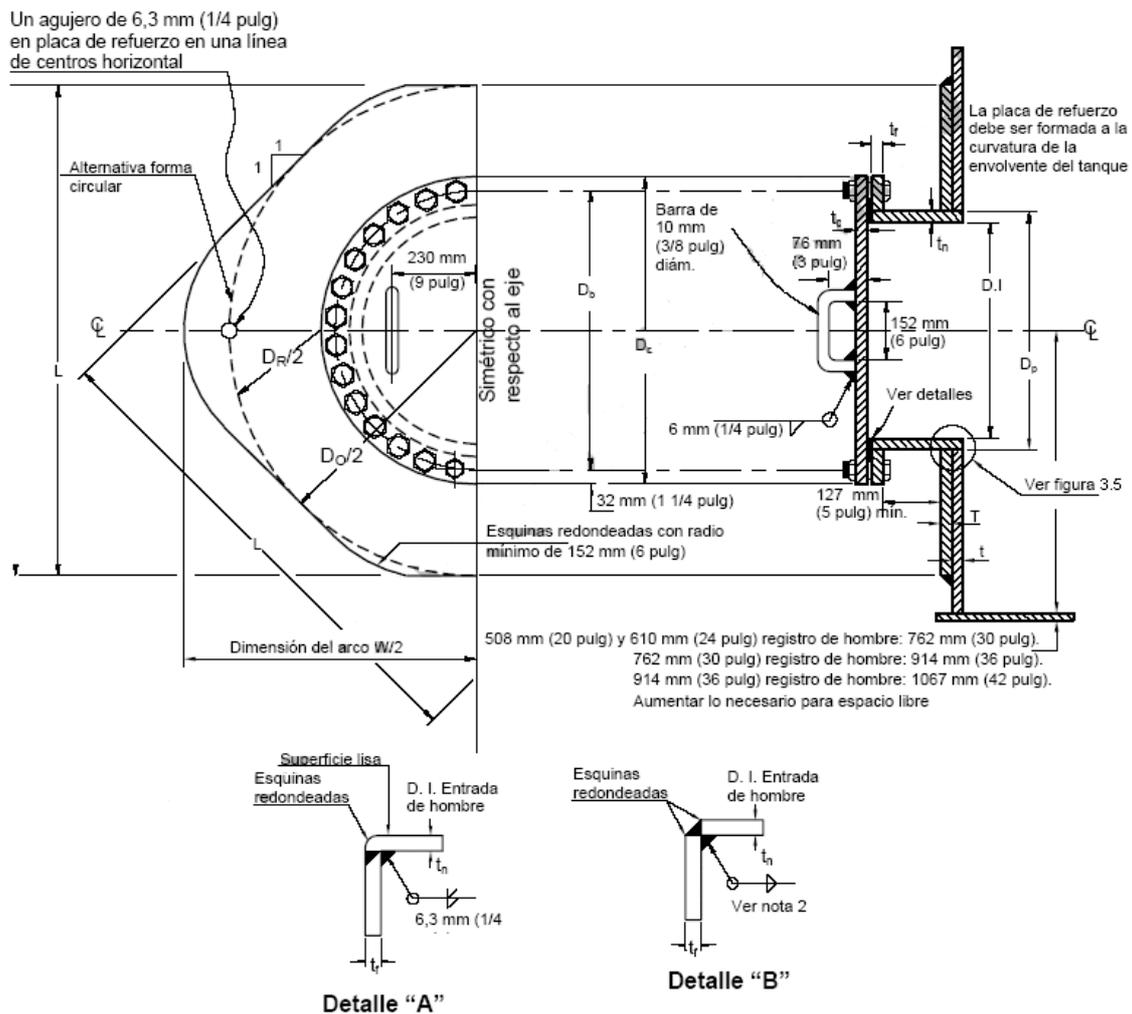


Fig. 3.3 Registro de hombre en el envolvente.

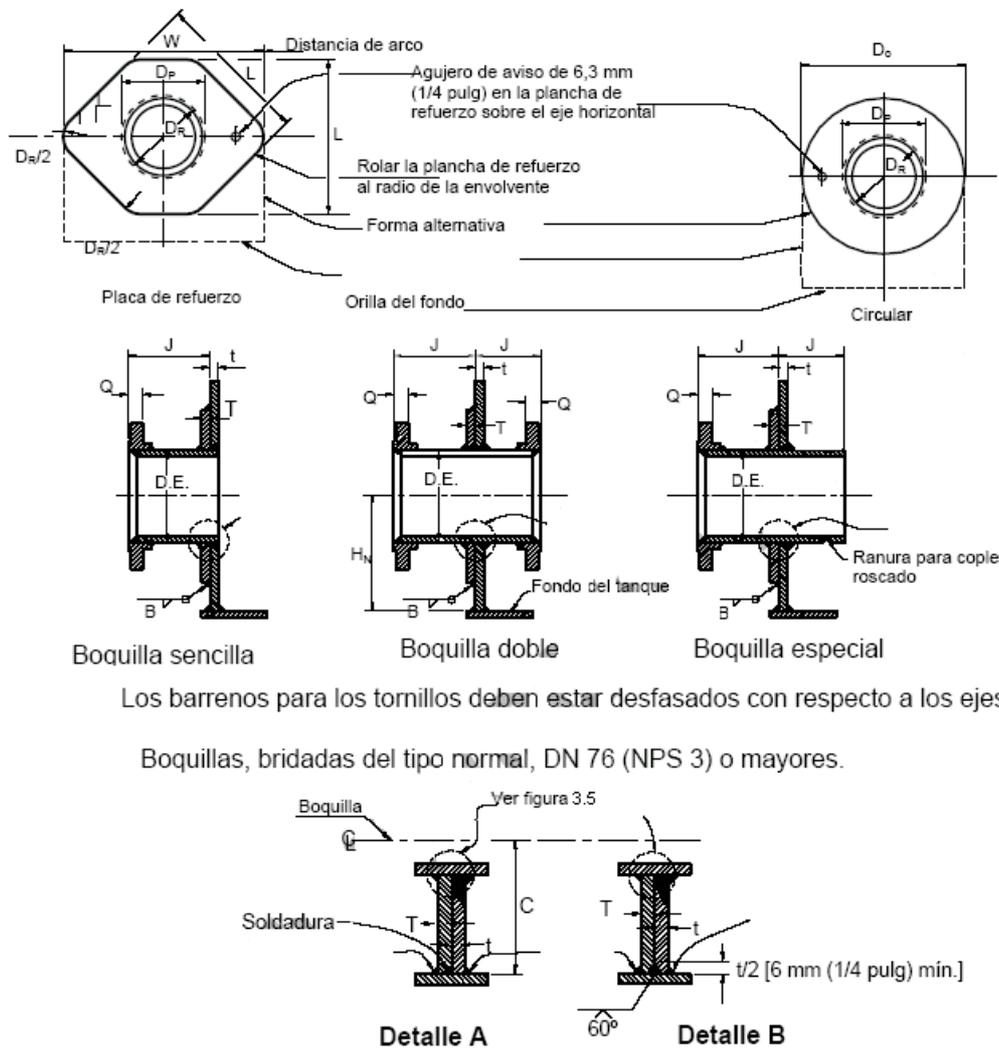


Fig. 3.4 Boquillas en el envolvente.

La resistencia adicional de la soldadura que une la placa de refuerzo a la pared envolvente del tanque, debe ser cuando menos igual a la parte proporcional de las fuerzas que pasan por todo el refuerzo y su impacto se transmita a la placa de refuerzo.

La soldadura periférica exterior que une el accesorio o la placa de refuerzo o conexiones patentadas con la pared envolvente se considera efectiva sólo en las partes que estén fuera del área limitada por las tangentes verticales a la abertura del envolvente; sin embargo la soldadura debe ser continua en toda la periferia exterior del refuerzo. Ver el siguiente párrafo para los esfuerzos permisibles. Toda soldadura en el perímetro interior se considera efectiva.

Las soldaduras de filete del perímetro exterior deben ser iguales al espesor de la placa más delgada de la pared envolvente o placa de refuerzo de las partes a unir.

La resistencia requerida de la soldadura y los refuerzos deben estar configurados para proporcionar a las fuerzas esfuerzos permisibles para los accesorios

- 1) Para filete de soldadura en placa de refuerzo exterior a la pared envolvente y placa de refuerzo interior a cuello de boquilla: $S_d \times 0,60$.
- 2) Tensión para soldadura de ranura transversal: $S_d \times 0,875 \times 0,70$.
- 3) Esfuerzo cortante en el cuello de la boquilla: $S_d \times 0,80 \times 0,875$.

Donde: S_d es el esfuerzo máximo permisible de diseño del material seleccionado.

Cuando las boquillas inferiores deben ser usadas con placa de refuerzo que se extiende al fondo del tanque ver Figura 3.4 el tamaño de la porción de la soldadura periférica que une la placa de refuerzo con la placa del fondo, debe ser conforme al inciso 3.1 listado b. La soldadura periférica interior será lo bastante grande para soportar el resto de la carga.

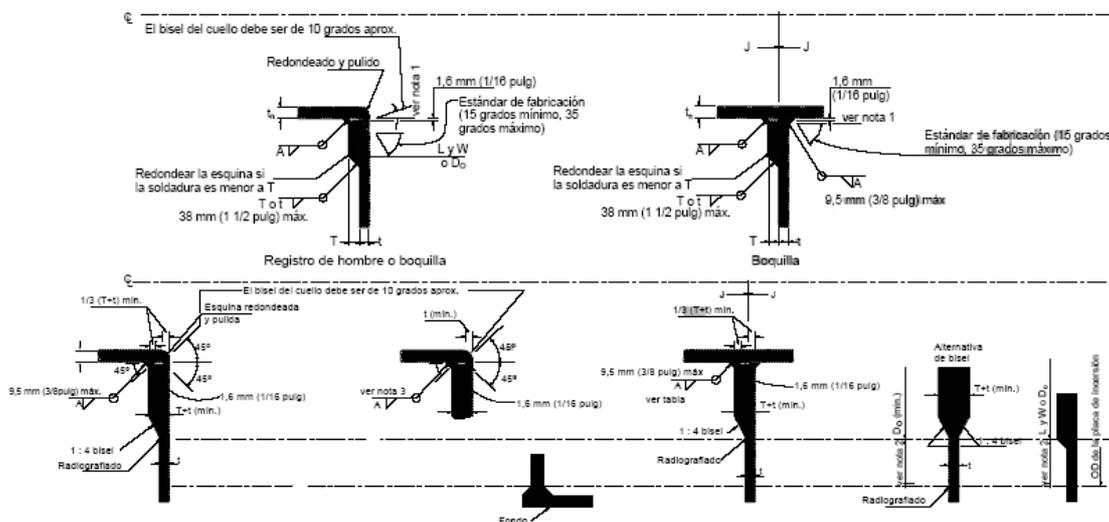


Fig. 3.5 Detalles mínimos permisibles de boquillas en el envolvente.

Notas:

1. El corte de el envolvente no debe ser menor al diámetro externo del cuello + 12,7 mm (1/2 pulg).
2. Referido al párrafo 3.7.3 del API estándar 650 o equivalente para separación mínima de soldadura en conexiones.
3. El tamaño de la soldadura debe ser ya sea A o t_n , espesor mínimo del cuello del registro o .
4. Otros detalles de inserción permisibles son mostrados en la Figura 3-8 del API estándar 620 o equivalente.
5. Las dimensiones y el tamaño de la soldadura que no son especificadas aquí se muestran en la Figura 3.3
6. Los detalles de soldadura en biseles pueden ser modificados.

Cuando dos o más aberturas estén situadas de tal forma que sus refuerzos queden tan cercanos que la distancia entre los bordes de sus soldaduras de filete estén a 8 veces el tamaño de la soldadura de filete más grande o menos, con un mínimo de 152 mm (6 pulg), el esfuerzo se hace de acuerdo con lo siguiente:

g.3.1) Todas las aberturas quedan incluidas en una sola placa de refuerzo, que debe ser para la mayor abertura del grupo.

g.3.2) Si las placas de refuerzo normales para las aberturas menores del grupo consideradas separadamente, caen dentro de los límites del área del refuerzo normal de una abertura mayor, las aberturas menores pueden quedar incluidas en esta placa sin aumentar el tamaño del refuerzo, con excepción de las aberturas que corten el eje vertical de otra abertura; entonces el ancho total de la placa de refuerzo a lo largo del eje vertical de cualquiera de las dos aberturas, no debe ser menor que la suma de los anchos de los refuerzos individuales, normales de las dos aberturas.

g.3.3) Si las placas de refuerzo normales para las aberturas menores consideradas separadamente no caen dentro de los límites del refuerzo normal de la abertura mayor, la forma y tamaño de la placa de refuerzo del grupo debe ser tal que incluya los límites exteriores de los refuerzos de todas las aberturas del grupo.

El cambio de forma desde el límite exterior del refuerzo de la abertura mayor al límite exterior de la abertura menor más lejana, se debe hacer por medio de una pendiente uniforme, a menos que el refuerzo normal de cualquier abertura

intermedia se prolongue hacia fuera de los límites fijados, en cuyo caso se unen las diferentes pendientes a los límites de los diferentes refuerzos normales considerados. También se aplican en este caso las disposiciones descritas anteriormente, relativas a las aberturas que estén sobre o adyacentes a los ejes verticales de otras aberturas.

A toda placa sobrepuesta en la pared envolvente que sirva como refuerzo en las aberturas se le deben redondear sus esquinas con un radio mínimo de 76 mm (3 pulg); además deben llevar un agujero de aviso de 6 mm (1/4 pulg), localizado sobre el eje horizontal de la abertura.

3.4 DISEÑO DEL TECHO.

a) Generalidades

Los techos y las estructuras de los tanques, se diseñan para soportar su propio peso (carga muerta), más una carga viva uniforme sobre su área proyectada, no menor de 1,2 MPa (25 lb/pie²).

Las placas deben tener un espesor mínimo nominal de 5 mm (3/16 pulg) o ser de lámina calibre 7. Cualquier tolerancia requerida por corrosión para las placas del techo cónico autosoportado se debe agregar al espesor calculado. Cualquier tolerancia por corrosión para techos soportados se debe agregar al espesor mínimo nominal. Las placas de los techos cónicos soportados no deben estar sujetas a los miembros del soporte.

Todos los elementos estructurales ya sean internos o externos, deben tener un espesor mínimo nominal de 4 mm (0,17 pulg) en cualquier componente, y dependiendo del medio ambiente y/o del producto que almacene debe decidir si se le agrega el factor por corrosión.

Las placas del techo deben ser fijadas al ángulo de coronamiento del tanque con un filete continuo de soldadura, este filete se colocará antes del eje neutro del ángulo.

Sus placas deben reforzarse por medio de perfiles soldados a las mismas, pero no deben fijarse a las trabes y/o travesaños.

En esta tesis no se cubren todos los detalles de diseño de los techos, por lo que se debe asegurar el uso de una práctica de diseño que proporcione confianza y seguridad. Los techos diseñados bajo estas condiciones deben ser revisados por estabilidad.

b) Juntas frágiles.

La unión del techo-pared envolvente se considera frágil si la junta techo-pared envolvente falla antes que la del fondo-pared envolvente en el evento cuando la presión interna es excesiva. Cuando se especifique un tanque con junta frágil, el diseño del tanque debe cumplir con todo lo siguiente:

- b.1) Diámetro del tanque debe ser de 15,25 m (50 pies) o mayor.
- b.2) Su inclinación del ángulo de coronamiento del techo no debe exceder de la relación 1:12.
- b.3) El ángulo superior es fijado al techo con un filete simple continuo de soldadura que no exceda de 5 mm (3/16 pulg).
- b.4) La membrana de soporte del techo no debe estar unido a la placa del techo.
- b.5) El ángulo superior puede ser menor a los requeridos en el inciso 3.2 listado e.
- b.6) Todos los miembros en la región de la junta techo-pared envolvente, incluyendo los anillos de aislamiento (en caso de que se requieran) son considerados que contribuyen a el área de la sección transversal (A).
- b.7) El área de sección transversal (A) de la junta techo-pared envolvente, es menor que el límite mostrado abajo:

Unidades S.I.

$$A = \frac{W}{1390 \tan \theta}$$

Unidades U.S.

$$A = \frac{W}{201000 \tan \theta}$$

Donde:

θ = Ángulo entre el techo y un plano horizontal de la junta techo-pared envolvente (en grados).

W = Peso total de la pared envolvente y cualquier estructura soportada por ésta y techo (sin considerar el peso del techo) en S.I. (N), U.S. (lbf).

A = Área resistente a la fuerza de compresión en S.I. (mm²), U.S. (pulg²).

c) Esfuerzos permisibles.

Todas las partes de la estructura del techo deben ser proporcionadas de modo que la suma de los esfuerzos estáticos y dinámicos máximos no exceda las limitaciones especificadas en el AISC. La sección de la AISC, "Esfuerzos permisibles de diseño" será utilizada para determinar los esfuerzos permisibles de la unidad.

d) Espesores mínimos requeridos.

El espesor mínimo de los miembros estructurales incluyendo su corrosión permisible sobre el lado o lados expuestos, no debe ser menor que 6 mm (1/4 pulg); estos son: columnas, ángulos atirantadores, vigas, o atiesadores, los cuales por su diseño normalmente resisten fuerzas axiales de compresión y 4 mm (0,17 pulg) para cualquier otro miembro estructural.

e) Máxima relación de esbeltez.

Para columnas, la relación de esbeltez l / r_c no debe exceder su valor de 180. Para otros miembros a compresión, el valor de l / r no debe exceder de 200 y para todos los demás miembros, excepto los tensores, debido a que el diseño se fundamenta sobre fuerza de tensión, el valor l/r no debe exceder de 300.

donde:

L = Longitud libre, mm (pulg).

rc = Radio mínimo de giro de la columna, mm (pulg).

r = Radio de giro que gobierna, mm (pulg).

f) Columnas.

Cuando no se especifiquen cargas laterales sobre las columnas y la columna no esté considerada por la especificación del AISC como un elemento esbelto, la siguiente ecuación para el límite de compresión puede ser usada en lugar de las ecuaciones de la especificación AISC cuando l/r excede de 120 y el esfuerzo de cedencia de la columna (F_y) es menor que o igual a 248,2 MPa (36000 lbf / pulg²).

Cuando l/r es menor que o igual a C_c :

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(l/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(l/r)}{8C_c} - \frac{(l/r)^3}{8C_c^3}} \quad \text{donde: } C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$$

Cuando l/r excede C_c :

$$F_a = \frac{\left[\frac{12\pi^2 E}{23(l/r)^2} \right]}{\left[1.6 - \frac{l}{200r} \right]}$$

donde:

F_a = Esfuerzo a la compresión permisible, MPa (lbf/pulg²).

F_Y = Esfuerzo de cedencia del material, MPa (lbf/pulg²).

E = Modulo de elasticidad, MPa (lbf/pulg²).

L = Longitud libre de la columna, mm (pulg).

r = Radio mínimo de giro de la columna, mm (pulg).

g) Techos cónicos soportados.

La pendiente mínima de los techos cónicos soportados, debe ser de 19 mm en 305 mm (3/4 pulg en 12 pulg). Si las vigas se apoyan directamente sobre el patín de las traveses, originando una pequeña variación en la pendiente de la viga, la pendiente del patín de la viga debe ser ajustada conforme lo ordenado para la pendiente del techo.

Los miembros de los soportes principales incluyendo aquellos que soportan las vigas, pueden ser laminados o en secciones fabricadas o armadas. Aunque estos elementos pueden estar en contacto con las placas del techo, la compresión del patín de un elemento o la cuerda de un tirante no debe ser considerada como soporte lateral de las placas del techo y debe ser atiesado lateralmente si es necesario, por otros métodos aceptables.

Elementos estructurales que sirven como vigas pueden ser rolados o en secciones fabricadas, pero en todos los casos deben ser conforme a los listados a, c y g de esta sección. Las vigas deben ser diseñadas para soportar la carga muerta de los largueros y las placas del techo con el patín de compresión del travesaño, este no debe ser considerado como soporte lateral de las placas del techo y debe ser atiesado lateralmente si es necesario, (ver lo descrito anteriormente).

