

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería

**Guía para el diseño estructural de tanques de
almacenamiento de líquidos bajo presión
atmosférica**

Trabajo de investigación presentado por Daniel Luarca de León para optar al
grado de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala
2007

**Guía para el diseño estructural de tanques de
almacenamiento de líquidos bajo presión
atmosférica**

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería

**Guía para el diseño estructural de tanques de
almacenamiento de líquidos bajo presión
atmosférica**

Trabajo de investigación presentado por Daniel Luarca de León para optar al
grado de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala
2007

Vo.Bo.:

Ing. Alejandro Maldonado Lutomirsky

Tribunal:

Ing. Alejandro Maldonado Lutomirsky

Ing. Mario Monzón Meza

Ing. Danilo Casado Hernández

Fecha de aprobación: Martes 13 de noviembre de 2007.

PREFACIO

Este texto fue elaborado a partir del incremento de la demanda de diseño de tanques para almacenar productos derivados de la industria de la caña de azúcar, y al observar cómo vez tras vez, surgían los mismos problemas y las mismas incógnitas, diseño tras diseño. Muchas de estas dudas radicaban en que, ya sea el diseñador o el comprador del diseño del tanque contaban con poca información o era muy parcializada, si es que la tenían del todo.

Agradezco especialmente a todas las personas que ayudaron de una forma u otra a la elaboración de este trabajo, especialmente al Ing. Luís Antonio Luarca por su tiempo y ayuda, y al Ing. Alejandro Maldonado por su asesoría y revisión.

RESUMEN

Este trabajo de graduación es una guía que pretende orientar e informar al diseñador y/o al cliente de un tanque de almacenamiento de líquidos bajo presión atmosférica, que proporcione los parámetros que deben utilizarse para poder llevar a cabo un diseño adecuado y funcional.

Para el diseño adecuado de un tanque, es necesario conocer y establecer claramente los requerimientos y factores que influyen en el diseño, tales como capacidad del tanque, características del suelo y del entorno, así como también propiedades mismas del tanque, tales como los elementos que lo componen.

Para ello, se explica brevemente las características de un tanque, los parámetros de diseño y los factores de servicio que afectan también el proyecto. Adicionalmente, el trabajo contiene una guía con la secuencia de pasos a seguir durante el diseño de un tanque de almacenamiento según el estándar API 650. Para fines de demostración, se describe el procedimiento de diseño para un ejemplo teórico de un tanque de almacenamiento. Del ejemplo, se establecen características tales como dimensiones, propiedades de sus elementos, y resistencia a las cargas a las cuales estará sometido el tanque.

CONTENIDO

	Página
Prefacio	iv
Resumen	v
Lista de tablas	vii
Lista de figuras	viii
 Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
III. TANQUES DE ALMACENAMIENTO	3
IV. ELEMENTOS QUE FORMAN UN TANQUE ATMOSFÉRICO SUPERFICIAL CILÍNDRICO	6
V. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	17
VI. CONSIDERACIONES DE SERVICIO	24
VII. GUÍA PRÁCTICA DE DISEÑO	28
VIII. CONCLUSIONES	49
IX. RECOMENDACIONES	50
X. BIBLIOGRAFÍA	51
XI. ANEXOS	52

LISTA DE TABLAS

Tabla No.		Página
1	Pesos y gravedades específicas de algunos líquidos	18
2	Datos preliminares de diseño	28
3	Espesores de pared mínimos según diámetro.....	31
4	Esfuerzos de resistencia máximos de algunos tipos de aceros.....	32
5	Resumen de espesores de pared del tanque.....	33
6	Peso del la pared del tanque.....	33
7	Peso del fondo del tanque.....	34
8	Peso del techo del tanque.....	36
9	Presiones de viento mínimas.....	38
10	Resumen del cálculo de cargas de viento.....	39
11	Coeficientes de sitio.....	42
12	Resumen del cálculo de cargas sísmicas.....	43
13	Resumen del cálculo de fuerzas compresivas.....	46
14	Cargas de levantamiento.....	47
15	Resumen de diseño.....	48

LISTA DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura No.		Página
1	Tanque de almacenamiento superficial	4
2	Vista de la pared desde el interior de un tanque.....	6
3	Diagrama de tensión en la pared de un cilindro.....	7
4	Paso de hombre de techo.....	12
5	Paso de hombre de pared	12
6	Sección típica de anillo de cimentación.....	14
7	Vista de anclajes y una conexión de tubería.....	16
8	Esquema de la distribución de elementos del techo.....	35
9	Tanque atmosférico	53
10	Tanque cilíndrico con tapas elipsoidales	53
11	Tanque esférico de almacenamiento de gases	54
12	Tanque refrigerado	54
13	Tanque con techo cónico	55
14	Tanque con techo de domo	55
15	Tanque con techo de sombrilla	56
16	Tanque con techo flotante externo	56
17	Tanque con techo flotante interno y techo cónico soportado por armaduras	57
Gráfico No.		Página
1	Masas efectivas.....	40
2	Centroide de fuerzas sísmicas.....	41
3	Factor k.....	42
4	Fuerza compresiva b.....	45

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la escasez de combustibles no renovables tales como el petróleo, sus derivados y sustitutos, ha empujado a la humanidad a la búsqueda de fuentes de energía alternativas renovables. Una de estas fuentes es el etanol producido a partir de caña de azúcar y otras fuentes de biomasa.

Guatemala produce grandes cantidades de caña de azúcar, la cual actualmente, es destinada casi en su totalidad a la elaboración de azúcar alimenticia. Según las tendencias energéticas actuales, es probable que en un futuro cercano, la industria azucarera destine parte de su producción de azúcar y de su subproducto, la melaza, para la elaboración de etanol. Este cambio de producción creará grandes cantidades de bio-combustibles, y hará que Guatemala se vuelva un productor de combustibles para la exportación.

El proceso de fabricación y almacenaje del etanol, por lo general, se lleva a cabo en tanques de forma cilíndrica. Estos tanques deben de ser diseñados para soportar con seguridad las cargas verticales e hidrostáticas, como también fuerzas de índole variada, tales como viento o sismo. Considerando estos requerimientos, es importante para el diseñador y comprador del diseño conocer las características, comportamiento y capacidades de estos tanques como también las variables involucradas en el diseño.

Esta guía tiene el propósito de dar al nuevo diseñador de tanques de almacenamiento cilíndricos bajo presión atmosférica, como también al comprador de los mismos, una pauta para poder llevar a cabo el proceso del desarrollo y el diseño de un tanque, y de esta manera, poder realizar un proyecto en el cual las dos partes tengan un buen conocimiento estructural y funcional del mismo. Adicionalmente, al cubrir la información esencial al diseño, se puede tener un mejor juicio al momento de la toma de decisiones y en la aplicación del mismo, lo cual proporcionará un diseño exacto, práctico y económico que cubra adecuadamente los requerimientos exigidos de acuerdo a su función.

II. OBJETIVOS

A. Generales

- Redactar una guía para el diseño estructural de tanques de almacenamiento de líquidos bajo presión atmosférica que sirva para informar acerca de las variables involucradas y del proceso de diseño.

B. Específicos

- Describir los elementos básicos que toman parte en el diseño de un tanque de acero y las distintas partes del proceso del diseño.
- Determinar la información necesaria para poder realizar el diseño estructural de tanques de almacenamiento de líquidos bajo presión atmosférica.
- Establecer los elementos básicos que forman un tanque y los materiales que los componen.
- Detallar el procedimiento de diseño de un tanque según el Estándar API 650 y los elementos, cargas, y condiciones de diseño que éste plantea.

III. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

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

A. Generalidades

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

B. Tipos de tanques

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

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

Figura No. 1: Tanque de almacenamiento superficial cilíndrico



C. Tipos de tanques superficiales

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

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

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

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

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

IV. ELEMENTOS QUE FORMAN UN TANQUE ATMOSFÉRICO SUPERFICIAL CILÍNDRICO

A. Paredes

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

Figura No. 2: Vista de la pared desde el interior de un tanque

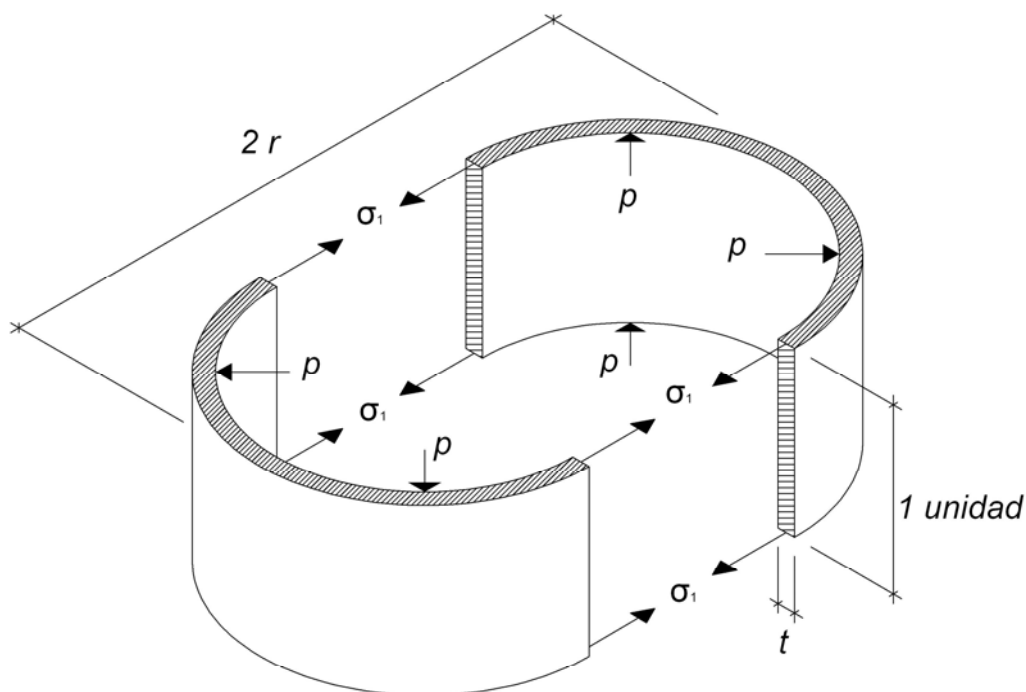


La pared del tanque está formada por planchas rectangulares de acero unidas en sucesión que constituyen anillos de tensión. El esfuerzo σ_1 en los anillos está dado por la ecuación:

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

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

Figura No. 3: Diagrama de tensión en la pared de un cilindro



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

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

Las planchas de los anillos deben tener sus juntas verticales alternadas con relación a las carreras inmediatamente superiores e inferiores, un mínimo de cinco veces el espesor de la

placa más grande en el punto de la unión. Estas juntas deben ser uniones soldadas de penetración total.

B. Fondo

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

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

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

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

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

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

C. Techo

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

La pendiente mínima aplicada al cono del techo recomendada por el estándar API 650 es del 6.25%, aunque es más recomendable una pendiente mayor, sin que sobrepase algunos límites particulares para tipos de techo específicos. De no tener pendiente, el techo tiene que ser proporcionado de medios alternos para drenar el agua de lluvia, tal como bombas.

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

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

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

1. Techos cónicos soportados. Un techo cónico soportado es un techo formado aproximadamente a la superficie de un cono recto, que es soportado principalmente por travesaños sobre vigas y columnas o por travesaños sobre armaduras con o sin columnas.