Cuando se consideren cargas muertas y vivas adicionales, las vigas que estén en contacto directo con las placas del techo aplican la distribución de carga dentro de la misma, puede considerarse que reciben un soporte lateral debido

a la fricción entre las placas de techo y los patines a compresión de las vigas, con las siguientes excepciones:

- g.1) Armaduras y travesaños despatinados unidos por el alma y usados como vigas.
- g.2) Vigas con una altura nominal mayor que 375 mm (15 pulg).
- g.3) Vigas con una pendiente mayor que 50 mm en 305 mm (2 pulg en 12 pulg). Sus vigas deben estar espaciadas de tal forma que la distancia entre sus ejes sea de $0,6 \pi$ m (2π pies) sobre el anillo exterior, medido sobre la circunferencia del tanque. Su espaciamiento sobre los anillos interiores es de 1,7 m (5,5 pies) como máximo. Cuando se especifique que los tanques están en área sísmica, se deben colocar tensores de 19 mm (3/4 pulg) de diámetro (o su equivalente) los cuales deben ser localizados entre las vigas en el exterior de los anillos. Estos tensores pueden ser eliminados si se usan vigas de perfil tipo "I" o "H".

Las columnas deben ser hechas de formas estructurales, o puede ser usado tubo de acero. Cuando un tubo es usado como columna, este debe ser sellado por ambos lados, o se debe suministrar un drenaje y venteo, al drenaje se le debe colocarle un cople roscado con tapón macho de DN 25 (NPS 1).

Las grapas para la última hilera de travesaños deben ser soldadas a la pared envolvente del tanque. Las grapas guía de la base de la columna se deben soldar al fondo del tanque para prevenir movimientos laterales de la base de la columna y de ninguna manera la base de la columna se debe soldar a las placas del fondo o a las guías.

Todos los demás accesorios deben ser atornillados, remachados o soldados.

h) Techos cónicos auto soportados.

Debe cumplir con los siguientes requerimientos:

$$\theta < 37 \text{ grados (pendiente} = 9:12).$$

$$\theta > 9,5 \text{ grados (pendiente} = 2:12).$$

En unidades S.I.

$$\text{mínimo espesor} = \frac{D}{4.8 \text{sen} \theta} \sqrt{\frac{T}{2.2}} \geq 5 \text{mm}$$

Máximo espesor = 12.7 mm, excluyendo la corrosión permisible.

En unidades U.S.

$$\text{mínimo espesor} = \frac{D}{400 \text{sen} \theta} \sqrt{\frac{T}{45}} \geq 3/16 \text{mm}$$

Máximo espesor = ½ pulg, excluyendo la corrosión permisible.

donde:

θ = Ángulo de los elementos del cono con respecto a la horizontal, en grados.

D = Diámetro nominal de la pared envolvente del tanque en S.I. (mm), U.S. (pie).

T = La mayor de la combinación de las cargas S.I.(kPa); U.S. (lb/pie²) de las siguientes ecuaciones.

En unidades S.I.

$$D_L + (L_r \text{ o } S) + 0.4P_e$$

En unidades U.S.

$$D_L + P_e + 0.4(L_r \text{ o } S)$$

donde:

D_L = Cargas muertas.

L_r = Cargas viva mínima en el techo.

S = Carga hidrostática.

P_e = Presión externa de diseño.

La participación del área en la junta techo-pared envolvente será determinada usando la siguiente ecuación y no podrá ser excedida:

En unidades S.I.

$$\frac{D^2}{0.432 \text{sen} \theta} \left(\frac{T}{2.2} \right)$$

En unidades U.S.

$$\frac{D^2}{3000 \text{sen} \theta} \left(\frac{T}{45} \right)$$

El área calculada de las expresiones arriba indicada está basada sobre el espesor nominal del material menos cualquier corrosión permisible.

i) Techo autoportado tipo domo y Techo autoportado tipo sombrilla.

Deben cumplir los siguientes requerimientos:

Radio mínimo = 0,8 D (a menos que otra cosa indique el cliente).

Radio máximo = 1,2 D.

En unidades S.I.

$$\text{mínimo espesor} = \frac{r_r}{2.4} \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CP \geq 5mm$$

Máximo espesor = 13 mm, excluyendo la corrosión permisible

En unidades U.S.

$$\text{mínimo espesor} = \frac{r_r}{200} \sqrt{\frac{T}{45}} + CP \geq 3/16 \text{ pulg}$$

Máximo espesor = 1/2 pulg, excluyendo la corrosión permisible.

donde:

θ = Ángulo de los elementos del cono con respecto a la horizontal, en grados.

D = Diámetro nominal de la pared envolvente del tanque en S.I. (mm), U.S. (pie).

T = La mayor de la combinación de las cargas S.I.(kPa); U.S. (lb/pie²) de las siguientes ecuaciones.

En unidades S.I.

$$D_L + (L_r \text{ o } S) + 0.4P_e$$

En unidades U.S.

$$D_L + P_e + 0.4(L_r \text{ o } S)$$

donde:

D_L = Cargas muertas.

L_r = Carga viva mínima en el techo.

S = Carga hidrostática.

P_e = Presión externa de diseño.

Participación del área en la junta techo-pared envolvente será determinado usando la siguiente ecuación y no podrá ser excedida:

En unidades S.I.

$$\frac{Dr_r}{0.216} \left(\frac{T}{2.2} \right)$$

En unidades U.S.

$$\frac{Dr_r}{1500} \left(\frac{T}{45} \right)$$

El área calculada de las expresiones arriba indicada está basada sobre el espesor nominal del material menos cualquier corrosión permisible.

j) Fijación del ángulo superior para techos autoportados.

Sus secciones deben unirse con soldadura a tope de penetración y fusión completas. No es necesario aplicar los factores de eficiencia de junta.

Las orillas de las placas del techo ya sean cónicos, de sombrilla o domo, pueden doblarse para formar una brida que descansa sobre el ángulo superior para mejorar las condiciones de la soldadura.

k) Ventilación de tanques.

Los tanques diseñados de acuerdo a las normas, deben tener ventilación en techo fijo para prevenir ambas condiciones normales (resultado de los requerimientos operacionales y carga atmosférica) y condiciones de emergencia (resultado de la exposición de un fuego externo).

CAPÍTULO 4. PRINCIPALES MATERIALES COMERCIALES QUE SE USAN EN LA INDUSTRIA PARA FABRICAR TANQUES ATMOSFÉRICOS.

4.1 GENERALIDADES.

Los materiales que se usan comúnmente en la construcción de tanques atmosféricos, están definidos por la ASTM.

El espesor de diseño de las placas, se debe verificar en la orilla de molino recortada de todas las placas. Las placas se deben fabricar únicamente por el proceso de hogar abierto, oxígeno básico u horno eléctrico. Pueden usarse los aceros producidos por el proceso de control termo-mecánico (TMCP).

Las placas del envoltorio están limitadas a un espesor máximo de 45mm (1,75 pulg).

Las placas deben cumplir con las especificaciones indicadas en la Tabla No. 4.1. “Materiales para la fabricación de tanques de almacenamiento”.

Las tolerancias de fabricación de las placas deben cumplir con la última edición de la especificación ASTM A6.

Los aceros estructurales deben ser fabricados por el proceso de Hogar Abierto, Horno Eléctrico u Oxígeno Básico y deben cumplir con alguna de las especificaciones siguientes:

- ASTM A 36/A 36M; A 131/A 131M y A 992/A 992M o equivalente.
- CSA G40.21 Gr. 38W/(260W), 44W/(300W), 50W/(350W), 38WT/(260WT), 44WT/(300WT) y 50WT/(350WT).
- ISO 630 grados E 275 calidad B, C y D.

A continuación se muestran, en las tablas 4.1 y 4.2 las especificaciones que marca esa Norma. Se recomienda revisar, también, la tabla 2.1 (pág 8).

Para mayores referencias puede revisar el apartado 5 de la API 650.

**PRINCIPALES MATERIALES COMERCIALES QUE SE USAN EN LA INDUSTRIA PARA
FABRICAR TANQUES ATMOSFÉRICOS**

Especificación de material	Grado	Máximo espesor de placa		Observaciones
		mm	pulg	
ASTM A 36 / A 36M	-----	40	(1½)	
ASTM A 131 / A 131M	A B CS EH 36	12,5 25 40 45	(½) (1) (1½) (1¾)	Acero estructural para embarcaciones. Calidad estructural únicamente.
ASTM A 283 / A 283M	C	25	(1)	Placa de acero al carbono de calidad estructural de aplicación general.
ASTM A 285 / A 285M	C	25	(1)	Placa de acero al carbono, con esfuerzos de tensión bajos e intermedios, para soldaduras de fusión en recipientes a presión.
ASTM A 516 / A 516M	55 (380) 60 (415) 65 (450) 70 (485)	40	(1½)	Placa de acero al carbono para recipientes a presión en servicios de baja y moderada temperatura.
ASTM A 537 / A 537M	1 2	45	(1¾)	Placas de acero al carbono-manganeso-silicio tratadas térmicamente, para recipientes a presión.
ASTM A 573 / A 573M	58 (400) 65 (450) 70 (485)	40	(1½)	Placas de acero al carbono con tenacidad mejorada.
ASTM A 633 / A 633M	C D	45	(1¾)	Placa de acero de aleación estructural normalizado, para servicios bajos. De -45 °C (50 °F) de temperatura ambiental
ASTM A 662 / A 662M	B C	40	(1½)	Placa de acero al carbono-manganeso-silicio para recipientes a presión en servicio de baja y moderada temperatura -46 a -60 °C (-5° a -75 °F).
ASTM A 678 / A 678M	A B	40 45	(1½) (1¾)	Placa de acero de aleación estructural, con proceso de recocido y templado.
ASTM A 737 / A 737M	B	40	(1½)	Placa de acero de aleación, para recipientes a presión soldados y componentes de tuberías.
ASTM A 841 / A 841M	A Clase 1 B Clase 2	40	(1½)	Placa de acero producida por el proceso de control termo-mecánico (TMCP), para recipientes a presión soldados.
CSA G40.21	38W (260W) 44W (300W) 50W (350W) 38WT (260WT) 44WT (300WT) 50WT (350WT)	25 25 45 40 40 50	(1) (1) (1¾) (1½) (1½) (2)	Acero estructural. Los grados W pueden ser semicalmados o totalmente calmados. Los aceros totalmente calmados fabricados con grano fino como práctica deben ser especificados cuando se requieran. Para placas, la resistencia a la tensión debe ser de 1406 kg/cm ² (20 Kpsi) arriba de la mínima indicada por el grado.
ISO 630	E275 C y D E355 C y D	40 45	(1½) (1¾)	Aceros estructurales.

Tabla 4.1. Materiales para la fabricación de tanques de almacenamiento

**PRINCIPALES MATERIALES COMERCIALES QUE SE USAN EN LA INDUSTRIA PARA
FABRICAR TANQUES ATMOSFÉRICOS**

Temperatura del metal para diseño	Espesor de la placa en mm (pulg.)				
	≤13 (≤0.50)	>13≤25 (>0.50≤1.0)	>25≤40 (>1.0≤1.50)	Para placas insertadas y bridadas	
				>40≤51 (>1.50≤2.0)	>51≤76 (>2.0≤3.0)
Arriba de 286 K (10°C)	A 283 / A 283M Grado C	A 283 / A 283M Grado C			A 516 / A 516M
	A 131 / A 131M Grado A	A 131 / A 131M Grado B			
	A 36 / A 36M	A 36 / A 36M	A 36 / A 36M	Grado E 355 Calidad C	
	Grado E 275 Calidad C	Grado E 275 Calidad C	Grado E 275 Calidad C		
Arriba de 266 K (-7°C)	A 283 / A 283M Grado C		A 573 / A 573M Grado 400 (Grado 58)		A 516 / A 516M
	A 131 / A 131M Grado A	A 131 / A 131M Grado B	A 36 / A 36M		
	A 36 / A 36M	A 36 / A 36M		Grado E 355 Calidad C	
	Grado E 275 / E 355 Calidad C	Grado E 275 / E 355 Calidad C	G40.21 Grado 260T (Grado 38T)		
	G40.21 Grado 260W (Grado 38W)	G40.21 Grado 260W (Grado 38W)	G40.21 Grado 350T (Grado 44T)		
	G40.21 Grado 350W (Grado 44W)	G40.21 Grado 350W (Grado 44W)	A 662 / A 662M gr. B		
Arriba de 250 K (-23°C)	Grado E 275 / E 355 Calidad D	A 573 / A 573M Grado 400 (Grado 58)	A 573 / A 573M Grado 400 (Grado 58)		A 516 / A 516M
	G40.21 Grado 260W (Grado 38W)	Grado E 275 / E 355 Calidad D	Grado E 275 / E 355 Calidad D (4)		
	G40.21 Grado 350W (Grado 44W)	G40.21 Grado 260T (Grado 38T)	G40.21 Grado 260T (Grado 38T)	Grado E 355 Calidad D	
		G40.21 Grado 350T (Grado 44T)	G40.21 Grado 350T (Grado 44T)		
		A 516	A 516 / A 516M		
		A 662 / A 662M Gr.B	A 662 / A 662M Gr.B		
Arriba de 233 K (-40°C)		A 131 / A 131M Grado CS	A 131 / A 131M Grado CS	A 131M / A131M Grado CS	A 537 / A 537M Clase 1
	G40.21 Grado 260T (Grado 38T)	G40.21 Grado 260T (Grado 38T)	G40.21 Grado 260T (Grado 38T)		
	G40.21 Grado 350T (Grado 44T)	G40.21 Grado 350T (Grado 44T)	G40.21 Grado 350T (Grado 44T)		
	A 516 / A 516M	A 516 / A 516M	A 516 / A 516M		
	A 662 / A 662M Grado B	A 662 / A 662M Grado B	A 662 / A 662M Grado B		

Tabla 4.2 Limitaciones de las especificaciones de placas de acero ASTM para usarse en tanques atmosféricos.

CAPÍTULO 5. ESCALERAS DE ACCESO Y MEZZANINE.

5.1 REQUERIMIENTOS PARA ESCALERAS.

1. Todas las piezas deben ser metálicas.
2. El ancho mínimo de escaleras debe ser de 610 mm (24 pulg).
3. El ángulo máximo de la escalera con respecto a la horizontal debe ser de 50°.
4. El ancho mínimo de la huella debe ser de 200 mm (8 pulg). Huella y el peralte tendrán una relación tal que la suma del doble del peralte más la huella, debe estar comprendida entre 610 mm (24 pulg) y 660 (26 pulg).
El peralte debe ser constante para todos los escalones de la misma escalera.
5. Las huellas deben ser de emparrillado o de material antiderrapante.
6. Los pasamanos de la escalera y de la plataforma se unirán sin rebordes. La altura de los pasamanos medida desde el principio de la huella debe ser de 762 a 864 mm (30 a 34 pulg).
7. La distancia máxima entre los postes del barandal medida sobre los pasamanos debe ser de 2438 mm (96 pulg).
8. La escalera debe diseñarse para soportar una carga concentrada móvil de 4450 N (1000 lbf) como mínimo.
La estructura de los pasamanos debe soportar una carga de 890 N (200 lbf) como mínimo, en cualquier dirección y en cualquier punto.
9. Deben ir barandales a ambos lados de las escaleras rectas, y también de las circulares cuando la distancia entre el envolvente del tanque y la escalera sea mayor de 200 mm (8 pulg).
10. Las escaleras helicoidales deben ir totalmente apoyadas sobre el envolvente del tanque y el extremo inferior de su estructura no debe apoyarse en el piso.

Es recomendable que se use el mismo tipo de ángulo para todas las escaleras de tanques del área o planta.

5.2 REQUERIMIENTOS PARA PLATAFORMAS Y PASARELAS.

1. Todas las piezas deben ser metálicas.
2. El ancho mínimo a nivel de piso debe ser de 610 mm (24 pulg).
3. Los pisos deben ser de emparrillado o material antiderrapante.
4. La altura del pasamano sobre el piso de la plataforma o pasarela debe ser de 1067 mm (42 pulg).
5. La altura mínima de la placa de tope debe ser de 76 mm (3 pulg).
6. La distancia entre la parte superior del piso y la parte inferior de la placa de tope 6 mm (1/4 pulg).
7. El refuerzo del barandal debe ir aproximadamente a la mitad de la altura del pasamano y paralelo a este.
8. La distancia máxima entre postes del barandal debe ser de 2438 mm (96 pulg).
9. La plataforma y la pasarela deben soportar una carga concentrada móvil de 4450 N (1000 lbf) como mínimo. La estructura de los pasamanos debe de soportar una carga de 890 N (200 lbf) como mínimo aplicada en cualquier dirección y en cualquier punto de la parte superior del barandal.
10. Deben ir barandales a ambos lados de las plataformas y se discontinuarán cuando sea necesario para acceso.
11. En las partes donde no haya barandal, cualquier espacio entre un tanque y la plataforma, mayor de 150 mm (6 pulg) debe ser cubierto con emparrillado o material antiderrapante.
12. Las pasarelas que van de un tanque a otro, hacia el piso o hacia otra estructura, deben soportarse de tal manera que permita el movimiento relativo de las estructuras unidas por la pasarela; esto puede lograrse, fijando rígidamente un extremo de la pasarela dejando una junta deslizable en el otro.

CAPÍTULO 6. SOLDADURA: PROCEDIMIENTOS INDUSTRIALES PARA SOLDADURA EN LA FABRICACIÓN DE TANQUES ATMOSFÉRICOS.

6.1 INTRODUCCION.

La soldadura no es un elemento de máquina, sino un proceso de fabricación que nos recuerda que un proyecto tiene muchas facetas además del análisis de esfuerzos. En efecto, en el análisis de esfuerzos y en el dimensionado de detalle de las piezas se invertirá sólo una parte pequeña del tiempo total empleado en el proyecto. En la mayoría de los casos, los proyectos dependen de manera importante del proceso de fabricación, el cual debe ser conocido de modo particular, aunque esto requiere alguna información complementaria. Como el análisis ordinario de esfuerzos de la soldadura se presta a alguna imprecisión, merece la debida atención. El efecto de este proceso de fabricación sobre el proyecto es lo suficientemente importante para que los elementos de maquinas soldados y las propias maquinas presenten un aspecto distinto.

6.2 TIPOS DE SOLDADURA.

6.2.1 Soldadura a Tope: Es la soldadura que se deposita en la ranura entre dos elementos situados en el mismo plano (a tope) y cuyos bordes no quedan en contacto. Los bordes pueden ser rectangulares, en V (simple o doble) o en U (simple o doble).

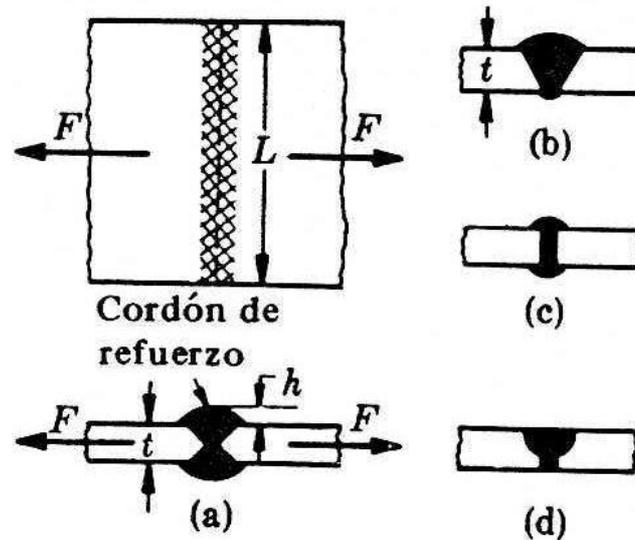


FIG. 6.1 Uniones a tope. En (a) una ranura en doble V (o en X) con refuerzo en ambas caras; en (b) una ranura en V simple reforzada; en (c) ranura cuadrada reforzada; en (d) ranura en U simple, refuerzo eliminado.

Una unión a tope puede estar reforzada en ambas caras, en una cara o en ninguna. Cuando no hay refuerzo, la practica usual es formar el cordón y luego mecanizarlo al ras. Con o sin esfuerzo, el esfuerzo nominal medio se calcula por

$$F = s_t t L \quad (6.1)$$

donde L es la longitud de la soldadura y t el espesor de la plancha. Los ensayos ponen en evidencia que las uniones soldadas a tope reforzadas efectuadas sobre acero dulce con varilla de metal de aporte de las mismas propiedades mecánicas que las chapas soldadas tienen casi la misma resistencia estática que estas, pero para mayor seguridad conviene asignar una resistencia relativa, o rendimiento, de $n = 90\%$ o menos; hay que tener en cuenta la concentración de esfuerzos debida a la discontinuidad del cordón.