2. Techos auto soportados. Un techo cónico auto soportado es un techo formado aproximadamente a la superficie de un cono recto soportado solamente en su periferia, haciendo que la lámina de recubrimiento se soporte a sí misma, siendo la estructura en sí. Ésta puede

tener secciones que actúen como rigidizantes, como también un anillo de compresión en el centro del cono.

3. Techos de domo. Un techo de domo es un techo auto soportado formado aproximadamente a la superficie de una esfera o un elipsoide, siendo soportado solamente en su periferia.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

D. Aperturas y conexiones

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

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

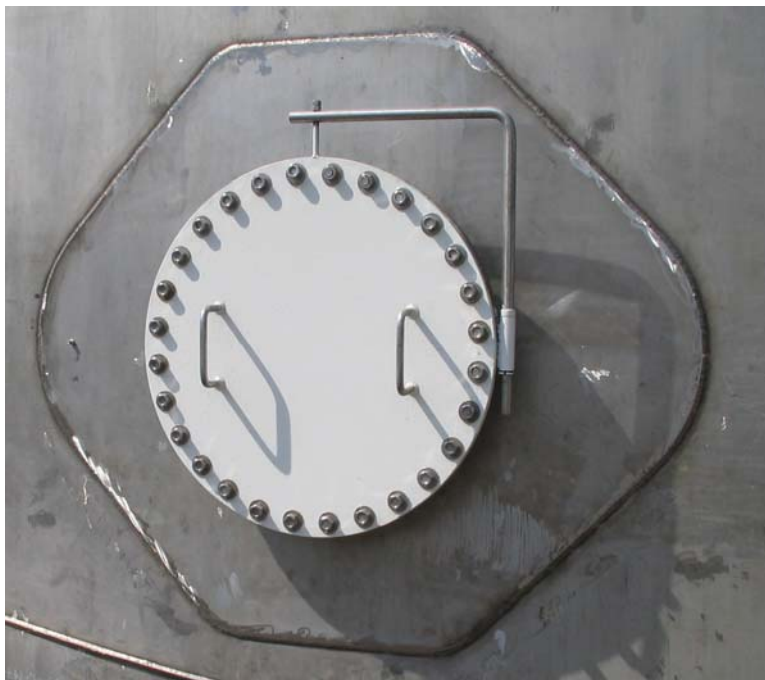
a. De techo. Se encuentran el techo del tanque, su cuello esta sesgado con el propósito de que la tapadera y el reborde que la soportan queden horizontales. Estos pueden ser circulares o cuadrados, dependiendo de los requerimientos del tanque. A causa de que prácticamente no resisten cargas, son elaborados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

Figura No. 4: Paso de hombre de techo



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

Figura No. 5: Paso de hombre de pared



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

a. Pasivas. Éstas permiten el flujo de aire libremente del interior del tanque hacia el exterior y viceversa. Son aperturas sencillas que pueden tener una vuelta en “u” para no permitir el ingreso de agua de lluvia al interior del tanque.

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

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

E. Cimiento

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

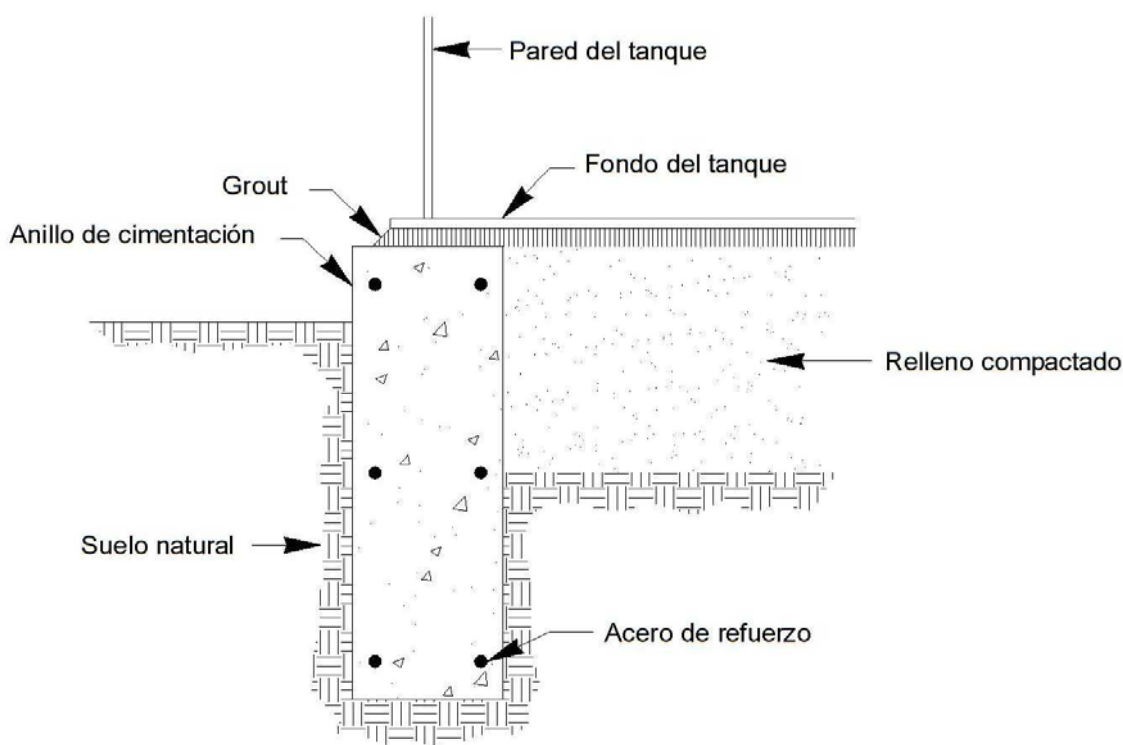
1. Cimiento sobre terracería. Éste consiste en una base de suelo que soporta el peso de la estructura del tanque y su contenido. Está hecho a base de suelo seleccionado cuidadosamente a manera que éste pueda soportar y distribuir satisfactoriamente las cargas del contenido con asentamientos admisibles,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

2. Cimiento anular de concreto. Este cimiento consiste en un anillo de concreto reforzado con acero estructural, el cual sigue el perímetro del tanque, confinando el material de relleno

dentro del mismo, formando una placa de suelo en estado de compresión triaxial. Este cimiento es utilizado cuando se considera que el suelo no será capaz de darle un soporte adecuado a la pared del tanque y su contenido. Los tanque de gran diámetro, especialmente los que tienen techos auto soportantes, tienden a acumular cargas en la pared, lo que hace que el suelo no pueda soportar la pared solo por contacto directo.

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

Figura No. 6: Sección típica de anillo de cimentación



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

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

Esta opción se utiliza cuando la capacidad de soporte del suelo requiere un área de soporte mayor que la del fondo del tanque, el suelo es propenso a asentamientos diferenciales, o si se tuviera que utilizar pilotes para soportar el tanque, ya sea por capacidad de carga o por el riesgo de licuefacción del suelo.

La gran desventaja de esta opción es su costo, ya que implica una gran cantidad de materiales, como también de mano de obra.

F. Anclajes

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

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

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

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

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

4. Anclaje por requerimiento del propietario. El propietario del tanque puede llegar a requerir la implementación de anclajes por requerimientos propios, de seguridad, y/o económicos.

Figura No. 7: Vista de anclajes y una conexión de tubería



V. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

A. Capacidad

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

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

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

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

B. Contenido.

El contenido del tanque es parte fundamental del diseño del mismo, ya que rige gran parte de los parámetros utilizados en el diseño.

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

Usualmente el peso del contenido se maneja como un peso relativo en función al peso del agua. Los líquidos más livianos oscilan entre 0.7 y los más pesados en alrededor de 1.5, en pesos relativos al del agua.

La pared del tanque se ve afectada directamente por el peso del contenido, ya que un líquido más pesado ejercerá más presión que uno más liviano, para una columna de la misma

altura. Es de esperarse que un tanque de contenido más pesado tenga paredes más gruesas que uno de contenido liviano, para una misma altura de almacenaje.

Tabla No. 1: Pesos y gravedades específicas de algunos líquidos

Líquido	Peso	Gravedad específica
	Lbs / Pie ³	
Alcohol al 100%	49	0.79
Ácido muriático al 40%	75	1.2
Ácido nítrico al 98%	94	1.5
Ácido sulfúrico al 87%	112	1.8
Soda caústica al 66%	106	1.7
Aceite vegetal	58	0.91-0.94
Aceite mineral	57	0.90-0.93
Agua a 4° C. (máxima densidad)	62.428	1.00
Agua a 100° C.	59.83	0.9584
Agua de mar	64	1.02-1.03
Petróleo	54	0.87
Petróleo refinado	50	0.79-0.82
Benzeno	46	0.73-0.75
Gasolina	42	0.66-0.69

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

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

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

Un líquido altamente volátil o higroscópico necesitará un techo flotante o que se le proporcionen de dispositivos que regulen el intercambio de gases con el ambiente. La situación

es igual con contenidos inflamables, los cuales se requiere que tengan poca exposición al entorno por el riesgo de fuego.

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

C. Materiales.

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

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

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

D. Suelo.

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

especial importancia, ya que una mala consideración de las propiedades del suelo, puede llevar a dejar el tanque fuera de servicio.

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

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

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

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

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

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

E. Cargas

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

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

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

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

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

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

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

4. Viento. Éste afecta al tanque en la proyección de su área lateral en la forma de presión horizontal. Esta carga, por lo general, se considera como la presión causada por un viento de 100 MPH, pero puede variar dependiendo de la exposición del tanque y de la velocidad promedio del lugar y/o el código utilizado. El viento presenta la posibilidad de deslizar el tanque horizontalmente y/o de producirle un momento de volteo, especialmente cuando este se encuentra vacío. Esto sucede a causa que el contenido del tanque tiende a estabilizarlo bajo

cargas laterales externas, dándole mayor resistencia a las mismas. Es por ello que para el diseño del tanque bajo cargas de viento, es necesario considerar el tanque bajo condiciones críticas, que sería sin contenido.

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

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

F. Condiciones del entorno

Las condiciones del entorno afectan el diseño ya que varían otros parámetros del diseño, especialmente las cargas. Las condiciones bajo las cuales trabajará el tanque durante su vida de servicio varían según el sitio donde éste será erigido.

1. Sismo. La amenaza sísmica depende del sitio. Se debe establecer el peligro al que podría estar expuesto el tanque, y calcular las fuerzas equivalentes, haciendo que el diseño las pueda resistir adecuadamente.

2. Viento. El viento es variable de lugar en lugar, además la intensidad del viento depende de la exposición. Si el tanque se encuentra entre edificaciones o obstáculos que le hagan resistencia al viento será afectado menos por éste, a que si se encuentra en un llano descampado.

3. Condiciones geográficas. Afectan el suelo como también condiciones atmosféricas. Masas de agua, montañas, bosques, o ríos son de especial consideración a causa de las variantes que estos pueden producir a los otros parámetros de diseño.

4. Condiciones ambientales. La atmósfera y químicos en el suelo pueden afectar adversamente la estructura de un tanque, por lo que se deben de tomar en cuenta en el diseño. Esos factores pueden acelerar la corrosión del tanque, así como afectar las soldaduras que unen sus elementos.

El riesgo de inundación del sitio también ha de ser considerado. Éste puede ser mitigado por medio de la ubicación del tanque, anclajes, o la construcción del tanque sobre un terraplén elevado.

G. Anclajes.

De ser necesarios los anclajes, o requeridos por el cliente, éstos tienen que ser diseñados bajo algunas consideraciones. Éstos tienen que ser capaces de soportar las cargas de viento y de sismo por si solos, sin la ayuda que podrían brindar las cargas estabilizantes del tanque.