6.2.2 Soldadura de Filete: Soldadura que tiene sección transversal aproximadamente triangular y que une dos superficies situadas aproximadamente en ángulo recto como las ensambladas en T.

La soldadura normalizada de filete completo tiene una sección de triángulo isósceles rectángulo, frecuentemente con los catetos b del triángulo iguales al espesor de la chapa, aunque también pueden ser menores; además un cateto puede ser mas largo que el otro

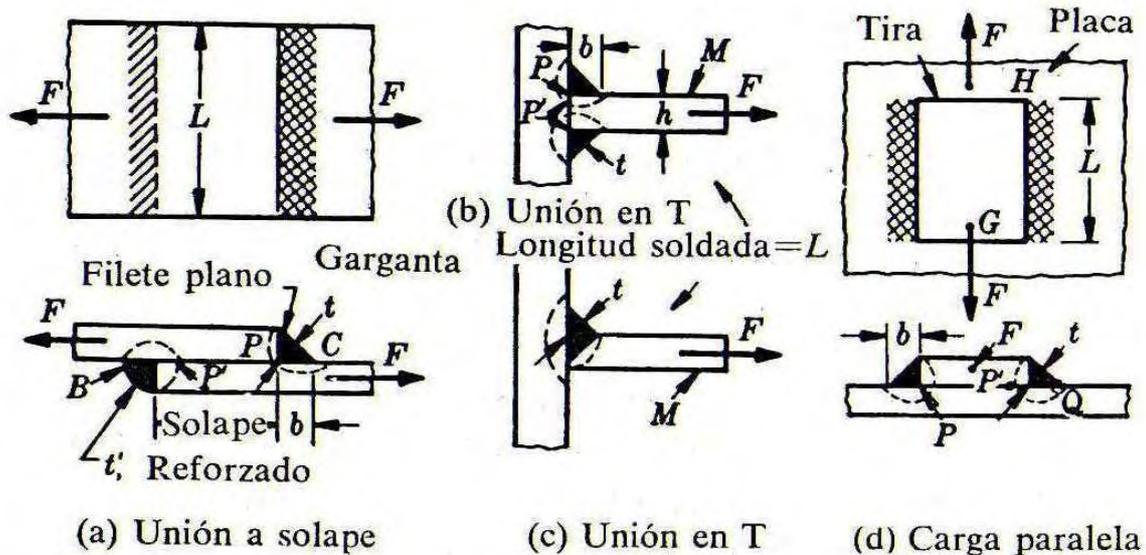


FIG. 6.2 Soldaduras en ángulo

El esfuerzo nominal calculado para las configuraciones de la figura 6.2 se considera como de cizalladura, y el área que se supone ha de resistir la carga es siempre la de garganta, a causa de que las fallas de soldadura suelen ocurrir a través de esta, aunque la dimensión típica o medida nominal de la soldadura es la longitud del cateto b . Las áreas de garganta de la figura 6.2a son tL en C y $t'L$ en B ; pero se supone que ambas soldaduras son normalizadas y tiene cada una el área tL ; entonces para las figuras 6.2 a, b y c, el esfuerzo nominal se calcula por

$$F = s_s(2tL) = 2s_s Lb \cos 45^\circ \quad (6.2)$$

donde $t = b \cos 45^\circ$. Aunque esta ecuación sencilla no tiene en cuenta las complicaciones de los sistemas reales de esfuerzos, es suficiente para las cargas estáticas cuando los esfuerzos de calculo utilizados son los recomendados.

6.3 TAMAÑO DE LA SOLDADURA.

6.3.1 En juntas a tope, es el espesor de las placas a unir.

6.3.2 En soldadura de filete de lados iguales, es la longitud de cualquiera de los lados del mayor triángulo rectángulo isósceles que pueda ser inscrito, dentro de la sección transversal.

6.3.3 En soldadura de filete de lados desiguales, es la longitud del lado mayor del triángulo rectángulo que pueda ser inscrito dentro de la sección transversal del filete de soldadura.

6.4 TIPOS DE PROCESOS DE SOLDADURA.

6.4.1 Soldadura de Arco Sumergido.

En este proceso, el acero está cubierto con un fundente de soldadura (material granular fusible) y se alimenta automáticamente un alambre-electrodo de metal desnudo. Este proceso es excelente para soldadura automática de uniones planas sencillas (y también costuras circulares) y se utiliza extensamente en recipientes de precisión. Su alta velocidad la hace recomendable para procesos de producción.

6.4.2 Proceso con Hidrógeno Atómico.

En este, la energía del arco se utiliza para dividir las moléculas de hidrógeno en átomos, en lugar de fundir el metal. Luego se recombina el hidrógeno para formar nuevamente moléculas, desprendiendo energía a alta temperatura (3980°C) siendo esta energía desprendida la que funde el metal. El hidrógeno provee también la protección para evitar los efectos de porosidad y fragilidad del nitrógeno y el oxígeno. Este proceso se aplica a una amplia variedad de metales, manual o automáticamente.

6.4.3 Soldadura por Resistencia.

Ésta se realiza debido a la resistencia al paso de la corriente eléctrica en los puntos a unir. En la **Soldadura por Puntos**, dos electrodos aprietan las chapas metálicas una contra otra, y en el punto en que se ejerce la presión, la resistencia a la corriente eléctrica produce un calentamiento que, conjuntamente con la presión, produce la soldadura. Si se emplean dos rodillos

de cobre como electrodos y se hace pasar a las dos chapas metálicas entre dichos rodillos, queda soldada una costura en los puntos donde los rodillos aprietan las chapas entre sí, denominándose este proceso **Soldadura por Costura**.

En la **Soldadura por Gas** se emplean una llama caliente y una varilla metálica. En el proceso oxiacetilenico se utiliza acetileno quemado en oxígeno. La llama calienta a las partes a unir, manteniendo una masa de metal fundido en la unión de las piezas, añadiéndose metal de aporte para formar las juntas. La soldadura a gas es particularmente adecuada para soldar metal delgado y se aplica a metales muy diferentes.

CAPÍTULO 7. ACABADOS PARA LOS TANQUES ATMOSFÉRICOS.

7.1 INTRODUCCION.

Las consideraciones y criterios establecidos en este capítulo, deben utilizarse como guía para el personal encargado de la selección del sistema de protección anticorrosiva a utilizar.

Esta información puede ser utilizada al establecer bases de concurso o los requisitos contractuales que requieran la especificación de un sistema de protección anticorrosiva con recubrimientos, de acuerdo al alcance definido en la presente tesis.

7.2 CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES.

Los ambientes más comunes predominantes en las instalaciones con actividades industriales, son los que a continuación se describen:

- ☛ **Ambiente seco.** Es el que predomina en zonas geográficas cuya humedad relativa promedio anual es menor a 60 %.

- ☛ **Ambiente húmedo.** Es el que predomina en zonas geográficas cuya humedad relativa promedio anual es de 60% o mayor.

- ☛ **Ambiente húmedo y salino.** Es el que predomina en zonas geográficas cuya humedad relativa promedio anual es mayor del 60% con brisa marina, así como los que se localizan a una distancia de 30 kilómetros costa adentro.

- ☛ **Ambiente húmedo, con o sin salinidad y gases derivados del azufre, entre otros contaminantes.** Es aquel en el que predomina una humedad relativa promedio anual mayor del 60%, con presencia de gases derivados del azufre y otros.

- ☛ **Ambiente marino.** Es el que predomina en instalaciones que se encuentran sobre la superficie del mar, tales como la parte flotante de las embarcaciones y las estructuras, equipos y tanques de almacenamiento de las plataformas marinas.
- ☛ **Interior de tanques de almacenamiento.** Es el que predomina en el Interior de tanques y recipientes para diferentes fluidos, como: agua salada, agua potable, turbosina, destilados, crudos, etcétera.
- ☛ **Condición de operación.** Son las condiciones bajo las cuales opera un equipo, como son: alta o baja temperatura e interior de equipos.

7.3 GUÍA DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN.

7.3.1 Componentes de un Sistema y su Función.

Un sistema de recubrimientos es una unidad funcional que proporciona protección al sustrato y puede consistir de una, dos, tres o más capas de recubrimiento (pintura). Un sistema típico es el que integra hasta de tres capas de recubrimiento, denominados: primario, intermedio y acabado, cada una de las cuales tiene diferente función:

7.3.1.1 Función del Recubrimiento Primario.

El recubrimiento primario proporciona la más importante función en la prevención de la corrosión, debido a que se encuentra en contacto directo con la superficie a proteger y previene la corrosión en cualquiera de las formas siguientes: como una barrera que contiene pigmentos inhibidores de la corrosión y electroquímicamente al abrir el circuito, siendo esta última su acción más efectiva. También proporciona la base sobre la cual las subsecuentes capas del sistema deben adherirse: si el primario no tiene buena adherencia, el resto del sistema tampoco la tendrá.

7.3.1.2 Función del Recubrimiento Intermedio.

El recubrimiento intermedio sirve para sellar algunas picaduras (“pinholes”), huecos o porosidades, proporcionando una capa adicional de protección anticorrosiva al primario. Proporciona también la superficie sobre la cual se va a adherir el recubrimiento de acabado; es decir, sirve de enlace entre el primario y el acabado.

7.3.1.3 Función del Recubrimiento de Acabado.

El acabado es el recubrimiento final y exterior del sistema y proporciona resistencia adicional contra el medio ambiente. Ayuda a proteger a los recubrimientos intermedio y primario de: ácidos, álcalis, rayos ultravioleta y en algunos casos proporciona resistencia a la abrasión. El acabado es comúnmente seleccionado por estas propiedades y por su retención de color y brillo, lo que le da un aspecto estético confortable.

7.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA.

7.4.1. Condiciones de Exposición.

El primer paso consiste en determinar el tipo de condiciones de exposición o el medio ambiente que debe resistir el recubrimiento y otras condiciones de servicio, por ejemplo: ambiente seco, húmedo o salino, éstos en condiciones de alta o baja temperatura, salpicaduras, derrames o vapores químicos, inmersión total o intermitente en diversos fluidos, etc.

7.4.2 Condiciones de Superficie.

El segundo paso consiste en identificar las condiciones de la superficie a proteger; si el recubrimiento va a ser aplicado sobre un acero nuevo y recién preparado con chorro abrasivo, la selección del sistema es más simple, pero si la superficie tiene un recubrimiento viejo y maltratado por el medio ambiente,

entonces la selección es crítica ya que se tendrá que determinar si se encuentra en condiciones de mantenimiento o no. De no eliminarse el recubrimiento existente, se tendrá que efectuar una prueba de compatibilidad y determinar el tipo de recubrimiento a aplicar. En caso de que deba retirarse el recubrimiento deteriorado, se tendrá que determinar el método de limpieza más adecuado para no afectar instalaciones cercanas.

7.4.3 Limitaciones en la Preparación.

El tercer paso consiste en determinar si existen limitaciones para la preparación de la superficie. Aunque la limpieza con chorro de arena es el medio preferido, se advierte que éste puede no ser permitido en áreas residenciales, municipales, plantas químicas o cerca de otras instalaciones. Si la preparación de la superficie se efectúa con herramienta de mano o con chorro de agua a presión, se deberá seleccionar un recubrimiento afín a ese tipo de preparación.

7.4.5 Condiciones de Operación.

El cuarto paso consiste en definir si existen restricciones por condiciones de operación, tales como alta o baja temperatura e interior de tanques.

7.4.6 Consideraciones Diversas.

Por último, las regulaciones concernientes a la emisión de volátiles a la atmósfera (VOC) es otro factor determinante, pues dependiendo del Estado de la República, zona o área en que se encuentre la superficie a proteger, se determinará el máximo VOC permitido por litro de recubrimiento.

Cabe advertir que para la aplicación de los recubrimientos, el tiempo imperante y la temperatura ambiente influyen fuertemente, debido a que estas condiciones pueden afectar el desempeño final del producto. Sin embargo, se debe asumir que esto no debe ser motivo para cambiar el sistema seleccionado y que en cambio, el aplicador debe alcanzar las condiciones mínimas

necesarias durante la aplicación, para obtener los resultados esperados del sistema.

Ambiente	Condición de superficie (ver tablas 7.3 y 7.4)	Sistemas de recubrimientos (ver tabla 7.2)	Preparación de superficie		Observaciones (ver tabla 7.5)
			Método (ver tabla 7.6)	Grado de limpieza (ver tabla 7.5)	
1.- Seco	Grado A, B, C, D, Acero nuevos y con corrosión sin pintar	1, 2	2 o 1	CWAB-10 DWAB-10 SP 10/NACE 2 ISO Sa 2/1/2	Limpieza a metal cercano a blanco
	Grado E, F, G y H Aceros previamente pintados o con corrosión grados C y D	1, 2 u 8	3 o 2 manual o mecánica	CWJ-2 DWJ-2 CWAB-10 M DWAB-10 M	Limpieza a pintura vieja para repintada Limpieza a metal comercial o ráfaga si se elimina toda la pintura suelta
2.- Húmedo	Grados A, B, C y D Aceros nuevos y con corrosión sin pintar	1, 3 o 5	2 o 1	CWAB-6 DWAB-6 SP 5/NACE 1 ISO Sa 3	Limpieza a metal blanco
	Grados E, F, G y H Aceros previamente pintados o con corrosión grados C y D.	2, 1 u 8	3 o 2 manual o mecánica	CWJ-2 DWJ-2 CWAB-10 DWAB-10	Limpieza de pintura vieja para repintado Limpieza a metal comercial si se elimina toda la pintura
3.- Húmedo con salinidad y gases derivados del azufre	Grados A, B, C y D Aceros nuevos o con corrosión sin pintar	3, 4 o 2	2 o 1	CWAB-6 DWAB-6 SP 5/NACE 1 ISO Sa 3	Limpieza a metal blanco
	Grados E, F, G y H Aceros previamente pintados o con corrosión grados C y D.	2 o 1	3 o 2 manual o mecánica	CWAB-10 L DWAB-10 L	Limpieza a metal comercial si se elimina toda la pintura
4.- Marino	Grado A, B, C y D Aceros nuevos o con corrosión sin pintar.	3, 4 o 2	2 o 1	CWAB-6 DWAB-6 SP 5/NACE 1 ISO Sa 3	Limpieza a metal blanco
	Grado E, F, G y H Aceros previamente pintados o con corrosión grados C y D.	3 o 2	3 o 2 manual o mecánica	CWAB-10 L DWAB-10 L	Limpieza a metal comercial
5.- Interior de tanques	Grados A, B, C y D Aceros nuevos o con corrosión sin pintar	5 o 6	2 o 1	CWAB-6 DWAB-6 SP 5/NACE 1 ISO Sa 3	Limpieza a metal blanco
	Grados E, F, G y H Aceros previamente pintados o con corrosión grados C y D.	5 o 6	2 o 1		
6.- Alta temperatura	Grados A, B, C y D Aceros nuevos o con corrosión sin pintar.	7 260°C	2 o 3	CWAB-10 L DWAB-10 L	Limpieza a metal comercial
	Grados E, F, G y H Aceros previamente pintados o con corrosión grados C y D.	7 560°C	2 o 1	CWAB-6 DWAB-6 SP 5/NACE 1 ISO Sa3	Limpieza a metal blanco

Tabla 7.1. Sistemas de protección anticorrosiva para superficies metálicas exteriores.

ACABADOS PARA LOS TANQUES ATMOSFÉRICOS

Sistema No.	Descripción	% Sólidos en peso	Capas	Espesor por capa seca	Espesor total	Aplicación	Observaciones
1	Primario epóxico catalizado poliamida	70	1	100 micras	275 micras	Aspersión convencional o airless	Proporciona muy buena resistencia a ambientes húmedos salinos, químicos ácidos y alcalinos; el primario contiene inhibidores de corrosión, el intermedio proporciona mayor resistencia y el acabado le da excelente apariencia.
	Acabado epóxico catalizado poliamida	70	1	100 micras			
	Acabado poliuretano alifático de dos componentes	65	1	75 micras			
2	Auto Imprimantes epóxico catalizado poliamida.	70	2	100 micras	275 micras	Aspersión convencional o airless	Proporciona la misma protección que el sistema No. 1, con la ventaja de que disminuye costos de operación en aplicación y en preparación de superficies, ya que sólo requiere de limpieza a metal comercial.
	Acabado poliuretano alifático de dos componentes	65	1	75 micras			
3	Primario de zinc 100% autocurante base solvente.	70	1	75 micras	300 micras	Aspersión convencional o airless	Proporciona excelente protección anticorrosiva a los ambientes más severos; el primario actúa como ánodo de sacrificio y el intermedio y acabado proporcionan mayor resistencia adecuada para ambientes húmedos, con o sin salinidad y gases derivados del azufre y ambiente marino
	Acabado epóxico catalizado poliamida.	70	1	150 micras			
	Acabado poliuretano alifático de dos componentes.	65	1	75 micras			
4	Primario de zinc 100% autocurante base solvente	70	1	75 micras	250 micras	Aspersión convencional o airless	Es un sistema de muy buena resistencia a los ambientes severos; el primario de zinc se adhiere electroquímicamente y actúa como ánodo de sacrificio, en tanto que el acabado es producto de nueva tecnología de gran resistencia a los químicos ácidos y bases.
	Acabado polisiloxano	90	1	175 micras			
5	Primario epóxico catalizado aductoamina.	60	1	125 micras	275 micras	Aspersión convencional o airless	Presenta excelente resistencia al crudo, gasolina amarga, agua cruda, salada y tratada, destilados sin tratar, metanol. Se usa en interiores de tanques y en ambientes húmedos, con o sin salinidad y gases derivados del azufre.
	Acabado epóxico catalizado aductoamina	60	1	150 micras			

Tabla 7.2. Descripción de sistemas de protección anticorrosiva.

Sistema No.	Descripción	% Sólidos en peso	Capas	Espesor por capa seca	Espesor total	Aplicación	Observaciones
6	Primario epóxico catalizado poliamídico.	60	1	50 micras	300 micras	Aspersión convencional o airless	Muy buena resistencia a los ambientes húmedos con o sin salinidad, gases derivados del azufre y a los destilados sin tratar, gasolina amarga, combustóleo; interior de tanques de embarcaciones y tuberías que operan a bajas temperaturas, pero su resistencia a los aromáticos es pobre. Recomendable para exterior de tuberías que operan a bajas temperaturas.
	Acabado epóxico catalizado poliamídico	70	2	125 micras			
7	Recubrimiento de resina cumarona, aluminio, sílica y aceite de linaza.	50	2	37.5 micras	75 micras	Aspersión convencional o airless	Recomendable para temperaturas de hasta 260°C
	Recubrimiento de resina silicón y pigmento de aluminio.	45	2	37.5 micras	75 micras	Aspersión convencional o airless	Recomendable para temperaturas de 260°C hasta 560°C.
8	Auto imprimante epóxi amina cicloalifático con pigmento de aluminio.	90	2	100 micras	275 micras	Aspersión convencional o airless	Sistema recomendable para reparación de superficies previamente pintadas, sobre pinturas intemperizadas y superficies oxidadas, para ambientes húmedos con o sin salinidad y gases derivados del azufre y ambiente marino.
	Acabado poliuretano de dos componentes	65	1	75 micras			

Tabla 7.2. (cont.) Descripción de sistemas de protección anticorrosiva.

Condición	Según ISO 8501-1	Según SSPC-VIS 1
Grado A	Superficie de acero recubierta en gran medida por cascarilla de laminación adherida, pero con poco o nada de óxido.	Superficie de acero recubierta completamente con escama de laminación con corrosión no visible.
Grado B	Superficie de acero con óxido incipiente, en la que ha empezado a exfoliarse la cascarilla de laminación.	Superficie de acero cubierta con escama de laminación con óxido.
Grado C	Superficie de acero cuya cascarilla de laminación ha desaparecido por la acción del óxido, o que puede eliminarse raspando, pero con algunas picaduras visibles a simple vista.	Superficie de acero cubierta con óxido y picaduras no visibles.
Grado D	Superficie de acero cuya cascarilla de laminación ha desaparecido por la acción del óxido y en la que se ven a simple vista numerosas picaduras.	Superficie de acero cubierta con óxido y picaduras visibles.

Tabla 7.3 Diferentes grados de corrosión.