Los anclajes también tienen que ser distribuidos de manera uniforme en el perímetro del tanque, a manera que exista la misma distancia entre ellos. No es necesario que se encuentren en pares, aunque es deseable ya que facilita su trazado durante la fase constructiva.

Es común que a los anclajes les sea dado un diámetro adicional del requerido por el diseño, para que tengan protección contra la corrosión. Ese diámetro adicional depende de las condiciones del entorno a las cuales estará sometido el anclaje.

H. Corrosión permisible.

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

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

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

VI. CONSIDERACIONES DE SERVICIO

A. Función

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

B. Uso de materiales

El material a utilizar en el tanque debe ser definido por el cliente, basándose en criterios tales como costo, disponibilidad, practicidad, uso y la vida útil del tanque. También es útil definir las dimensiones de los materiales disponibles, tales como tamaños de planchas y secciones, así estos se pueden modular y aplicar a la estructura, con el propósito de optimizar su utilización.

C. Construcción

El diseño del tanque debe incluir entre sus consideraciones los métodos y procesos que se utilizarán durante la etapa de construcción del tanque. El diseñador debe realizar un diseño del tanque que facilite la elaboración y erección del mismo. Esto conlleva a un tiempo menor de construcción de la estructura, como también economía y practicidad.

1. Elaboración. Este factor aplica a la capacidad y facilidades que tenga el constructor de poder realizar la obra en campo o en fábrica, y la factibilidad que se tenga de fabricar y transportar piezas voluminosas ya ensambladas, tales como secciones roladas, tijeras del techo, columnas y otros elementos estructurales.

2. Montaje. Se debe tener en cuenta la capacidad de montaje que se pueda obtener y aplicar al tanque durante su construcción. Estos parámetros incluyen factores tales como la obra falsa que se pueda disponer para la elaboración de elementos tales como el techo, o las características de las grúas que se encuentren disponibles, tales como su capacidad, radio de acción y disponibilidad de tiempo.

D. Aspectos ambientales y de desastres

A causa del incremento en los niveles de seguridad ambiental se deben proporcionar a los tanques de medidas de reducción de daño al ambiente y de prevención de desastres, a

manera de que al establecer un tanque este no presente un peligro de ningún tipo para el sitio. Estos aspectos no intervienen directamente con el diseño del tanque, pero podrían llegar a afectarlo de manera indirecta, por lo tanto deben ser considerados.

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

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

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

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

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

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

4. Red contra incendios. En los casos en que el contenido almacenado sea altamente inflamable, el tanque debe ser proporcionado de un sistema de protección y mitigación de fuego, el cual debe de operar y estar disponible todo el tiempo durante la vida útil del depósito. Este

sistema debe ser diseñado para que pueda sofocar satisfactoriamente un incendio, en caso de que este llegara a ocurrir.

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

E. Protección y mantenimiento

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

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

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

F. Ventilación

Los tanques atmosféricos deben estar a una presión igual a la atmosférica para que no se creen diferenciales de presión. Los tanques deben tener dispositivos que eculicen la presión internas con la externa, con el propósito de evitar daños a la estructura. Existen normas vigentes que regulan los sistemas de ventilación, por lo que el cliente debe definir las para su implementación.

G. Fuerzas electromagnéticas

La exposición del tanque a fuerzas electromagnéticas atmosféricas, así como la producida por estructuras adyacentes, se deberá de establecer durante la evaluación del lugar de erección del tanque. Con base al peligro que la exposición pueda presentar, se deberá aterrizar el tanque, de esta manera reduciendo el riesgo de daños producidos por cargas eléctricas. Este factor es de especial importancia en tanques que almacenan líquidos inflamables, ya que una chispa puede causar la ignición de los vapores volátiles del fluido.

El método de aterrizar el tanque es variable, aunque el método más común es por medio de una red de cables y varillas de cobre enterrados en el suelo, unidos al tanque por medio de conexiones que permitan una buena disipación de las cargas eléctricas.

H. Cuestiones de índole variada

1. Seguridad industrial. Ésta establece algunos parámetros en lo que respecta a los accesos y escaleras, así como también otros que se aplican directamente al diseño. Se debe verificar las normas y/o estándares de seguridad exigidos por el cliente, para verificar su implementación.

2. Cuestiones urbanísticas. Debido a que los tanques usualmente se establecen en grupos, es importante verificar la relación que unos tendrán con los otros. Algunos parámetros afectados son la orientación de sus conexiones, los ingresos de servicio y otros accesorios tales como escaleras y accesos.

3. Leyes y regulaciones. Existen restricciones y/o normativas que dependen de la legislación local del sitio donde se erigirá el tanque. Estas regulan cuestiones tales como espaciamiento, dimensiones, y requerimientos ambientales.

4. Seguros. Las empresas aseguradoras, por lo general, exigen algunos requisitos al diseño del tanque para que éste pueda ser asegurado. Es importante establecer estos parámetros antes de realizar el diseño, a manera de poderlos aplicar sobre el mismo. Algunos parámetros pueden afectar cuestiones pequeñas, pero otros pueden llegar a afectar inclusive las dimensiones del tanque, la ubicación del mismo o el espaciamiento entre tanques.