En el caso de superficies previamente recubiertas, deben considerarse 4 grados de condiciones de superficie establecidas, las cuales se describen en la tabla 7.4

Condición	Según SSPC-VIS 4/NACE VIS 7
Grado E	Superficie de acero previamente pintada, pintura ligeramente coloreada aplicada sobre una superficie limpiada con abrasivo a presión; pintura casi intacta.
Grado F	Superficie de acero previamente pintada, pintura ligeramente coloreada aplicada sobre una superficie limpiada con abrasivo a presión; pintura casi intacta.
Grado G	Sistema de pintura aplicado sobre una superficie de acero con pequeñas escamas pero limpio; sistema fuertemente intemperizado, ampollado y decolorado.
Grado H	Sistema de pintura degradado, aplicado sobre acero; totalmente intemperizado, ampollado, decolorado y con desprendimiento de capas.

Tabla 7.4 Diferentes condiciones de superficies pintadas.

Para información complementaria se puede recurrir a la norma **ISO 12944-2**, última revisión, que describe y clasifica las diferentes atmósferas a las que pueden estar expuestas las superficies.

Condición	Descripción de la limpieza de la superficie
SC-1	La superficie deberá estar libre de niveles detectables de contaminantes, utilizando un equipo de prueba de campo con la sensibilidad aproximada de un equipo de pruebas de laboratorio. Para propósitos de este estándar, contaminantes son: cloruros solubles al agua, sales solubles de hierro y sulfatos.
SC-2	La superficie debe tener máximo 5 microgramos/cm ² de contaminantes cloruros, máximo 10 microgramos/cm ² de iones solubles férricos, y máximo 17 microgramos de contaminantes sulfatos.
SC-3	La superficie debe tener máximo 50 microgramos de sulfatos por metro cuadrado.

Tabla 7.5 Grados de limpieza de contaminantes no visibles con chorro abrasivo húmedo.

No	Método	Uso	Áreas de restricción
1	Chorro de arena o abrasivo a presión, seco ISO 8504	Superficies de acero nuevas con corrosión grado A y B, donde se requiere formar perfil de anclaje; no está restringido para grados de corrosión C y D, donde ya existe perfil de anclaje provocado por la corrosión, previo estudio de la condición de superficie.	Refinerías, Complejos Petroquímicos, Terminales de Almacenamiento y Distribución, centros de trabajo y Zonas urbanizadas como el Distrito Federal, Monterrey, Guadalajara, Puebla, Aguascalientes.
2	Chorro de arena o abrasivo a presión, húmedo SSPC-TR 2/NACE 6 G198	Superficies de acero nuevas con corrosión grados A y B, donde se requiere formar perfil de anclaje; no está restringido para grados de corrosión C y D y superficies previamente pintadas, donde ya existe perfil de anclaje.	Ninguna Evitar proyectar directamente el chorro de agua sobre instalaciones de madera, aislamientos, instrumentos o instalaciones eléctricas; pueden ser dañadas.
3	Chorro de agua a alta y ultra alta presión NACE No. 5 SSPC/SP 12	Superficies de acero previamente pintadas, cuando se requiere eliminar toda la pintura, o en superficies de acero con grados de corrosión C y D, donde en ambos casos ya existe perfil de anclaje. En superficies de acero previamente pintadas, cuando solo se requiere preparar la superficie para repintado.	Ninguna Evitar proyectar directamente el chorro de agua sobre instalaciones de madera, aislamientos, instrumentos o instalaciones eléctricas; pueden ser dañadas.

Tabla 7.6 Aplicación de los métodos de preparación de superficies.

Material	Profundidad (milésimas de pulgada)			
	1.5	2	2.5	3-4
Malla arena sílica	16/35	16/35	8/35	8/20
Casajo de acero	G-80	G-40	G-40	G-25
Perdigón de acero	S-110	S-230	S-280	S-330
Malla granate	80	36	16	16
Casajo de aluminio	100	36	24	16

Tabla 7.7 Guía de abrasivos para obtener perfiles de anclaje específicos.

7.5 REQUERIMIENTOS AMBIENTALES.

Cuando el método de limpieza por abrasivo seco se utilice para la remoción de pintura en mal estado u otro material que contenga compuestos de plomo, cromo u otros que causan algún daño ecológico, debe tenerse cuidado de coleccionar los residuos y confinarlos a un lugar destinado para este fin.

Todos los residuos deben de ser recolectados para su correcta disposición. La aplicación del chorro abrasivo seco, solo se efectuará en aceros nuevos u oxidados sin pintar, así como cuando sea necesario un perfil de anclaje y la obra se ubique en zonas no urbanizadas.

Cuando su uso sea requerido en zonas urbanizadas, la operación tendrá que efectuarse con el correspondiente permiso de las autoridades municipales o estatales, aislando la superficie o el objeto a limpiar utilizando para ello colectores de polvo para evitar que éstos se incorporen al ambiente.

No se permite el uso de chorro abrasivo seco en zonas urbanas.

PRIMARIOS	RP-4B MODIFICADO	Inorgánico de zinc, 100% autocurante, base solvente, altos sólidos.
	RP-6 MODIFICADO	Epóxico catalizado poliamida de dos componentes, altos sólidos para estructuras exteriores e interior de tanques.
	RP-8 MODIFICADO	Epóxico catalizado poliamida de dos componentes, altos sólidos para interior de tanques con turbosina.
	RP-10 MODIFICADO	Epóxico catalizado aducto amina de dos componentes, altos sólidos para interior de tanques.
ENLACES Y AUTOIMPRIMANTES	RE-6B MODIFICADO	Epóxico catalizado poliamida de dos componentes, altos sólidos autoimprimante.
	RE-10B MODIFICADO	Epóxico catalizado amina de dos componentes, altos sólidos autoimprimante.
	RE-35 NUEVO	Epóxico catalizado cicloalifático con pigmento aluminio, autoimprimante.
	RA-26 MODIFICADO	Epóxico catalizado poliamida de dos componentes, altos sólidos para estructuras e interior de tanques con combustóleo.
ACABADOS	RA-28 MODIFICADO	Poliuretano alifático poliéster de dos componentes, altos sólidos para estructuras exteriores.
	RA-29 MODIFICADO	Epóxico catalizado a ducto amina de dos componentes, altos sólidos para interior de tanques con turbosina.
	RA-35 NUEVO	Polixiloxano de dos componentes, altos sólidos para estructuras exteriores.
	RA-30A MODIFICADO	Resina cumarona con pigmento de aluminio, sílica y aceite de linaza, altos sólidos, temperaturas de 80 °C hasta 260 °C.
	RA-30B MODIFICADO	Resina cumarona con pigmento de aluminio, sílica y aceite de linaza, altos sólidos, temperaturas de 80 °C hasta 260 °C.

Tabla 7.8 Clasificación de los recubrimientos anticorrosivos nuevos y modificados para cumplir regulaciones ambientales.

7.6 APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS.

7.6.1 Generalidades.

Después de la preparación de la superficie, el factor más importante para el buen funcionamiento de un sistema de protección anticorrosiva basado en recubrimientos, es la aplicación. En términos generales, una estructura metálica puede quedar protegida del medio ambiente si cuenta con una película de entre 4 y 6 milésimas de espesor de película seca. En la actualidad existen en el mercado diferentes tipos de recubrimiento, que en una sola aplicación pueden proporcionar de 1-8 milésimas de pulgada de espesor de película seca; sin embargo, el espesor óptimo de la película de recubrimiento está en función del desempeño esperado y se encuentra especificado para cada recubrimiento en la sección de sistemas.

La aplicación de un recubrimiento puede realizarse con diversas herramientas: brocha, rodillo y aspersion con o sin aire. Al especificar un sistema de recubrimientos, se necesita indicar con qué equipo se realizará la aplicación y cuál es el espesor que se requiere. Un porcentaje muy alto de las fallas de los recubrimientos en campo se debe a la aplicación deficiente del recubrimiento.

Dada la importancia de la aplicación, en un sistema de recubrimientos es importante mencionar que aún el más sofisticado recubrimiento protector, tendrá un desempeño deficiente si no es aplicado en forma correcta.

Se deben verificar las siguientes condiciones durante la aplicación de un recubrimiento:

7.6.1.1 Temperatura.

Los recubrimientos no deben ser aplicados cuando la temperatura del medio ambiente sea inferior a 4°C o superior a 43°C. Si el recubrimiento es aplicado arriba de 43°C, puede ocasionar que la película seque demasiado pronto y

traiga consecuencias como la falta de uniformidad en el espesor y mala adherencia. Si la temperatura es inferior a 4°C, puede alargarse el tiempo de secado y curado del recubrimiento hasta puntos inaceptables. No debe aplicarse el recubrimiento si existe la posibilidad de que la temperatura baje hasta el punto de congelación, antes de que éste haya secado.

7.6.1.2 Humedad.

La adherencia de la mayoría de los recubrimientos, excepto en aquellos de base acuosa, resulta seriamente dañada si la superficie por recubrir es contaminada con agua. Se debe evitar pintar cuando la humedad relativa ambiente sea mayor de 85%. La posibilidad de que se condense la humedad sobre una superficie por recubrir, puede predecirse midiendo la temperatura de la superficie y determinando el punto de rocío de la atmósfera circundante. La medida del punto de rocío es conveniente practicarla siempre que el ambiente se presente húmedo, lo que requiere el uso de un termómetro de bulbo seco y bulbo húmedo con su respectiva tabla psicométrica. La temperatura de la superficie más fría debe medirse con un termómetro de superficie. Si la temperatura de la superficie está descendiendo y se encuentra por abajo de los 3 °C del punto de rocío, se debe suspender la aplicación porque es probable que se condense el agua sobre la superficie. De igual manera, la humedad excesiva evita que el recubrimiento seque y cure en forma regular, excepto en casos como es el Inorgánico de Zinc, en el que la humedad favorece su curado.

7.6.1.3 Viento.

La aplicación de recubrimientos por medio de aspersion se hace más difícil cuando aumenta la velocidad del viento, debido a que el recubrimiento que se aplica no llega a proteger el área designada, con el consecuente desperdicio de recubrimiento; la apariencia de la superficie pintada generalmente no alcanza el espesor de recubrimiento deseado, porque las partículas atomizadas secan antes de tocar la superficie. Asimismo, las partículas de recubrimiento en suspensión en el aire pueden llegar a contaminar áreas adyacentes.

7.6.1.4 Precipitación.

Ninguna aplicación de recubrimientos debe ser hecha en presencia de precipitación pluvial o cuando ésta es inminente o reciente.

7.6.1.5 Instrucciones de aplicación.

Antes de aplicar los recubrimientos se deben leer con detalle las instrucciones de aplicación, así como la información técnica que se encuentra en las etiquetas de los recipientes de los recubrimientos. Las esquinas y bordes de las piezas a proteger, son lugares de difícil acceso a los recubrimientos y en donde generalmente comienzan los problemas de corrosión, por lo que se deberá hacer énfasis en estos lugares durante la aplicación. Cuando se aplican sistemas con más de un recubrimiento, resulta muy práctico utilizar recubrimientos de diferente color entre capa y capa, dado que facilita la inspección visual de los acabados. Cuando la exposición a la que estará sometido un sistema de recubrimientos, es considerada como severa, se recomienda verificar los espesores húmedos cada vez que se aplique una capa de recubrimiento, asegurando de este modo la funcionalidad del sistema protector.

CAPITULO 8. RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CIMENTACIÓN DE TANQUES ATMOSFÉRICOS.

8.1 CAPACIDAD DE CARGA.

La cimentación se debe considerar sometida a una carga igual a la suma del peso de la estructura, de la presión aplicada por el fluido al encontrarse lleno el tanque, afectada de un factor de carga igual a 1.4 y de una presión hidrodinámica atribuible a sismo, aplicada sobre el fondo del mismo, afectada de un factor de carga igual a 1.1. La carga total debe ser comparada con la resistencia estimada del suelo afectada de un factor de reducción, que se debe determinar más adelante, que depende del tipo de cimentación.

8.2 ASENTAMIENTOS TOTALES.

Los asentamientos respecto a puntos de la superficie del terreno circundante no afectados por la construcción, no deben alcanzar una magnitud tal que ocasionen dificultades en la operación del tanque. El máximo asentamiento total permisible se debe fijar tomando en cuenta las características del tanque y la flexibilidad del sistema de alimentación del mismo; para tanques construidos con acero ASTM A-36, ASTM 283-C y 283-D, los máximos asentamientos permisibles deben ser los indicados en la tabla 8.1. Para aceros de mayor resistencia, o para tanques conteniendo fluidos a una temperatura inferior a la temperatura ambiente, se deben considerar la posibilidad de falla frágil.

8.3 ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES.

Los movimientos relativos entre diferentes puntos del fondo del tanque no deben rebasar los límites indicados en la tabla 8.2, para el tipo de acero estructural empleado.

Tipo de asentamiento	Máximo asentamiento
Máximo asentamiento total en el perímetro	30 cm
Máximo asentamiento diferencial en el fondo	5 cm en 10 m

Tabla 8.1. Máximos asentamientos permisibles.

Por otra parte, los movimientos diferenciales a lo largo del perímetro del tanque deben ser suficientemente reducidos para limitar las deformaciones de la pared cilíndrica y garantizar el buen funcionamiento de los techos flotantes. Se debe verificar por tanto, que la compresibilidad del terreno de desplante sea aproximadamente uniforme a lo largo del perímetro y se debe evitar en lo posible el desplante de tanques parte sobre terreno firme y parte sobre relleno o sobre estratos compresibles de espesor variable.

8.4 CIMENTACIONES SUPERFICIALES.

Se debe recurrir a cimentaciones superficiales cuando el subsuelo natural o estabilizado por uno de los métodos definidos en 8.6, asegure el cumplimiento de los requisitos fijados en el presente capítulo. Lo anterior se debe comprobar por medio de los análisis detallados a continuación:

8.4.1 Análisis de Cimentaciones Superficiales.

8.4.1.1 Capacidad de Carga.

Para suelos suficientemente homogéneos, la capacidad de carga puede estimarse recurriendo a la fórmula de Terzaghiⁱ para desplantes en áreas circulares superficiales.

Tomando en cuenta que la flexibilidad del fondo de los tanques impide la redistribución de esfuerzos, se debe considerar que la falla ocurre por corte local.

Se tiene que:

$$q_d = (0.8cN'_c + 0.6\gamma_m r N'_\psi) F_R \quad (8.1)$$

donde:

q_d = presión máxima admisible, en ton/m².

C = cohesión del material, en ton/m².

γ_m = peso volumétrico medio de los estratos afectados por la cimentación, en ton/m³.

r = radio del área circular de desplante, en m.

(N'_c) y (N'_ψ) = factores de capacidad de carga, para falla por corte local determinados a partir del ángulo θ de fricción interna del material (Fig. 8.1)

F_R = (factor de reducción) = 0.6.

Los parámetros de resistencia del suelo, c y ϕ , se deben determinar por medio de pruebas de laboratorio representativas del estado de consolidación del suelo, considerando la carga que corresponda al tanque lleno y en las condiciones del primer llenado.

Para materiales cohesivos la prueba representativa debe ser una triaxial no consolidada, no drenada o una de compresión simple. En el caso de los suelos sometidos a preconsolidación (8.6.3), los parámetros pueden ser definidos mediante una prueba consolidada no drenada representativa de las condiciones de consolidación obtenidas. Para materiales no cohesivos la resistencia considerada debe ser la determinada en pruebas drenadas de resistencia al corte o en su defecto, la estimada a partir del estado de compacidad y la granulometría del material (Tabla 8.2).

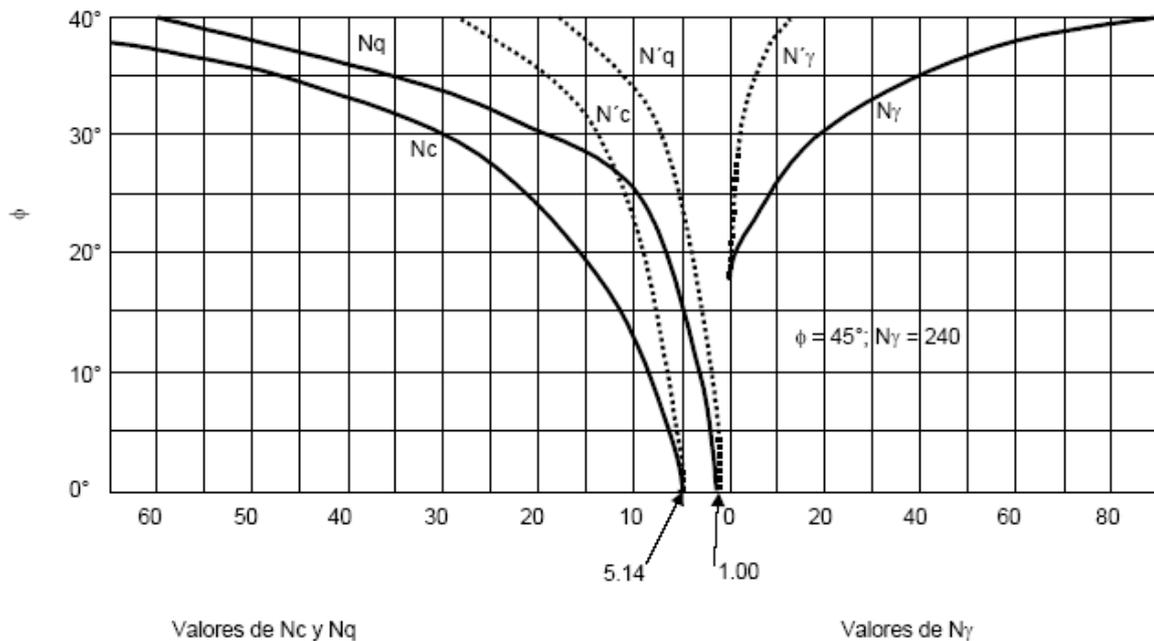


Fig 8.1 Factores de capacidad de carga.

Compacidad relativa de las arenas en función de los resultados de la prueba de penetración estándar		Valores representativos de q para arenas y limos		
		Material	Estado	
No. de golpes	Capacidad relativa			Suelto
0 a 4	Muy suelta	Arena uniforme granos redondeados	27.5	34
4 a 10	Suelta			
10 a 30	Media	Arena bien graduada con granos angulosos	33	45
30 a 50	Compacta	Grava arenosa	35	50
Más de 50	Muy compacta	Arena limosa	27-33	30-34
		Limo orgánico	27-30	30-35

Tabla 8.2. Angulo de fricción interna de materiales no cohesivos.

En el caso de los subsuelos estratificados, se debe verificar la estabilidad de la cimentación suponiendo que la falla pueda ocurrir a lo largo de superficies circulares (Fig. 8.2) y recurriendo a métodos de análisis límite, (Sueco, Bishop o similaresⁱⁱ). Además de la falla global (círculo A de la Fig. 8.2) se deben estudiar las posibles fallas locales (círculo B). Los parámetros de resistencia de los diversos estratos se deben determinar en la forma indicada anteriormente.

En este análisis, para el cálculo del momento motor se deben considerar las cargas indicadas en el punto 8.1. El momento resistente, afectado de un factor de reducción igual a 0.6, debe ser mayor o igual que el momento motor calculado.

$$\text{Momento resistente} = \Sigma(S_i \Delta L_i)R \quad (8.2)$$

$$\text{Momento motor} = \Sigma |T_i| R \quad (8.2a)$$

En que:

T_i = componente tangencial del peso de la dovela i .

S_i = resistencia al corte en la base de la dovela i .