VII. GUÍA PRÁCTICA DE DISEÑO

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

A. Especificaciones preliminares

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

Tabla No. 2: Datos preliminares de diseño

CONCEPTO	DATOS
1.0 Materiales	
Acero estructural	A36M $f_y = 36 \text{ KSI}$
Concreto	$f'c = 4 \text{ KSI}$
Acero de refuerzo	Grado 60 $f_y = 60 \text{ KSI}$
Tamaño de planchas de acero	4,6 ó 8 x 20 pies
2.0 Contenido	
Líquido almacenado	Etanol de alto grado al 95%
Gravedad específica	0.79
Peso específico	0.049 K/Pie ³
Capacidad	2,400,000 gal (320,856 Pies ³)
3.0 Suelo	
Condiciones del suelo	Suelo duro y denso
Peligro de licuefacción	No
Estratos altamente compresibles	No
Capacidad de soporte	2.5 KSF
Incremento a cargas temporales	33%
Coefficiente de presión activa (K_a)	0.30
Coefficiente presión pasiva (K_p)	3.00
Peso del suelo	0.100 K/Pie ³
Condiciones químicas del suelo	Beningnas
4.0 Entorno	
Precipitación pluvial	Moderada
Sismo	Alto (zona 4)
Viento	100 MPH
5.0 Corrosion permisible	
Espesor del sobre ancho	1/16"

B. Elección de elementos

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

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

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

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

C. Dimensiones del tanque

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

1. Determinar la altura de la columna de líquido. La capacidad de soporte para cargas de servicio del suelo dada por el estudio de suelos es de 2.5 KSF. Se debe de suponer que la

columna de líquido ejercerá una presión uniforme sobre el suelo, pero no debe de sobrepasar esta capacidad, además de dejar un margen que pueda soportar las paredes, techos, y posibles cargas momentáneas.

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

Suponiendo una presión vertical máxima admisible ejercida sobre el líquido sobre el suelo de 2.0 KSF y utilizando la ecuación de presión del líquido, se tiene:

$$\sigma_v = \gamma h$$

Despejando para h y sustituyendo:

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

$$\frac{2.0KSF}{0.0495K / Pie^3} = 40.40Pies$$

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

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

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

$$V = \frac{h\pi D^2}{4} \quad \blacktriangleright \quad D = \sqrt{\frac{4V}{h\pi}} \quad \blacktriangleright \quad \sqrt{\frac{4(320,856Pies^3)}{\pi(40Pies)}} = 101.06Pies$$

Se obtiene un diámetro de 101.06 pies. La circunferencia (C) de este diámetro es igual a 317.49 pies. El modulo de 20 pies que más se aproxima por arriba a esta cifra es de 320 pies, por lo que se recalcula el diámetro a 101.85 pies de acuerdo a esta circunferencia.

3. Establecer dimensiones y capacidad finales. Para la altura y diámetros establecidos previamente se recalcula el volumen, el cual es de 325,949 pies³, o de 2,438,100 galones. La diferencia entre la capacidad nominal y la efectiva (en este caso de un 1.5 % más) debe ser evaluada por el cliente para su aceptación. De lo contrario se deben buscar nuevas dimensiones para acomodarse a los criterios y necesidades del cliente.

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

D. Diseño de las paredes

El API 650 requiere que el espesor de las paredes del tanque sea el mayor de los espesores de diseño incluyendo las permisiones por corrosión, o del espesor por la prueba hidrostática, pero no pueden ser menores que los valores contenidos en la tabla No. 3.

Tabla No. 3: Espesores de pared mínimos según diámetro

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

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

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

Para la prueba de diseño:

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

Para la prueba hidrostática:

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

Siendo:

t_d = espesor de diseño en pulgadas,

t_t = espesor de la prueba hidrostática en pulgadas,

D = diámetro nominal del tanque en pies,

H = altura de diseño en pies, la cual es la altura desde el fondo del anillo bajo consideración a nivel de servicio del liquido almacenado,

- G = gravedad específica del líquido
 CA = espesor de la corrosión permisible en pulgadas
 S_d = esfuerzo permisible para la condición de diseño en PSI
 S_f = esfuerzo permisible para la condición de la prueba hidrostática PSI

Tabla No. 4: Esfuerzos de resistencia máximos de algunos tipos de aceros

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

Procediendo a calcular, utilizando las dimensiones establecidas y los esfuerzos especificados en la tabla No. 4 para el acero A36, se calcula el primer anillo de 8 pies arriba hacia abajo, es decir el anillo más cercano a la superficie del líquido.

Por diseño:

$$0.125 p l g = \frac{2.6(101.85 \text{ pies})(8 \text{ pies} - 1 \text{ pie})(0.79)}{23,200 \text{ psi}} + 1/16 p l g$$

Por prueba hidrostática:

$$0.0744 p l g = \frac{2.6(101.85 \text{ pies})(8 \text{ pies} - 1 \text{ pie})}{24,900 \text{ psi}}$$

De estos cálculos se tiene que el espesor más grande es de 0.125 de pulgada, pero como el espesor mínimo según el diámetro dado por la tabla No. 3 para un tanque de este diámetro es de $\frac{1}{4}$ de pulgada, superior al calculado. Por lo tanto, se usará este último.

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

Tabla No. 5: Resumen de espesores de pared del tanque

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

La primera carrera, ya que no está diseñada para soportar esfuerzos causados por el contenido del tanque, su espesor es el mínimo permitido, $\frac{1}{4}$ de pulgada.

Además se determina el peso de las paredes con el sobre ancho de corrosión, sin éste sobre ancho y la altura del centroide de las paredes del tanque. Estos fueron calculados como:

Tabla No. 6: Peso de la pared del tanque

Concepto	Valor	Unidad
Peso de paredes sin CA	151.9	Kips
Peso de paredes con CA	189.5	Kips
Altura del centroide de pared	20.17	Pies

E. Diseño del fondo

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

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

Tabla No. 7: Peso del fondo del tanque

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

F. Diseño de techo

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

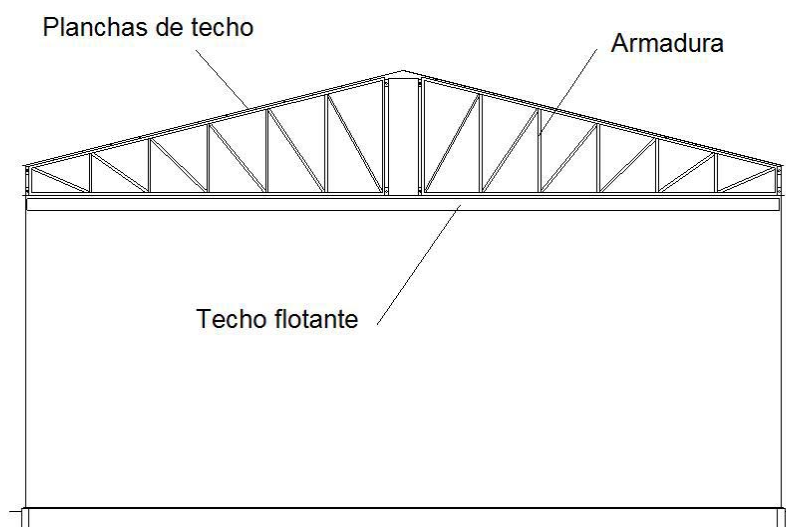
La estructura del techo deberá soportar cualquier carga muerta que pueda tener el mismo techo, mas una carga mínima uniformemente distribuida de 25 PSF sobre el área de proyección del techo. Las planchas de techo, armaduras y demás vigas deben soportar satisfactoriamente estas cargas con márgenes de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

La pendiente mínima del techo dictada por el estándar API 650 para techos soportados es del 6.3%. Las armaduras y vigas del techo deberán ser dimensionadas para que su estructura describa esta pendiente mínima, o una mayor. Para este caso se utilizará un 25% de pendiente, a causa del peralte necesario de las armaduras en su centro. Con esta pendiente, la altura del cono es de 12.73 pies.

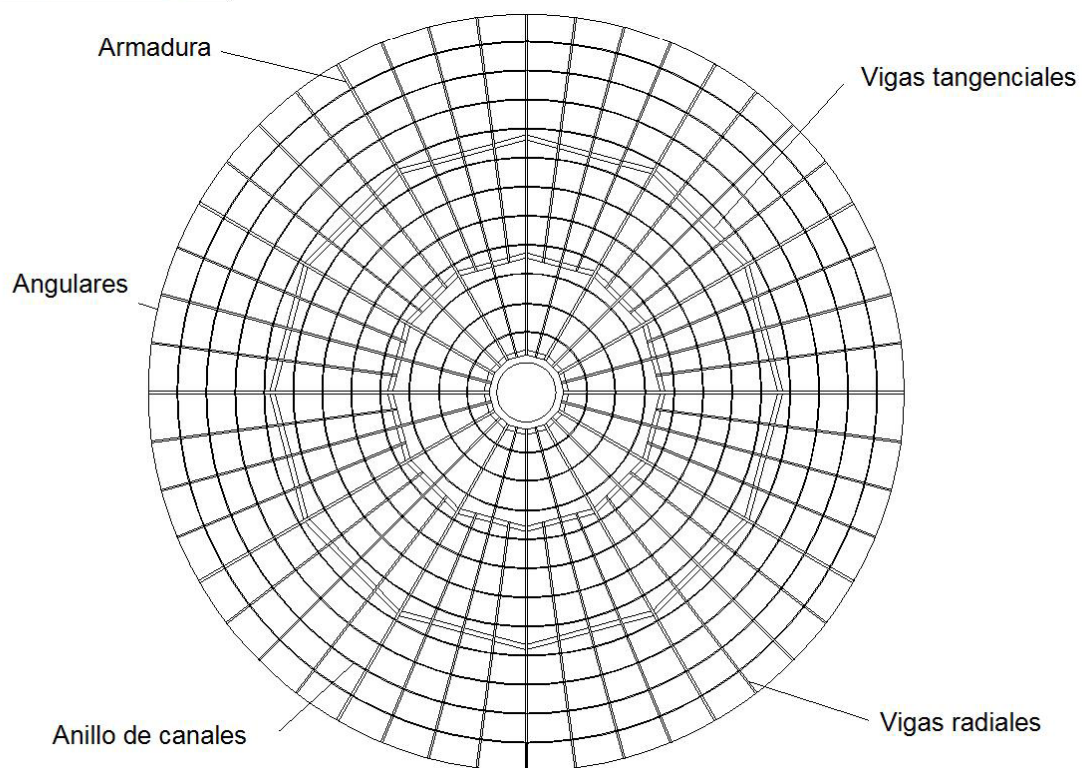
Adicionalmente, el estándar dicta que los elementos soportantes radiales no deben estar espaciados a más de 6.28 pies centro a centro en el perímetro del tanque y de 5.5 pies en las áreas internas, por lo que las vigas radiales deben estar espaciadas respetando este espaciamiento.

Figura No. 8: Esquema de la distribución de elementos del techo

Sección del tanque



Planta de vigas



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

Finalmente, a partir del diseño estructural del techo esquematizado en la figura No. 8, se establecen sus dimensiones, el peso combinado de la estructura del techo y las planchas, con y sin la permisión de corrosión. Estas se resumen en la tabla No. 8 (Estimadas a partir de diseños previos ajenos).

Tabla No. 8: Peso del techo del tanque

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

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

G. Diseño de cimiento

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

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

$$40 \text{ pies} \times 0.0495 \text{ kips} / \text{pie}^3 = 1.98 \text{ KSF}$$

Con la ecuación de presión activa del suelo:

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

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

$$\frac{1}{2} (0.3)(0.100 \text{ Kips} / \text{pie}^3)(3 \text{ pies})^2 + (0.3)(1.98 \text{ KSF})(3 \text{ pies}) = 1.917 \text{ Kips}$$

Esta fuerza de 1.917 Kips esta ejercida por pie lineal de circunferencia del tanque y deberá ser resistida por el acero de refuerzo del cimientado. Éste tiene el esfuerzo permisible de 24 KSI, según las normas del ACI para esfuerzos de servicio. El esfuerzo a tensión proporcionado por el concreto se despreciará, ya que éste se considerará agrietado, por lo que no podrá ofrecer resistencia a la tensión. Por lo tanto la tensión en el cimientado (utilizando la ecuación de esfuerzos de tensión en cilindros) es de:

$$\frac{(101.85 \text{ pies})(1.917)}{2} = 97.62 \text{ Kips}$$

El área de acero requerida por tensión es calculada como:

$$\frac{97.62 \text{ Kips}}{24 \text{ KSI}} = 4.07 \text{ Pulgadas}^2$$

Estas 4.07 Pulgadas², pueden ser proporcionadas por 6 varillas No. 8, lo que nos da un área de 4.74 Pulgadas², superior al acero requerido.