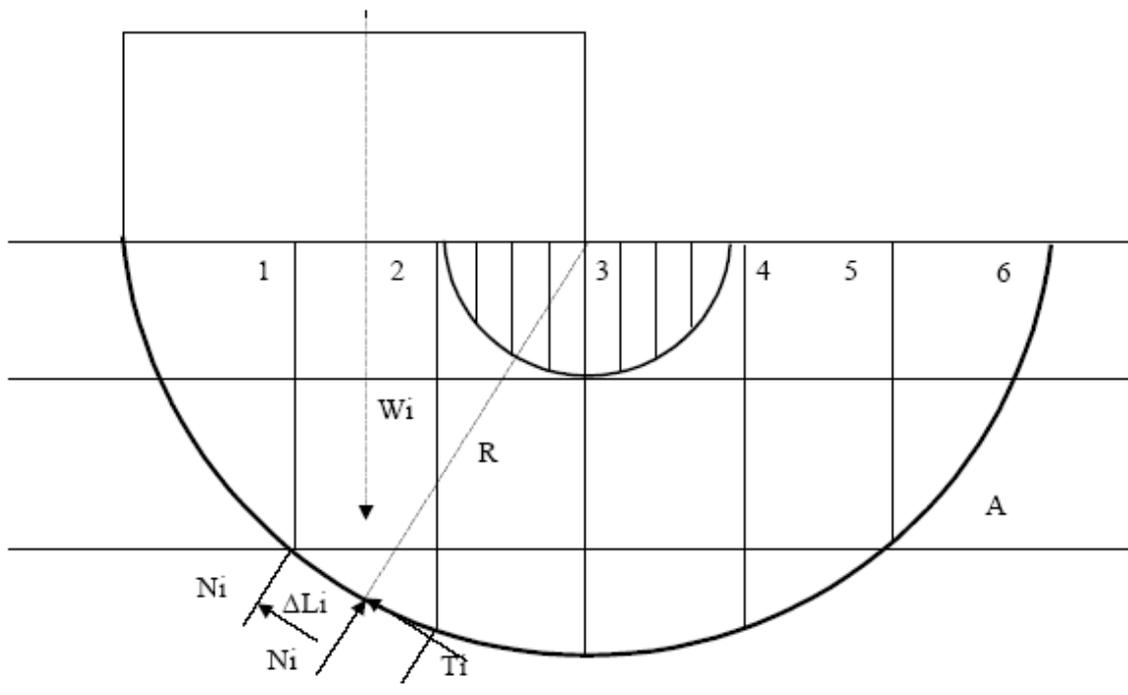


Fig. 8.2 Análisis de estabilidad de un tanque por el método sueco.

En el caso de tanques desplantados sobre un estrato de material blando confinado (Fig. 8.3), se debe verificar, además, que no puede presentarse flujo plástico radial de dicho material. Para ello, se debe verificar que la presión P , aplicada al nivel de desplante, párrafo 8.1, es menor que el siguiente valor.

$$P = 4a \left(\frac{D'}{D} \right)^2 F_R \quad (8.3)$$

en que c es la cohesión del material blando determinada en la forma indicada en el inciso 8.4.1.1, F_R es un factor de reducción igual a 0.6 y las otras literales tienen el significado indicado en la figura 8.3.

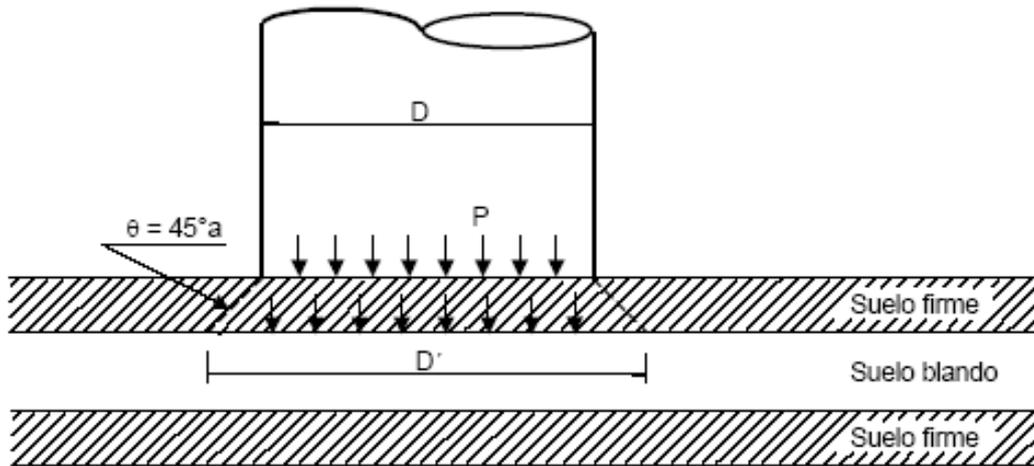


Fig. 8.3 Tanque desplantado sobre un estrato de material blando.

8.4.2 Asentamientos Elásticos.

Se deben estimar los asentamientos inducidos inmediatamente al llenar el tanque, recurriendo a la teoría de la elasticidad. Si el subsuelo puede considerarse homogéneo e isótropo se deben emplear las fórmulas siguientes:

a) Asentamientos en el centro del tanque.

$$\zeta_c = (1 - \nu^2) \frac{P}{E} D \quad (8.4)$$

b) Asentamiento s en la periferia

$$\delta_p = \frac{2}{\pi} (1 - \nu^2) \frac{P}{E} D \quad (8.5)$$

En que:

P = presión transmitida a la cimentación al encontrarse lleno el tanque.

D = diámetro del tanque.

E y ν = módulo de elasticidad y relación de Poisson del suelo.

8.4.3 Asentamientos por Consolidación.

Se debe estimar la magnitud total y la evolución con el tiempo de los asentamientos por deformación volumétrica del subsuelo siguiendo los procedimientos indicados a continuación:

a) Magnitud total de los asentamientos

En suelos cohesivos, los asentamientos finales se deben calcular a partir de los resultados de pruebas de consolidación unidimensionalⁱⁱⁱ realizada en el laboratorio, por medio de la relación:

$$\Delta H = \int_0^H \frac{\Delta e}{1 + e_0} dz \quad (8.6)$$

donde:

ΔH = asentamiento de un estrato de espesor H.

Δe = variación de la relación de vacíos bajo el incremento de esfuerzo D_p inducido a la profundidad z por la carga superficial, párrafo 1–2 estimada a partir de una prueba de consolidación unidimensional realizada con material representativo del existente a esta profundidad.

e_0 = relación de vacíos inicial a la profundidad z.

Una interpretación gráfica de la ecuación (8.6) se presenta en la figura 8.4. Los incrementos de presión Δp inducidos por la carga superficial se deben calcular con la ayuda del diagrama de Newmark cuyo modo de empleo se describe en la figura 8.5.

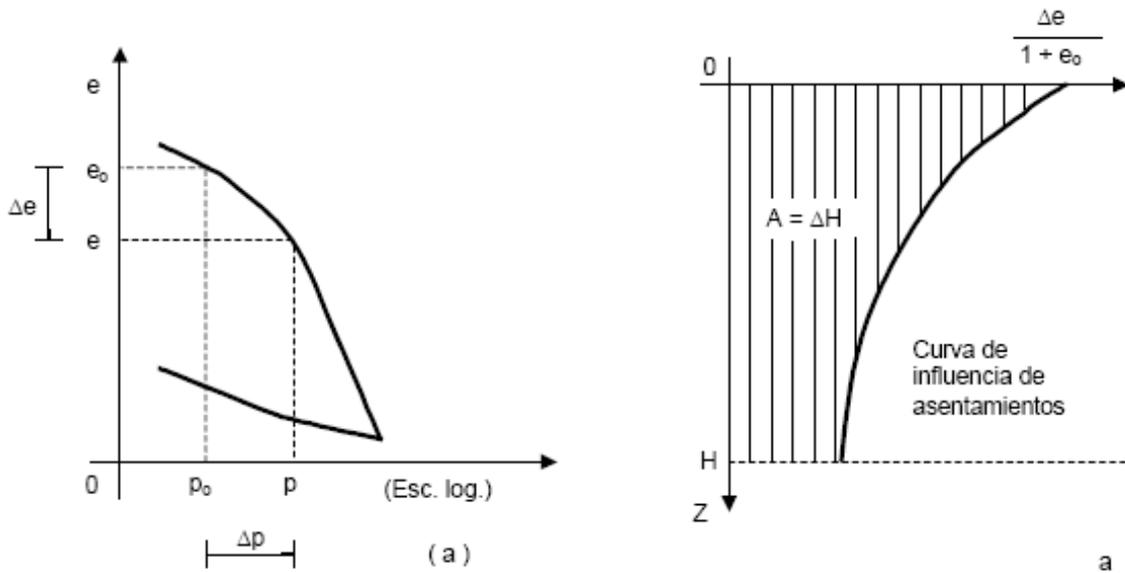
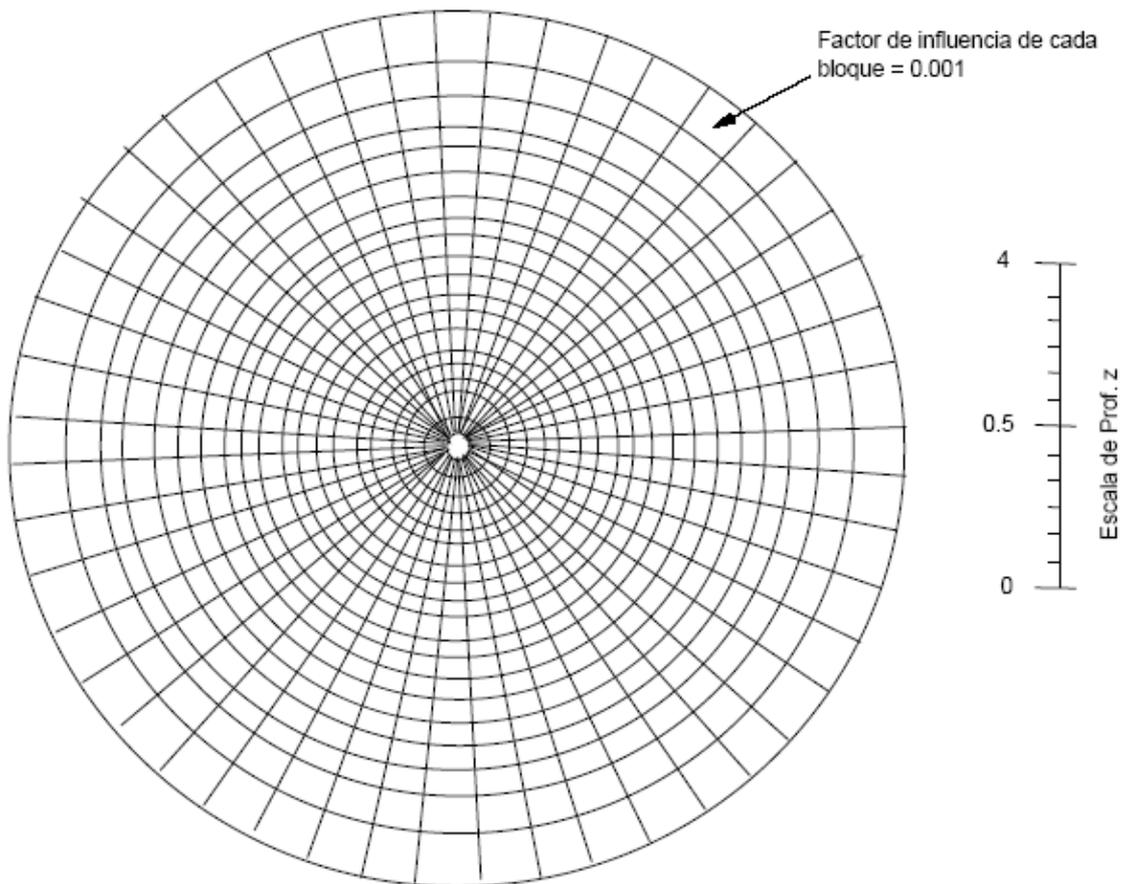


Fig. 8.4 Cálculo de asentamientos por consolidación.



Dibújese el plano de la cimentación a escala, considerando que la longitud AB es igual a la profundidad Z del punto en el cual se quieren calcular los esfuerzos.

Colóquese este plano sobre el diagrama haciendo coincidir en planta el punto en el que se quiere calcular el esfuerzo Δz , con el origen del diagrama.

Cuéntese el número de bloques, N, cubiertos por la cimentación.

$\Delta z = 0.001 NP$, siendo P la carga por unidad de superficie uniformemente distribuida sobre el área de cimentación.

Fig. 8.5 Diagrama de influencia para esfuerzos verticales sobre un plano a una profundidad z.

En suelos no cohesivos el asentamiento se debe calcular en forma similar, a partir de la relación:

$$\Delta H = \int_0^H \frac{1}{C} \log \frac{P}{P_0} dz \quad (8.7)$$

donde:

P_0 = presión efectiva inicial al nivel considerado

P = presión efectiva final al mismo nivel.

C = índice de compresibilidad determinado a partir de la relación empírica $C=15N/P$, siendo N el número de golpes/30 cm en la prueba de penetración estándar^{iv}.

b) Evolución de los asentamientos.

En los suelos cohesivos los asentamientos a diferentes tiempos después de la construcción se deben estimar en primera aproximación recurriendo a la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi^v. Se debe emplear la relación:

$$(\Delta H)_t = (\Delta H)_\infty U(T) \quad (8.8)$$

donde:

$(\Delta H)_t$ = asentamiento en el instante t.

$(\Delta H)_\infty$ = asentamiento final calculado con la ecuación 8.6.

$U(T)$ = grado de consolidación obtenido en la forma indicada en la figura 8.6 a partir del factor tiempo T.

$$T = \text{factor tiempo} = \frac{C_v T}{H^2} B$$

C_v = coeficiente de consolidación determinado en la prueba estándar de consolidación unidimensional.

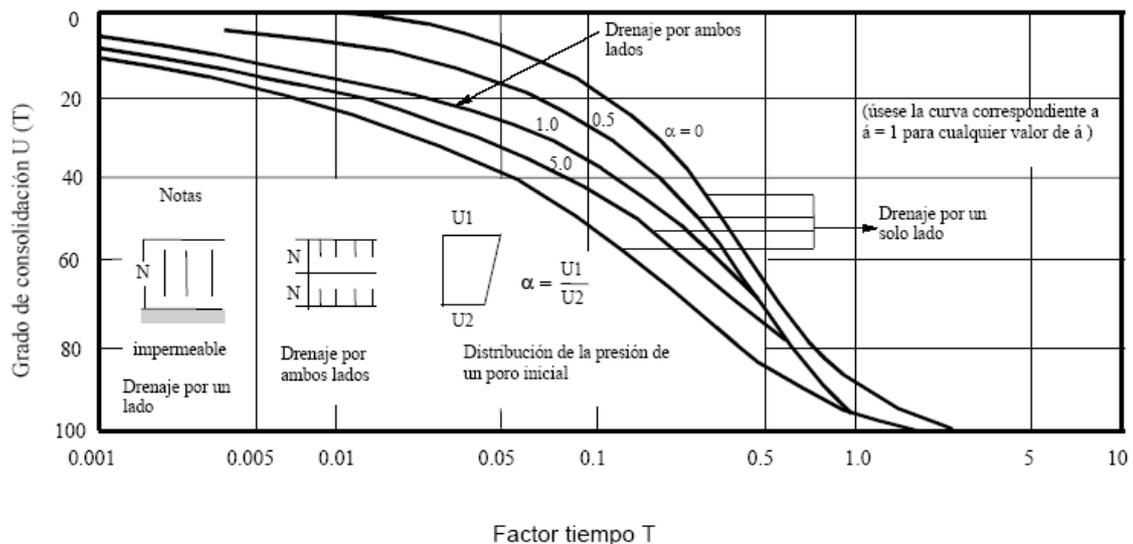


Fig. 8.6 Grado de consolidación primaria en función del factor tiempo, para drenaje vertical

8.5 TIPOS DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES.

Al considerarse adecuado un desplante superficial para un tanque de almacenamiento se debe optar por una de las soluciones definidas a continuación.

8.5.1 Cimentación Sobre un Muro Anular de Concreto Reforzado.

Este tipo de cimentación es recomendable para cualquier tipo de tanques pero en particular para tanques de techo flotante y para tanques de más de 30 metros de diámetro o de 12 metros de altura.

8.5.1.1 Las principales características de este tipo de cimentación se encuentran resumidas en la figura 8.7. El fondo del tanque debe descansar sobre un terraplén cuya altura se debe fijar en función de la magnitud de los asentamientos totales esperados y de la posibilidad de inundación de la zona; en ningún caso esta altura debe ser inferior a 30 centímetros sobre el nivel circundante. El terraplén se debe construir después de sustituir el material superficial indeseable por un material libre de materias orgánicas y productos corrosivos, cuyas condiciones de compactación deben cumplir con las especificaciones de la Tabla 3. Los diez centímetros superiores del terraplén deben ser constituidos por arena limpia gruesa, grava o piedra molida, con tamaño de partícula de 1 a 2.5 centímetros.

8.5.1.2 El muro anular de concreto se debe construir con el propósito de repartir la carga concentrada de la pared cilíndrica, facilitar la construcción del tanque, proteger el terraplén durante y después de la construcción y aislar el fondo de la humedad. El muro debe descansar sobre suelo inalterado o compactado y ser dimensionado de tal forma que la presión de contacto en su parte inferior sea aproximadamente igual a la presión actuante en el relleno confinado a la misma profundidad.

Usando este criterio, el ancho se debe calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$b = \frac{100W}{\lambda_t + h(\lambda_t - \lambda_c)} \quad (8.9)$$

donde:

b = ancho del muro, en cm.

H = altura del tanque, en m.

h = altura del muro, en m.

W = peso de la pared lateral de acero y de la fracción de techo soportada por metro lineal, en ton/m.

λ_t = peso volumétrico del fluido, en ton/m³.

λ_m = peso volumétrico del relleno confinado, en ton/ m³.

λ_c = peso volumétrico del concreto reforzado, en ton/ m³.

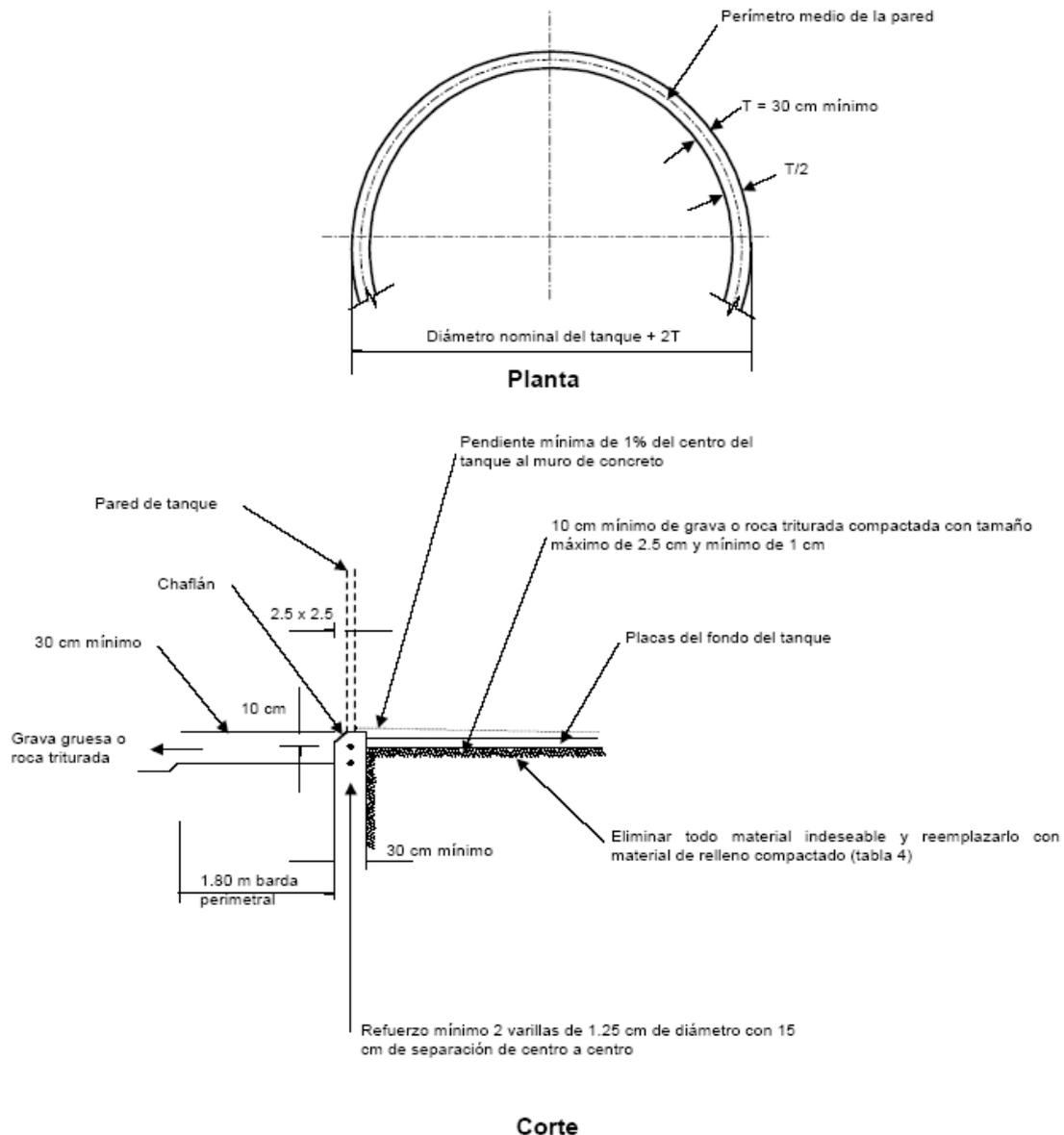


Fig. 8.7 Cimentación sobre muro anular de concreto.

En ningún caso el ancho del muro debe ser inferior a 30 cm.

El muro debe ser reforzado en forma continua a lo largo de toda la circunferencia para resistir la presión horizontal atribuible al material confinado y a la sobrecarga del fluido. La tensión en el muro se debe calcular con la expresión:

$$T = \frac{P_0 D}{2} \quad (8.10)$$

donde:

T = fuerza de tensión en la sección del muro, en ton.

D = diámetro interior, en m.

P_o = presión horizontal atribuible al efecto combinado del relleno y de la sobrecarga del fluido, en ton/m², la cual se calculará en la forma indicada a continuación:

$$P_o = K_a (\gamma_m h + \gamma_f H) \quad (8.11)$$

Donde γ_m , h, γ_f y H fueron definidos anteriormente y K_a es igual a $\tan^2 (45^\circ - \phi/2)$, siendo ϕ el ángulo de fricción interna del material de relleno. En ausencia de información confiable sobre el valor de este ángulo, K_a puede considerarse igual a 0.7.

CONDICIÓN I Terraplenes hasta 3m de altura no sometidos a inundaciones de larga duración.		CONDICIÓN II Terraplenes de mas de 3m de altura, o de menor altura sujetos a periodos largos de inundación.	
Peso volumétrico seco máximo de laboratorio, en kg/m ³ .	Exigencias mínimas de compactación en el terraplén (porcentaje de peso volumétrico seco de laboratorio)	Peso volumétrico seco máximo de laboratorio, en kg/m ³ .	Exigencias mínimas de compactación en el terraplén (porcentaje de peso volumétrico seco de laboratorio)
1 439 o menos	*	1 519 o menos	**
1440 – 1649	100	1520 – 1649	102
1650 – 1919	98	1650 – 1759	100
1760 – 1919	95	1760 – 1919	98
1920 y mas	90	1920 y mas	95

* Los suelos con peso volumétrico Seco máximo menor de 1 440 kg/cm³ se consideran inadecuados y no se deben utilizar

en terraplenes.

** Los suelos con peso volumétrico seco máximo menor de 1520 kg/m³ se consideran inadecuados y no se deben utilizar en terraplenes bajo condición II.

Además de las condiciones indicadas anteriormente los suelos deben tener un límite líquido menor de 65. El índice de plasticidad de los suelos con límite líquido comprendido entre 35 y 65 no debe ser menor del valor que resulta de aplicar la fórmula $I_p = 0.5W_L - 9$, siendo W_L el contenido de agua en el límite líquido.

El máximo peso volumétrico se debe determinar por el ensayo Proctor estándar.

El refuerzo no debe ser inferior al indicado en la figura 8.7. La parte superior del muro anular debe ser lisa y a nivel, con una tolerancia dependiente de más o menos 3 mm por tramo de 10 m a lo largo de la circunferencia. Ningún punto de la circunferencia debe presentar una diferencia de más de 5 mm respecto a la elevación de proyecto.

8.6 ESTABILIZACIÓN DEL SUBSUELO.

Si se toman en cuenta los análisis del párrafo 8.1 que el subsuelo no permite asegurar la estabilidad del tanque o puede ocasionar asentamientos mayores que los permisibles, se debe estudiar la posibilidad de estabilizarlo recurriendo a una de las técnicas enumeradas a continuación.

8.6.1 Remoción del Material Objetable.

Al igual que los materiales superficiales indeseables, los estratos blandos localizados a poca profundidad deben ser removidos y sustituidos por un material compactado, el cual debe satisfacer los requisitos de la Tabla 3.

8.6.2 Compactación de Materiales Suelos *In Situ*.

La compactación de estratos superficiales de materiales arenosos sueltos se debe llevar a cabo recurriendo a métodos tales como vibroflotación o hincado de pilotes cortos. La compactación obtenida debe verificarse en todos los casos por medio de pruebas de penetración estándar.

8.6.3 Preconsolidación del Subsuelo.

Se debe recurrir a preconsolidación del subsuelo en el caso de tanques desplantados sobre un estrato blando de espesor reducido (<8 m). Se debe emplear uno de los métodos definidos a continuación:

- a) Precarga por llenado progresivo del mismo tanque.
- b) Precarga con terraplenes.
- c) Precarga por incremento de los esfuerzos efectivos por abatimiento del nivel de aguas freáticas.
- d) Precarga por vacío superficial bajo membrana.

8.7 CIMENTACIONES PROFUNDAS.

Se debe recurrir a cimentaciones profundas únicamente cuando el suelo natural no permita el cumplimiento de los requisitos del párrafo 8.1 y no sea posible o económico proceder a su estabilización por los métodos definidos en 8.6. El diseño de cimentaciones profundas usuales (sobre pilas o pilotes de punta, de fricción o mixtos) se debe realizar en la forma indicada a continuación:

8.7.1 Análisis de Cimentaciones Profundas.

8.7.1.1 Para la capacidad de un grupo de pilotes, se debe adoptar el menor de los siguientes valores: (1) La suma de las capacidades de carga de los pilotes individuales. (2) La capacidad de carga de un bloque o zapata de geometría igual al envolvente del grupo de pilotes.

8.7.1.1.1 Capacidad de Carga de un Pilote Individual.

La capacidad de carga Q_c de un pilote se debe considerar igual a la suma de la capacidad por punta y de la capacidad por fricción, consideradas en forma separada y afectadas respectivamente por un factor de reducción igual a 0.3 y 0.6:

$$Q_c = 0.3C_p + 0.6C_f \quad (8.12)$$

Para pilotes cuya punta esté localizada en material cohesivo (pilotes de fricción) se debe despreciar la capacidad por punta C_p . Si la punta está apoyada en material granular, el término C_p se debe calcular recurriendo a la siguiente fórmula.

$$C_p = (\psi_m LN'_q)A_p \quad (8.13)$$

donde:

C_p = capacidad por punta, en ton.

γ_m = peso volumétrico medio del suelo localizado arriba del nivel de la punta, en ton/m³.

L = longitud del pilote, en m.

N'_q = factor de capacidad de carga de Meyerhof (Fig. 8.8).

A_p = área de la base del pilote, en m².

Si la única información disponible es la de pruebas de penetración estándar se debe considerar aceptable recurrir a las relaciones empíricas siguientes:

a) $C_p = 40 N A_p$ para pilotes hincados. (8.15)

b) $C_p = 15 N A_p$ para pilotes colados in situ (8.16)

donde:

C_p = capacidad por punta, en ton.

N = número de golpes para penetrar 30 cm en la prueba por realizar al nivel de la punta del pilote.

A_p = área de la base del pilote, en m².

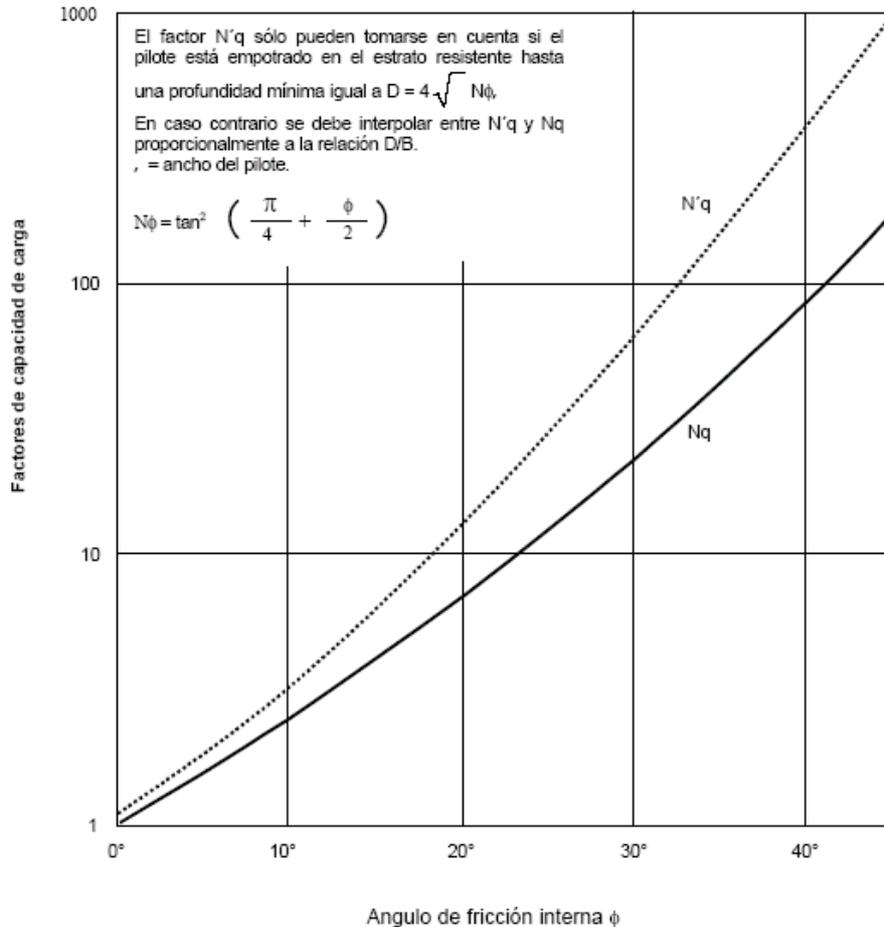


Fig. 8.8 Factor de capacidad de carga de Meyerhof.

La capacidad por fricción C_f se debe calcular, para pilotes colocados en material cohesivo, multiplicando el área lateral del pilote por la adherencia disponible, la cual debe estimarse en forma aproximada a partir de la cohesión en la forma indicada en la Tabla 8.4. La cohesión se debe calcular a partir de la resistencia q_u del material, determinada en prueba de compresión simple o triaxial no consolidada – no drenada como:

$$C = \frac{q_u}{2} \quad (8.17)$$

En el caso de pilotes colocados en material no cohesivo, el término C_f se debe estimar considerando que la adherencia desarrollada tiene una variación lineal desde 0 en la superficie hasta una profundidad z , igual a 20 veces el diámetro del pilote, profundidad en la cual alcanza un máximo igual a:

$$f_z = K_0 \gamma_m z \tan \delta \quad (8.18)$$

donde:

f_z = adherencia disponible a la profundidad z .

γ_m = peso volumétrico medio del suelo localizado arriba del nivel z .

K_0 = coeficiente de presión de reposo cuyo valor podrá considerarse igual a 0.7.

δ = ángulo de fricción pilote-suelo cuyo valor debe considerarse igual a $2/3 f$, siendo f el ángulo de fricción interna del material.

Tipo de pilote	Consistencia del suelo	Cohesión, C 10 ⁻² kg/cm ²	Adherencia, f 10 ⁻² kg/cm ²
Madera y concreto	Muy blanda	0 – 12	0 – 12
	Blanda	12 – 25	12 – 25
	Poco dura	25 – 50	25 – 37
	Dura	50 – 100	37 – 47
	Muy dura	100 – 200	47 – 64
Acero	Muy blanda	0 – 12	0 – 12
	Blanda	12 – 25	12 – 22
	Poco dura	25 – 50	22 – 34
	Dura	50 – 100	34 – 35
	Muy dura	100 – 200	35 – 37

Tabla 8.4 Estimación de la adherencia pilote-suelo disponibles a partir de la cohesión

Si sólo se dispone de la información obtenida en pruebas de penetración estándar, la adherencia debe considerarse constante a lo largo del pilote e igual a:

$$f = 0.2 \text{ N (con máximo de } 10 \text{ ton/m}^2\text{) para pilotes hincados.} \quad (8.19)$$

$$f = 0.6 \text{ N (con máximo de } 4 \text{ ton/ m}^2\text{) para pilotes colados in situ.} \quad (8.20)$$

donde:

f = adherencia en ton/ m².

N = número de golpes para recorrer 30 cm en una prueba de penetración estándar a lo largo del fuste.

8.7.1.1.2 Capacidad de Carga de un Grupo de Pilotes.

La capacidad de carga última de un grupo de pilotes comportándose como bloque monolítico se debe estimar por medio de la relación:

$$Q_g = [(q_d - p_v)A_g + D_f P_g f] F_R + p_v A_g \quad (8.21)$$

donde:

Q_g = capacidad de carga del grupo de pilotes en ton.

q_d = presión admisible al nivel de la punta de los pilotes, en ton/m².

p_v = presión vertical total actuante, antes de la construcción al nivel de la punta de los pilotes, en ton / m².

A_g = área piloteada, en m².

P_g = perímetro del área piloteada en m.

f = adherencia lateral estimada en la forma indicada en el inciso anterior, en ton/m².

D_f = profundidad de desplante, en m.

F_R = factor de reducción igual a 0.6.

8.7.2 Movimientos Verticales

los movimientos verticales inducidos por cimentaciones profundas y su evolución con el tiempo se deben estimar recurriendo a los procedimientos definidos en 8.4.3

8.7.3 Tipos de Cimentaciones Profundas.

Al considerarse adecuada una cimentación profunda para un tanque de almacenamiento se optará por una de las soluciones definidas a continuación.

8.7.3.1 Cimentación Rígida.

Este tipo de cimentación (Fig. 8.9) sólo se debe emplear si así lo requieren las características particulares del tanque y del producto almacenado. Los pilotes empleados deben ser pilotes de punta, cuyas cabezas deben estar unidas por una losa de concreto reforzado, diseñada despreciando el soporte proporcionado por el suelo en su parte inferior.

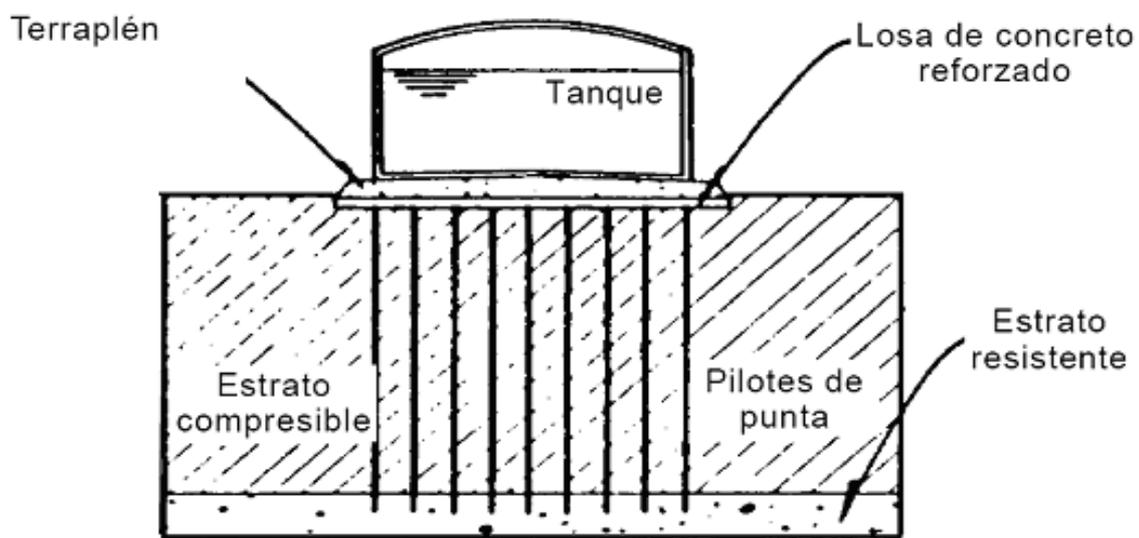


Fig. 8.9 Cimentación rígida sobre pilotes de punta.

8.7.3.2 Cimentación Flexible.

En este caso (Fig. 8.10) las cabezas de los pilotes deben ser rodeadas y cubiertas por una capa de grava o roca triturada compactada, que debe asegurar la transmisión de las cargas a los pilotes por arqueado y debe permitir la absorción de pequeños movimientos diferenciales entre pilotes sin causar daños a la estructura. Este material y el relleno subyacente debe ser confinados por medio de un muro anular en el que debe descansar el tanque. Los detalles del desplante superficial deben ser idénticos a los especificados en 8.5.1.

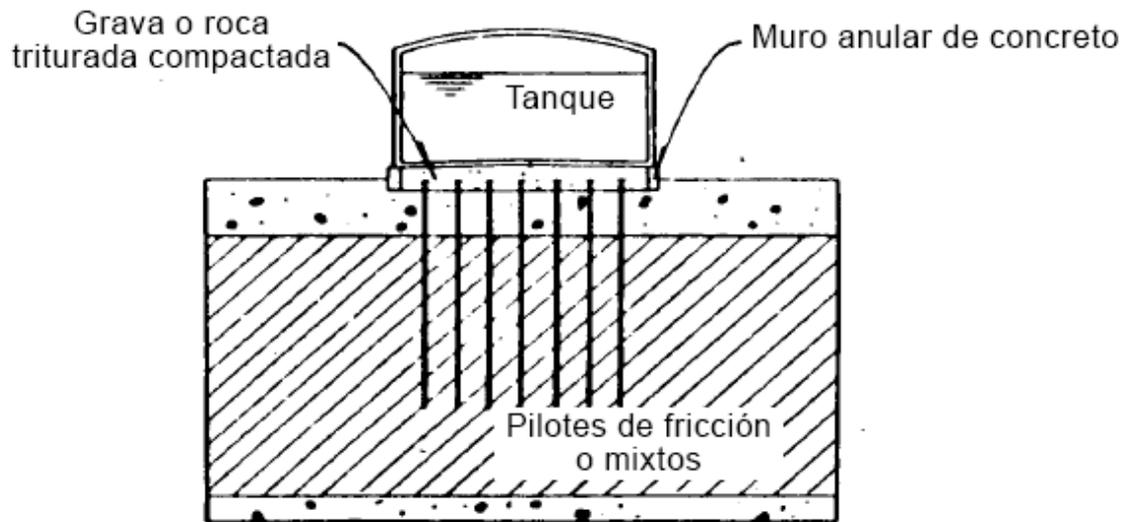


Fig. 8.10. Cimentación flexible sobre pilotes de fricción o mixtos.

8.8 RECOMENDACIONES.

Para prevenir cualquier comportamiento indeseable del tanque, se deben efectuar nivelaciones del perímetro y del área circundante en forma periódica y cada vez que el tanque se encuentre sometido a condiciones de carga excepcionales.

ⁱ Ref. bibliográfica 4.

ⁱⁱ Ref. Bibliográfica 4.

ⁱⁱⁱ Ref. Bibliográfica 15

^{iv} Ref. bibliográfica 4.

^v Ref. Bibliográfica 5.

CAPÍTULO 9. INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE NIVEL EN TANQUES ATMOSFÉRICOS.

9.1 DEFINICIÓN:

Medición de Nivel.

Es la medición de la altura que ocupa un fluido, a partir del fondo del recipiente que lo contiene.

Esta medición se puede hacer de manera directa a través de los métodos convencionales de observación, pero hay condiciones que no permiten la interacción con el proceso, es entonces cuando la medición de nivel se realiza por medio de instrumentos.

9.2 RAZONES PARA MEDIR NIVEL.

9.2.1. Control de Nivel:

Sirve para mantener valores de nivel requeridos en el proceso, para evitar por ejemplo, que una bomba pueda arrancar en vacío, o bien evitar en algún proceso que se derrame el líquido de un tanque de almacenamiento.

9.2.2. Medición de Nivel:

Conocer el valor de nivel que tenemos en los tanques de almacenamiento. Esta variable es una de las cuatro variables fundamentales que son requeridas en los procesos industriales:

- Presión
- Temperatura
- Flujo
- Nivel.

9.2.3 Razón administrativa para medir el nivel:

La información que nos proporcionan los instrumentos observando la variable nivel, nos sirve para conocer la disponibilidad de los productos almacenados para su consumo interno en la empresa; por ejemplo, volumen de agua disponible para una caldera o disponibilidad para venta de producto terminado.

9.3 PRINCIPIOS DE MEDICIÓN.

Los principales métodos de medición son los siguientes

- Mirilla de Vidrio
- Sonda Capacitiva
- Medidor por Radar
- Medidor por Ultrasonido
- Medición de Nivel por Presión Hidrostática

9.3.1 MÉTODOS DIRECTOS

9.3.1.1 Mirilla de Vidrio.

Este dispositivo esta basado en el principio de vasos comunicantes, el cual establece que un líquido mantendrá el mismo nivel en dos recipientes cuando estos se encuentren comunicados por alguna vía (tubería).

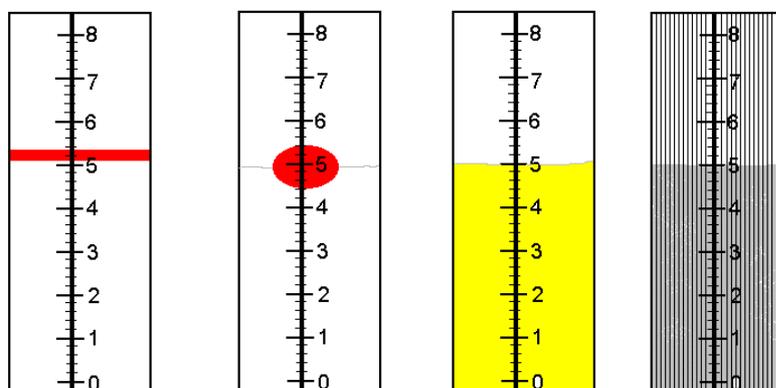


Fig. 9. 1 Distintos tipos de mirillas y formas de marcar la medición.

9.3.1.2 Sonda Capacitiva.

Principio de Operación: La medición de nivel con este principio esta basada en el dispositivo electrónico llamado capacitor, cuya capacidad se mide en faradios. Opera bajo la siguiente formula:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (9.1)$$

donde C = Capacidad en faradios del capacitor

Q = Carga eléctrica en coulombs

V = Voltaje en volts

Un capacitor está constituido por dos placas conductoras paralelas y separadas por un aislamiento.

Las sustancias pueden ser conductoras o no-conductoras. Las sustancias no-conductoras tienden a tener constantes bajas dieléctricas y las sustancias conductoras tienden a tener constantes altas dieléctricas.

La conductividad es la capacidad que tiene una sustancia para conducir la energía eléctrica. Como se muestra en la figura:

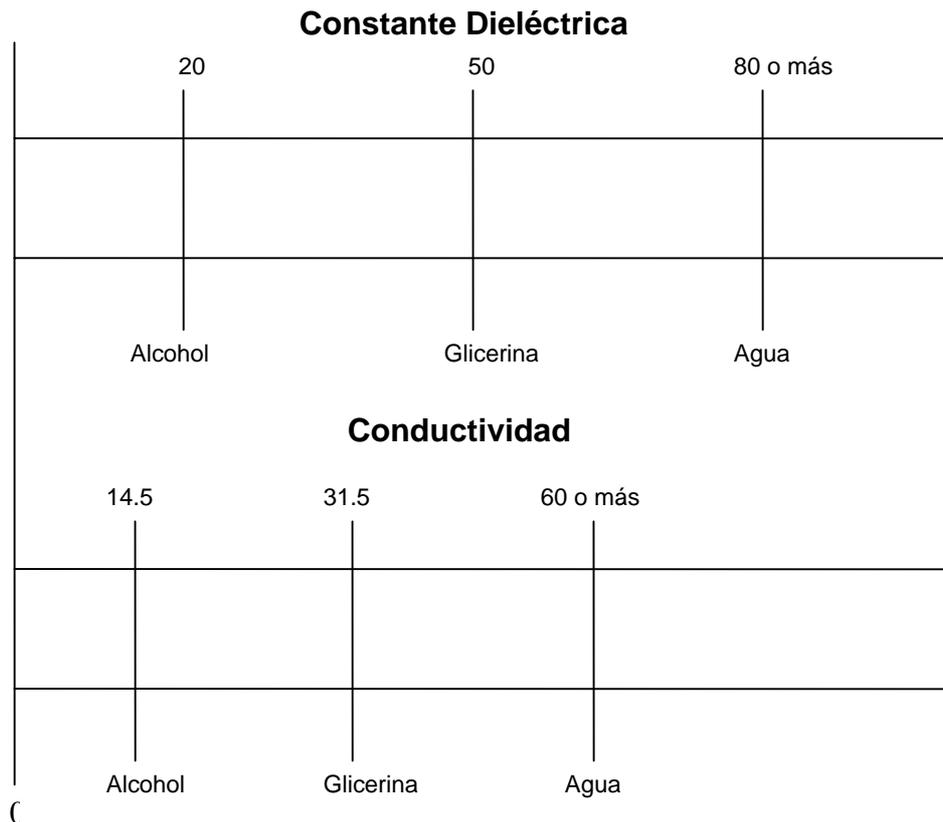


Fig. 9.2 Constantes dieléctricas y conductividades de algunos líquidos.

9.3.1.2.1 Medición de nivel de sustancias no-conductivas

La estructura del capacitor cambia con las variaciones de nivel. Una placa es el probador (sensor) y la otra placa es la pared del tanque. No cambia la distancia entre las placas. Lo que cambia con la variación de nivel es la constante dieléctrica. El aire tiene una constante dieléctrica igual a 1, y al cambiar el nivel la constante dieléctrica es mayor que 1. El instrumento que está detectando el nivel proporciona una salida lineal relacionada con la capacitancia media. Esta salida es detectada en un receptor graduado en metros, o bien en otra unidad de longitud.

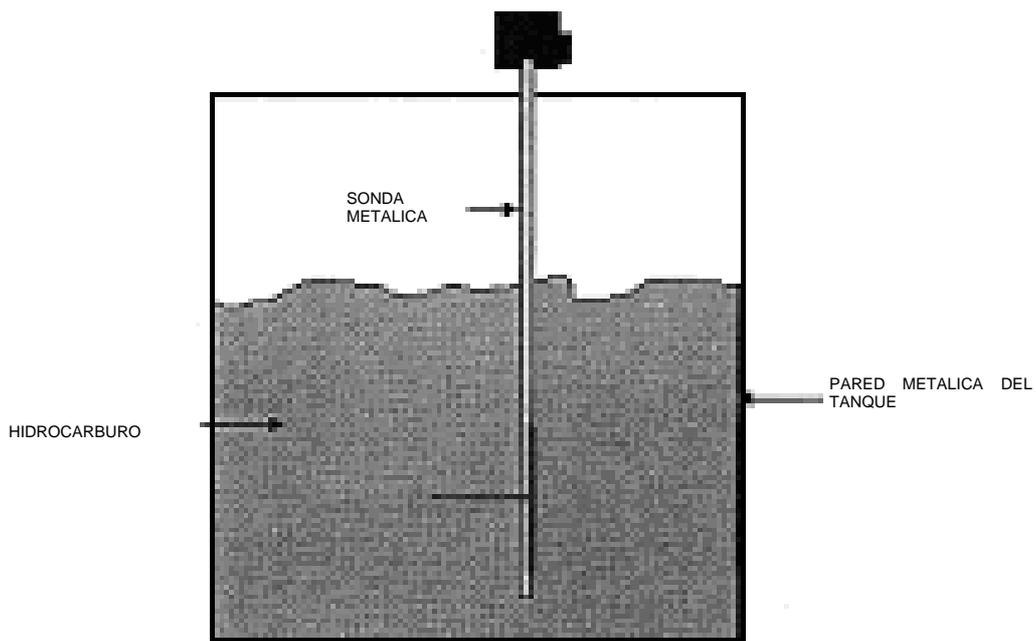


Fig. 9.3 Arreglo del capacitor en sustancias no-conductivas.

9.3.1.2.2 Medición de nivel de sustancias conductivas.

En estos casos las sustancias entre las dos placas es un aislamiento.

Un aislamiento de teflón alrededor del sensor hace que se forme el capacitor como se muestra en la figura.

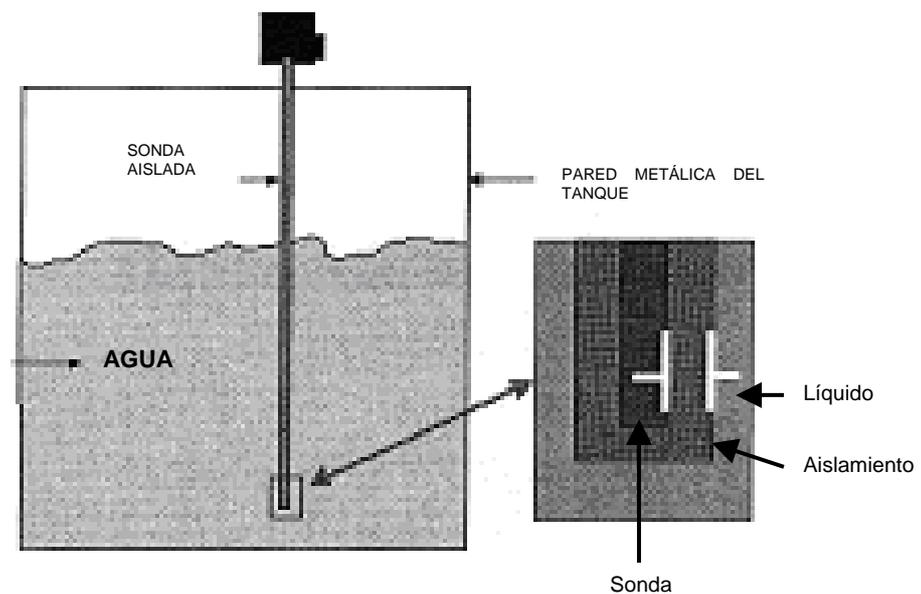


Fig. 9. 4 Arreglo del capacitor en sustancias conductivas.

9.3.1.3 Medidor de Radar.

Principio de operación: Una señal de radar se emite vía una antena, se refleja en la superficie del producto y se recibe después de un tiempo t . El principio usado por el radar es el de frecuencia modulada de onda continua (FMCW, por sus siglas en inglés).

El radar transmite una señal de alta frecuencia que aumenta linealmente durante la fase de medición (llamada barrido de la frecuencia). Se emite la señal, la que es reflejada en la superficie de medición y recibida con un tiempo de retraso, t . Además la diferencia de frecuencia Δf se calcula a partir de la frecuencia de señal transmitida y la frecuencia de señal recibida. La diferencia es directamente proporcional a la distancia es decir que una diferencia grande de la frecuencia corresponde a una distancia grande y viceversa. La diferencia de la frecuencia se transforma vía una transformación de Fourier (FFT) en un espectro de frecuencia y entonces se calcula la distancia a partir del espectro. El nivel resulta de la diferencia entre la altura del tanque y la distancia medida.

La exactitud que mide de un radar de FMCW se determina de las linealidades de los barridos de frecuencia y de su reproductibilidad. La corrección de las linealidades se deduce por medio de la medida de referencia del oscilador. La no-linealidad se corrige hasta el 98%.

9.3.1.4 Medidor Ultrasónico.

Principio de Operación: Los transmisores ultrasónicos utilizan pulsos de un sonido de alta frecuencia para determinar la distancia a un blanco, tal como un líquido o un sólido de proceso. El transmisor mide el tiempo que le toma al pulso de sonido viajar hasta el blanco y regresar como un eco. La distancia es entonces calculada empleando el tiempo medido y la velocidad del sonido en la atmósfera del tanque.

9.3.1.4.1 Transmisión de la Señal.

Es crucial que un transmisor ultrasónico sea capaz de recibir un eco detectable a partir de la superficie de proceso. Esto puede ser inhibido por muchas condiciones de proceso como espuma superficial, una atmósfera sucia o grandes concentraciones de vapor de agua.

Los sonidos de baja frecuencia penetran los ambientes difíciles del proceso mejor que los sonidos de alta frecuencia.

9.3.1.4.2 Reconocimiento del Eco.

Cada objeto dentro de la viga del transmisor de una unidad ultrasónica regresa un eco. El truco es decidir qué eco está correcto. La localización de la instalación es crítica para el adecuado reconocimiento del eco. El transductor se debe montar siempre con una trayectoria clara al proceso que es medido.

Las intrusiones físicas en esta trayectoria crearán ecos falsos que deben ser procesados. Existen consideraciones de montaje basadas en la geometría del recipiente, tal como techos abovedados o silos de cono remachados.

Una vez que se elige la mejor localización de la instalación, puede haber algunos ecos falsos. Algunos transmisores utilizan métodos estáticos para dirigir éstos, tales como la colocación de un punto en blanco donde ocurren los ecos falsos, o almacenar un perfil acústico del tanque. Estos métodos requieren el vaciado del recipiente y no pueden explicar cambios en las condiciones del proceso.

9.4 MEDICIÓN DE NIVEL POR PRESIÓN HIDROSTÁTICA.

La presión hidrostática es la parte de la presión debida al peso de un fluido en reposo. Un fluido pesa y ejerce presión sobre las paredes y sobre el fondo del recipiente que lo contiene. Esta presión provoca, en fluidos en reposo, una

fuerza perpendicular a las paredes del recipiente sin importar la orientación que adopten las caras.

Esta presión depende de la densidad del líquido en cuestión y de la altura a la que este sumergido el cuerpo, en nuestro caso el fondo del tanque, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \gamma h \quad (9.2)$$

donde P = Presión hidrostática en kg/cm²

γ = Peso específico en gr/cm³

h = Altura en m

Sí el fluido es agua, tiene un peso específico igual a $\gamma = 1 \frac{gr}{cm^3}$ y la altura fuera de 10m.

$$P = 1 \frac{gr}{cm^3} * 10m * \frac{kg}{1000gr} * \frac{100cm}{m}$$

$$P = 1 \frac{kg}{cm^2}$$

h (m)	P (kg/cm ²)
0,1	0,01
1	0.1
5	0.5
10	1
20	2
30	3
40	4
50	5

Tabla 9.1. Variación de la presión respecto a la altura del líquido contenido en el tanque.

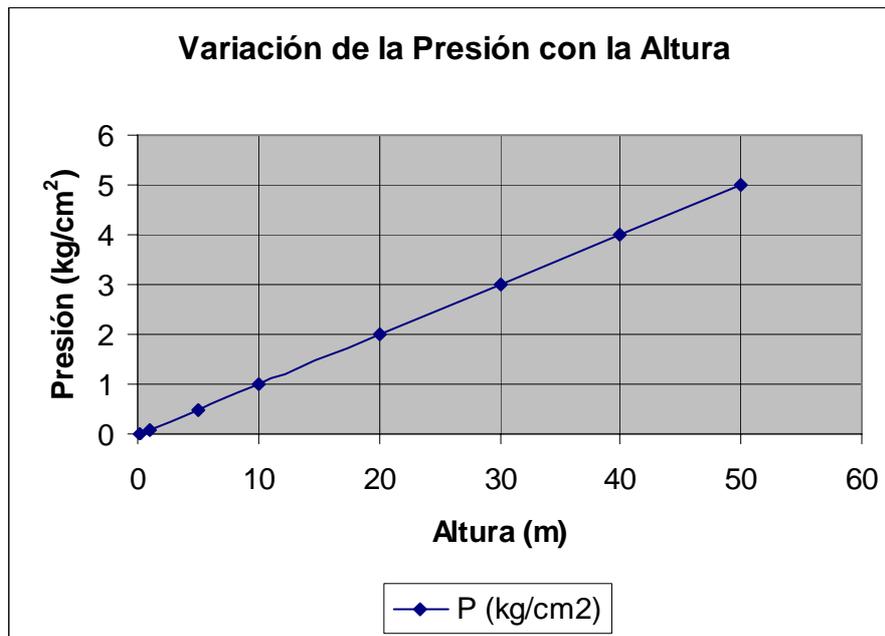


Fig. 9.5 Gráfica representativa de la variación de presión respecto a la altura del líquido contenido en el tanque.

De este modo, es posible conocer el nivel del tanque. Se puede emplear la altura despejada de la ecuación 9.2 y sustituirla en la ecuación del código API 650:

$$V = 0.785D^2H \quad (9.3a)$$

donde V = Volumen nominal actual del tanque en m³

D = Diámetro del tanque en m

H = Altura del líquido contenido en el tanque en m

Que se obtiene de

$$A = \pi r^2 h = \frac{\pi D^2}{4}$$

donde A = Área requerida en m²

D = Diámetro del tanque en m

h = Altura del líquido contenido en el tanque en m

r = Radio del tanque en m

Las ecuaciones anteriores tienen las siguientes restricciones:

- ◆ Aplican sólo para tanques verticales de fondo plano.
- ◆ El espesor máximo de componentes es 12.5mm (1/2 in).
- ◆ La eficiencia de la junta es igual a 0.85 y la tensión permisible 145MPa.
- ◆ La densidad relativa del líquido es 1.
- ◆ No hay corrosión permitida.

CAPÍTULO 10. EJEMPLO ILUSTRATIVO DEL CÁLCULO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO.
10.1 PLANTEAMIENTO.

Con el fin de hacer más claro y específico lo expuesto en los capítulos anteriores, se calculará un tanque de almacenamiento para agua cruda. Dicho tanque operará a presión atmosférica y temperatura ambiente.

10.1.1 Datos Generales de diseño para calcular los espesores del tanque.

Producto	Agua cruda	
Capacidad de diseño	27,612.4 bls	4,390,000 lts
Capacidad nominal	30,000 bls	4,769,100 lts
Gravedad específica (G)	1,000 kg/m ³	62.34 lb/ft ³
Diámetro interior (D)	22.352 m	73.33 ft
Altura (H)	12.192 m	40.00 ft
Presión de diseño	Hidrostática	
Material cuerpo y tapas	ASTM A-283 Gr. C	
Esfuerzo máximo permisible	16,345,421.85 kg/m ²	23,200 lb/pulg ²
Corrosión permisible (CP)	3.20 mm	0.126 pulg (1/8")
Velocidad de viento	150 km/h	93.75 Millas/h
Temperatura de diseño	25°C	77°F
Presión de prueba hidrostática	Lleno de agua	
Esfuerzo permisible de diseño (Sd)	137 MPa	20,000 psi
Esfuerzo permisible de diseño por la prueba hidrostática (St)	154 MPa	22,500 psi
Fabricación	Según API 650 10 ^a ed. (2001) y API 650 11 ^a ed. (2007).	

10.2 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LAS PLACAS DEL CUERPO (ENVOLVENTE) DEL TANQUE.

☛ Para esto, usaremos la norma API 650 10ª ed. 2001, (punto 3.6.6); la cual indica que se deben realizar dos cálculos, uno por el mismo cálculo del espesor de la pared del cuerpo del tanque, el otro en base a la prueba hidrostática; lo anterior nos dará por resultado un espesor, y el más grueso será el que usemos sólo si el espesor es mayor al que indica la norma, según el punto 3.6.1.1; ya que si resulta menor, emplearemos el indicado en la norma.

☛ Se trabajará en sistema Ingles, y entre paréntesis se colocará su equivalente en unidades del sistema Internacional (S.I.).

10.2.1 Cálculo del Espesor de las Placas Anillo del Cuerpo por Diseño.

$$td = \frac{2.6D(H-1)G}{S_d} + CP$$

$$td = \frac{2.6 * 73.33 * (40 - 1) * 62.34}{20000 * 144} + 0.126 = 0.287 \text{ pulg } (7.29\text{mm})$$

Lo cual indica que esta dentro de norma, ya que el mínimo necesario para este tanque es un espesor de placa de $\frac{1}{4}$ " (6.35mm).

10.2.2 Cálculo del Espesor por Prueba Hidrostática.

$$tt = \frac{2.6D(H-1)}{S_t}$$

$$tt = \frac{2.6 * 73.33 * (40 - 1)}{22500 * 144} = 0.002 \text{ pulg } (0.058\text{mm}), \text{ lo cual está fuera de norma.}$$

Basándonos en estos resultados, los cálculos de los anillos subsecuentes, se deben realizar empleando el espesor por diseño (S_d).

Las dimensiones de las placas de 5/16", son 3" x 8".

$$td = \frac{2.6 * 73.33 * (40 - 1) * 62.34}{20000 * 144} + 0.126 = 0.287 \text{ pulg } (7.29\text{mm}) \text{ usar placa de } 5/16''$$

(7.9mm)

$$td = \frac{2.6 * 73.33 * (32 - 1) * 62.34}{20000 * 144} + 0.126 = 0.254 \text{ pulg } (6.45\text{mm}) \text{ usar placa de } 5/16''$$

(7.9mm)

$$td = \frac{2.6 * 73.33 * (24 - 1) * 62.34}{20000 * 144} + 0.126 = 0.095 \text{ pulg } (2.41\text{mm}) \text{ usar placa de } 1/4''$$

(6.35mm)

$$td = \frac{2.6 * 73.33 * (16 - 1) * 62.34}{20000 * 144} + 0.126 = 0.062 \text{ pulg } (1.57\text{mm}) \text{ usar placa de } 1/4''$$

(6.35mm)

$$td = \frac{2.6 * 73.33 * (8 - 1) * 62.34}{20000 * 144} + 0.126 = 0.028 \text{ pulg } (0.73\text{mm}) \text{ usar placa de } 1/4''$$

(6.35mm)

El número total de anillos a emplear serán 5.

10.3 REVISIÓN DEL CUERPO POR ESTABILIDAD CONTRA ONDULACIONES (BUCKLING) DEBIDAS A LA FUERZA DEL VIENTO. SEGÚN PÁRRAFO NO. 5.9.7 DEL API 650 11ª ED.

$$H_1 = 600,000 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 * \left(\frac{120}{V}\right)^2}$$

Para calcular este espesor se toma como el espesor corroído del cuerpo y la norma indica que este puede variar en 1/16".

$$t = \frac{1}{4} - \frac{1}{16} = \frac{3}{16} = 0.1875 \text{ pulg} = 4.7625 \text{ mm}$$

entonces,

$$H_1 = 600,000 * 0.1875 * \sqrt{\left(\frac{0.1875}{73.33}\right)^3} * \left(\frac{120}{93.75}\right)^2 = 30.50 \text{ ft}$$

$H_1 = 40 \text{ ft} > 30.50 \text{ ft}$. Por lo tanto no requiere refuerzos en el cuerpo.

10.4 CÁLCULO DEL ESPESOR PARA LA PLACA DEL FONDO DEL TANQUE.

Según el punto 3.4.1 del API 650 10ª ed., el espesor mínimo será de $\frac{1}{4}$ " (0.25 pulg).

$$t_f = t + CP$$

$$t_f = 0.25 \text{ pulg} + 0.126 \text{ pulg}$$

$$t_f = 0.376 \text{ pulg} = 9.55 \text{ mm}$$

por lo que la placa a utilizar será de $\frac{7}{16}$ ".

10.5 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA TAPA DEL TANQUE.

Según el punto 3.10.5 del API 650 10ª ed., el espesor mínimo será de $\frac{3}{16}$ " (0.1875 pulg).

$$t_f = t + CP$$

$$t_f = 0.1875 \text{ pulg} + 0.126 \text{ pulg}$$

$$t_f = 0.3135 \text{ pulg} = 7.96 \text{ mm}$$

por lo que la placa a utilizar será de $\frac{3}{8}$ ".

10.6 REVISIÓN DE LA JUNTA FRÁGIL CUERPO-TAPA.

Debe Cumplir con los siguientes requisitos:

- En la unión entre la placa de la corona $< 3/16''$
- La pendiente no deberá exceder $1/16''$
- El área de la sección transversal cuerpo-tapa es:

$$A = \frac{D_{LS}}{201000 \tan \theta}$$

@ DLS = Área de la placa x Peso de la placa x # de placas.

Las dimensiones de todas las placas empleadas son 3" x 8". (ref. bibliográfica No. 18)

Se usan 20 placas de $5/16''$ con un peso de 62.25 kg/m^2 cada una

Se usan 30 placas de $1/4''$ con un peso de 49.80 kg/m^2 cada una

Se usan 10 placas de $7/16''$ con un peso de 87.15 kg/m^2 cada una

Se usan 10 placas de $3/8''$ con un peso de 74.70 kg/m^2 cada una

DLS = 9,720 kg

10.6.1 Anillo de Coronamiento, del Punto 5.1.5.9 de API 11^a ed.

Tomando en cuenta el diámetro del tanque de 73.33ft (22.352m), el ángulo será de

3" x 3" x 3/8 pulg (76 x 76 x 9.5 mm)

10.7 CÁLCULO DE ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL TECHO.

Número de polígonos 1:columna central.

$$\text{Número de largueros: } n = \frac{\pi D}{2\pi} = \frac{D}{2} = \frac{73.33}{2} = 36.66$$

Emplear $n = 40$ largueros.

10.7.1 Espaciamiento Exterior entre los Largueros

$$A_E = \frac{D\pi}{n} = \frac{73.33 * 3.1416}{40} = 5.76 \text{ ft}$$

10.7.2 Espaciamiento Interior entre los Largueros

$$A_I = \frac{D_{EC}\pi}{n}$$

$$D_{EC} = \frac{4'' * 360}{\alpha n} + 10''$$

$$\alpha = \frac{360}{n} = \frac{360}{40} = 9^\circ$$

$$D_{EC} = \frac{4 * 360}{9 * 40} + 10 = 14 \text{ pulgadas}$$

A partir de este punto se puede hacer el análisis mecánico del tanque, pero por no ser del alcance de esta tesis no se muestra.

CAPITULO 11. RECOMENDACIONES PARA EL MANTENIMIENTO DE TANQUES ATMOSFÉRICOS.

11.1. ALCANCE.

Cuando los resultados de una inspección del tanque demuestran que un cambio ha ocurrido de la condición física original de ese tanque, se debe realizar una evaluación para determinar la conveniencia de la continuidad de su uso.

La siguiente lista de factores se puede emplear para la consideración de algunas situaciones que se pueden presentar en el tanque, no es un sustituto para el análisis y el juicio de la ingeniería requeridos para cada situación:

- a. Corrosión interna debido al producto almacenado o a los fondos del agua.
- b. Corrosión externa debido a la exposición ambiental.
- c. Niveles de tensión y niveles permisibles de tensión.
- d. Características del producto almacenado tales como densidad relativa, temperatura, y corrosividad.
- e. Temperaturas del diseño del metal en la localización del servicio del tanque.
- f. Carga viva de la azotea externa, viento, y cargamentos sísmicos.
- g. Cimentación del tanque, suelo, y condiciones del montaje.
- h. Análisis químico y características mecánicas de los materiales de construcción.
- i. Distorsiones del tanque existente.
- j. Condiciones de funcionamiento tales como frecuencia de llenado/vaciado.

11.2 EVALUACIÓN DEL TECHO DEL TANQUE.

11.2.1 General.

Las placas corroídas del techo en un espesor medio menor de 0.09 pulg. en cualquier área de 100 pulg²., o placas del techo con agujeros a través de la placa principal del techo deben ser reparadas o reemplazadas.

11.2.2 Techos Soportados.

Los miembros de soporte del techo (vigas, travesaños, soportes, columnas y bases) deben ser inspeccionados para su validez por un método aceptable por el inspector responsable; distorsiones (como columnas fuera de eje – inclinaciones-), miembros corroídos o dañados deben ser evaluados, reparados o reemplazados si es necesario.

Se debe prestar particular atención a la posibilidad de corrosión severa interna en el alma de las columnas (esta corrosión puede no ser evidente en la inspección visual externa).

11.2.3 Cambio de Servicio.

11.2.3.1 Presión Interna.

Vea los requisitos que se deben cubrir para la evaluación, y alteraciones subsecuentes en el techo del tanque y en la junta del techo-envolvente, en el estándar que aplique a su tanque (por ejemplo, API 650, apéndice F).

11.2.3.2. Presión Externa.

Sí aplica, la estructura de soporte del techo, y la junta del techo-envolvente, deben ser evaluados para los efectos de un diseño de vacío parcial. Los requisitos se pueden consultar, por ejemplo, en el código API 620.

11.2.3.3 Operación a Temperatura Elevada.

Todos los requisitos del código API 650, apéndice M, deben ser considerados antes de cambiar el servicio de operación de un tanque atmosférico a temperaturas sobre 200°F (93.5°C).

11.2.3.4 Operación a Menor Temperatura.

Al igual que en el punto anterior, se deben prever las consecuencias de modificar la temperatura de operación por una más baja.

11.3 EVALUACIÓN DE LA PARED ENVOLVENTE DEL TANQUE.

11.3.1 General.

Los defectos, deterioración, u otras condiciones (por ejemplo, cambio de servicio, relocalización, corrosiones mayores que la permisible original) que pueden afectar negativamente el funcionamiento o la integridad estructural del envoltorio del tanque, deben evaluarse para determinar la conveniencia del servicio propuesto.

La corrosión del envoltorio ocurre en muchas formas y diversos grados de severidad, y puede resultar generalmente en una pérdida de metal (uniformidad) a lo largo del área de superficie o en áreas localizadas. Pueden ocurrir también picaduras.

Cada caso debe ser tratado como una situación única y conducir una inspección para determinar la naturaleza y la extensión de la corrosión previa al desarrollo de los procedimientos de reparación.

Se pueden consultar algunos métodos de inspección en el código API 653, sección 4.

11.3.2 Distorsión.

Las distorsiones del envoltente del tanque incluyen, fuera de redondez, áreas “engrapadas”, puntos planos y empalmes soldados con autógena.

Estas distorsiones del envoltente pueden ser causadas por muchas condiciones tales como establecimiento de la cimentación, presión excesiva o por debajo de la de diseño/operación, viento fuerte, fabricación fuera de especificación del envoltente, o las técnicas de la reparación, y así sucesivamente.

11.4 EVALUACIÓN DEL FONDO DEL TANQUE.

11.4.1 General.

Las estrategias para la inspección del fondo del tanque, deben proporcionar datos convenientes, que al utilizarlos en los procedimientos de evaluación de la integridad del elemento, prevenga la fuga de líquidos y subsecuentemente un daño al personal o daño ambiental.

11.4.2 Causas de Falla del Fondo.

En la siguiente lista se dan algunas causas de filtrado o falla del fondo del tanque, que pueden ser consideradas en la decisión de reparar o reemplazar el fondo de un tanque.

- a. Picaduras internas por el servicio.
- b. Corrosión de los empalmes de la autógena.
- c. Agrietamiento común de la autógena.
- d. Tensiones puestas en las placas inferiores por las cargas de ayuda del techo y el establecimiento del envoltente.
- e. Corrosión de la superficie inferior (normalmente en la forma de picaduras).
- f. Drenaje inadecuado dando por resultado agua superficial que fluye bajo fondo del tanque.

- g. La carencia de un anillo anular de la placa cuando está requerido.
- h. Montaje desigual que da lugar a altas tensiones localizadas en las placas inferiores.
- i. Las columnas de ayuda del techo u otras ayudas se soldaron con autógena al fondo del tanque donde no se tuvo en cuenta el movimiento natural de estas.
- j. Los cojines de la cimentación de la grava fue inadecuada al llenar los vacíos superficiales.
- k. Terraplén no-homogéneo bajo el fondo del tanque (por ejemplo, un terrón de arcilla en un cojín de la cimentación de la arena).
- l. Colectores de aceite inadecuadamente apoyados.

11.4.3 Protección Catódica del Fondo del Tanque.

Una selección de los sistemas de protección catódica para la protección del fondo de un tanque, puede ser consultada en el código API RP 651.

11.4.4 Protección Interna del Fondo del Tanque.

Las guarniciones aplicadas para las superficies internas de los fondos del tanque son cubiertas por el código API RP 652.

11.4.5 Detección de Fugas Inferiores.

Sí se va a sustituir el fondo de un tanque, se debe considerar la instalación de un sistema de detección de fugas, que acanale cualquier fuga de líquido en el fondo del tanque hacia un punto donde pueda ser fácilmente observada.

ANEXO A.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A	Área requerida en pulgadas cuadradas
A	Área resistente a la fuerza de compresión
A_p	Área de la base del pilote
A_g	Área piloteada
b	Ancho del muro
C	Cohesión del material
C	Índice de compresibilidad
C	Capacidad eléctrica
CP	Corrosión permitida en pulgadas
C_f	Capacidad por fricción
C_p	Capacidad por punta
C_v	Coefficiente de consolidación
D	Diámetro del tanque o del envolvente en pies
D_f	Profundidad de desplante
D_L	Cargas muertas
E	Módulo de elasticidad
E	Eficiencia de la junta
e	Eficiencia de la junta
F	Fuerza horizontal desbalanceada en la junta
F	Esfuerzo nominal de soldadura
F_a	Esfuerzo a la compresión permisible
FR	Factor de reducción
F_Y	Esfuerzo de cedencia del material
f	Ángulo de fricción interna del material de cimentación
f	Adherencia, adherencia lateral
f_z	Adherencia disponible a la profundidad z
f	Estrés de tensión permisible del aluminio en psi
f	Estrés permisible por los anillos de dureza en psi
G	Densidad relativa del líquido a contener en el tanque
g	Constante gravitacional
H	Altura del tanque
H	Fuerza de discontinuidad
H	Altura del líquido en pies
H	Distancia o altura entre los endurecedores en pies
h	Altura del muro
H_1	Altura de la primera dirección en pulgadas
h_u	Altura superior del envolvente en pulgadas
K_o	Coefficiente de presión de reposo
L	Longitud de la placa anular en pulgadas
L	Longitud efectiva en pulgadas
L	Longitud libre, longitud libre de columna
L	Longitud del pilote
L_r	Carga viva mínima en el techo

M	Momento de torsión
N	Número de bloques cubiertos por la cimentación
N	Número de golpes de la prueba de penetración
N'_q	Factor de capacidad de carga de Meyerhof
(N'_c) y (N'_γ)	factores de capacidad de carga
N_θ	Fuerza de la argolla en lb/pulg
$N_{\theta s}$	Fuerza circunferencial en el envolvente (lb/pulg)
N_ϕ	Suma de fuerzas en una sección transversal dada
N_ϕ	Fuerza meridional en lb/pulg
$N_{\phi r}$	Fuerza meridional en el techo o cono (lb/pulg)
P, P_{max}	Presión máxima
P	Presión interna o de diseño en pulgadas de agua (en Fig. 2.3)
P	Presión del viento en psf
P	Cargas, viva o muerta en psf
P	Carga por unidad de superficie
P	Suma de las cargas, viva o muerta en psf
P	Presión hidrostática
P_0	Presión efectiva inicial o final a nivel considerado de cimentación
P_o	Presión horizontal
P_a	Presión absoluta
P_{cr}	Presión de vacío
P_e	Presión externa de diseño
P_f	Presión de falla en pulgadas de agua
P_g	Perímetro del área piloteada
psf	Libras por pie
p_v	Presión vertical total actuante
Q	Fuerza total en la región del anillo en libras
Q	Carga eléctrica
Q_c	Capacidad de carga de un pilote
Q_g	Capacidad de carga del grupo de pilotes
q_d	Presión admisible al nivel de la punta de los pilotes
q_d	Presión máxima admisible
q_u	Resistencia del material
R	Radio del tanque en la junta en pulgadas
R	Radio del techo en pies
R	Radio esférico del domo del techo en pies
r	Radio del envolvente en pulgadas
r	Radio de gravitación en pulgadas
r	Radio de giro que gobierna
r	Radio del área circular de desplante
rc	Radio mínimo de giro de la columna
S	Estrés permitido en psi
S	Carga hidrostática
S_d	Esfuerzo máximo permisible de diseño del material seleccionado
S_i	Resistencia al corte en la base de la dovela i
T	La mayor de la combinación de las cargas
T	Factor tiempo
T	Fuerza de tensión en la sección del muro
T_i	Componente tangencial del peso de la dovela i

t	Espesor requerido (de la placa del techo, envolvente o fondo).en pulgadas
t	Tiempo, tiempo de retraso
t _b	Espesor de la placa anular en pulgadas
t _h	Espesor de la placa del techo en pulgadas
t _L	Espesor del envolvente debajo en pulgadas
t _u	Espesor del envolvente encima en pulgadas
t ₁	Espesor de la primera dirección en pulgadas
t ₂	Espesor de la segunda dirección en pulgadas
t _{2a}	Espesor de la segunda dirección calculada a partir de la ecuación de dirección superior en pulgadas
U(T)	Grado de consolidación
V	Fuerza vertical debida a la junta del techo-envolvente (Fig. 2.3)
V	Velocidad del viento
V	Voltaje eléctrico
W	Peso del envolvente en libras
W	peso de la pared lateral de acero y de la fracción de techo soportada por metro lineal
W _c	Longitud efectiva del envolvente como se determina de la fig. 2.13 en pulgadas
W _h	Longitud efectiva del techo o cono como se determina de la fig. 2.13 en pulgadas
Z	módulos de sección requeridos para la rigidez del anillo en pulgadas cúbicas
Δ _e	Variación de la relación de vacíos
Δf	Diferencia de frecuencia de señal
ΔH	Asentamiento de un estrato de espesor H
(ΔH) _t	Asentamiento en el instante t
(ΔH) _∞	Asentamiento final
δ	Ángulo de fricción pilote-suelo
γ _m	Peso volumétrico medio de los estratos afectados por la cimentación
γ _m	Peso volumétrico medio del suelo localizado arriba del nivel de la punta, o arriba del nivel z
λ _c	Peso volumétrico del concreto reforzado
λ _m	Peso volumétrico del relleno confinado
λ _t	Peso volumétrico del fluido
ε	Relación entre la torsión y la curvatura del endurecedor
ρ	Carga, muerta o viva en psf
ρ	Densidad del líquido
σ	Estrés compresivo permitido para el material de la placa del techo, envolvente o fondo
σ	Estrés de tensión permisible del techo, envolvente o área de la junta, cualquiera que se escoja en psi
θ	Ángulo entre el cono y la base horizontal en grados

BIBLIOGRAFÍA.

1. Jaward, Maan et al. **“Structural Analysis and Design of Process Equipment”**. (Análisis Estructural y Diseño de Equipo de Procesos), 2ª edición. Wiley Interscience. USA 1998. pp 456-491.
2. Peters, Max S. **“Plant Design and Economics for Chemical Engineers”**. (Diseño de Plantas y Economía para Ingenieros Químicos), 5ª edición. Mc Graw Hill. NY, USA 2003. pp 552-560.
3. Perry, Robert⁺ . **“Manual del Ingeniero Químico”** 3ª edición en español. Mc Graw Hill. México 1984. Tomo II pp 6-111 – 6-116.
4. Terzaghi, K. et. al. **“Soil Mechanics in Engineering Practice”**. (Práctica de Ingeniería en la Mecánica de Suelos), J. Wiley, New York, 1967.
5. Terzaghi, K. **“Theoretical Soil Mechanics”**. (Mecánica Teórica de Suelos), J. Wiley, New York, 1943.
6. **API STANDARD 650, 10TH EDITION ADDENDUM 2, 2001. “Welded Steel Tanks for Oil Storage”**. (Tanques de acero soldados para almacenar petróleo crudo y/o combustibles).
7. **API STANDARD 650, 11TH EDITION, 2007. “Welded Steel Tanks for Oil Storage”**. (Tanques de acero soldados para almacenar combustibles).
8. **API STANDARD 620, 10TH EDITION, 2002. “Recommended Rules for Design and Construction of Larges Welded Low-Pressure Storage Tanks**. (Reglas recomendadas para el diseño y construcción de tanques de almacenamiento grandes sometidos a baja presión).
9. **ANSI B96.1, 2000 REVISION, “American National Estandar for Welded Alluminium-Alloy Storage Tanks”**. (Norma Nacional Norteamericana para tanques de almacenamiento de aluminio soldados).

10. **AWWA D 100-05, 2006 EDITION “Standard for Welded Steel Tanks for Water Storage”**. (Norma para tanques de acero soldados para almacenar agua).
11. **API STANDARD 653 3RD EDITION ADDENDUM 2, 2005. “Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction”**. (Inspección, Reparación, Alteración y Reconstrucción de Tanques).
12. **NFPA 30, 2003 EDITION “Flammable and Combustible Liquids Code”**. (Código de Líquidos Inflamables y Combustibles).
13. **ASTM D5-97 “Método de Prueba Estándar para la Penetración de Materiales Bituminosos”**
14. **PROY-NRF-113-PEMEX-2007 “Diseño de Tanques Atmosféricos”**.
15. **NORMA PEMEX DG-SASIPA-SI-08301 “Especificaciones de Recubrimientos Anticorrosivos para Superficies Metálicas”**.
16. **NORMA PEMEX P.2.0135.01 “Análisis y Diseño de Cimentaciones de Tanques”**.
17. **SECRETARÍA DE RECURSOS HIDRÁULICOS “Manual de Mecánica de Suelos”**. 1970.
18. **ACEROS COLLADO**
http://gcollado.com/articulo_detalle.asp?hdnArticle=22