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

$$b = \frac{W' \times 1000}{31.25HG - 44h_s}$$

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

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

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

$$\frac{150Kips + 151.9Kips}{320Pies} = 0.943Kips / Pie$$

Sustituyendo una vez más:

$$\frac{(0.943Kips / Pie) \times 1000}{31.25(40Pies)(0.79) - 44(3)} = 1.10Pies$$

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

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

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

Tabla No. 9: Presiones de viento mínimas

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

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

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

Siendo M_w el momento de volteo en Kips/ pie causado por las presiones de viento y W el peso en Kips de la carga muerta, excluyendo cualquier permisión por corrosión. De no cumplir con este criterio, el tanque deberá ser anclado para contrarrestar este volteo. El resumen del cálculo sigue a continuación en la tabla No. 10.

Tabla No. 10: Resumen del cálculo de cargas de viento

REGLON	PROCEDIMIENTO	VALOR	UNIDAD
Área proyección de pared	$D \times h_{pared}$	4,685	Pies ²
Área proyección de cono	$1/2 h_{cono} \times D$	648.34	Pies ²
Altura del centroide área cono	$h_{pared} + 1/3 h_{cono}$	50.24	Pies
Altura del centroide área pared	$h_{pared}/2$	23	Pies
Carga de viento captada en cono	$A_{cono} \times P_{cono}$	9.7	Kips
Carga de viento captada en la pared	$A_{Pared} \times P_{pared}$	84.3	Kips
Carga total (P_t)	ΣP_i	94.1	Kips
Momento de volteo por viento (M_w)	$\Sigma h_i \times P_i$	2,428	Kips-Pie
Peso del tanque sin CA (W)	$W_{techo} + W_{pared}$	280.90	Kips
Brazo de momento estabilizante	$D / 2$	50.93	Pies
Momento estabilizante (M_w)	$W \times D / 2$	14,305	Kips-Pie
μ_s del fondo del tanque y suelo		0.4	--
Peso del tanque considerando el fondo (W'')	$W_{piso} + W_{techo} + W_{pared}$	364.07	Kips
Fricción resistente al deslizamiento (F_f)	$\mu_s \times W''$	145.628	Kips
Factor de seguridad al volteo	M_w / M_w	5.89	--
Factor de seguridad al deslizamiento	P_t / F_f	1.55	--

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

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

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

a. Momento de Volteo. El momento de volteo del tanque a causa del sismo se determina utilizando la siguiente ecuación planteada por el estándar API 650:

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

Donde:

M_s = momento de volteo por sismo en Kips-Pie,

Z = factor de zona sísmica,

I = factor de importancia,

C_1 = coeficiente de fuerzas laterales 1,

C_2 = coeficiente de fuerzas laterales 2,

W_s = peso total de la pared del tanque en Kips,

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

W_r = peso total del techo del tanque en Kips,

H_r = altura total de la pared del tanque en pies,

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

X_1 = centroide de masa de W_1 en pies,

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

X_2 = centroide de masa de W_2 en pies.

Las masas efectivas W_1 y W_2 se determinan a partir de multiplicar W_T (el peso total de contenido del tanque, en Kips) por el valor obtenido del gráfico de relación No. 1, a partir de la relación D/H . De manera similar, las alturas centroidales X_1 y X_2 se obtienen multiplicando el valor del gráfico de relación No. 2 por H .

Gráfico No. 1: Masas efectivas

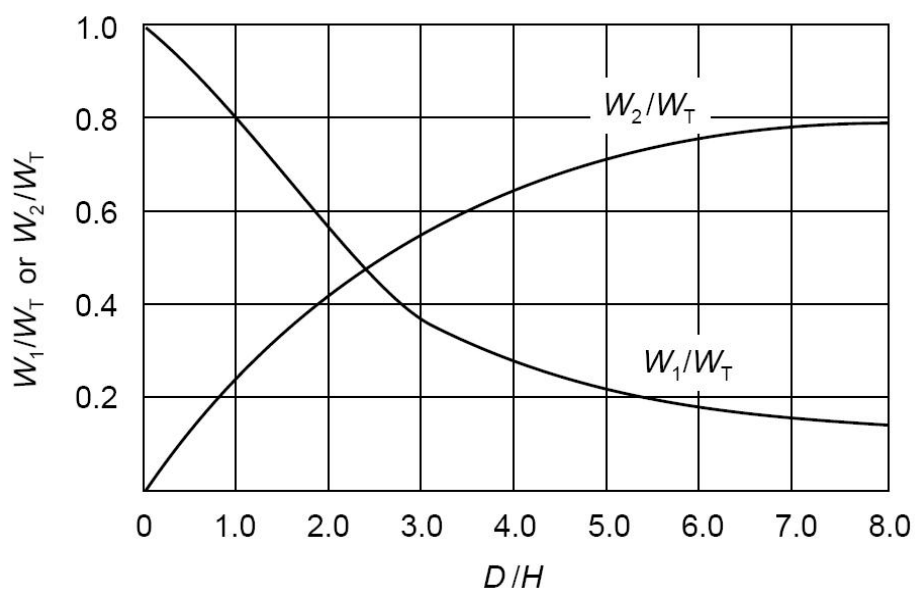
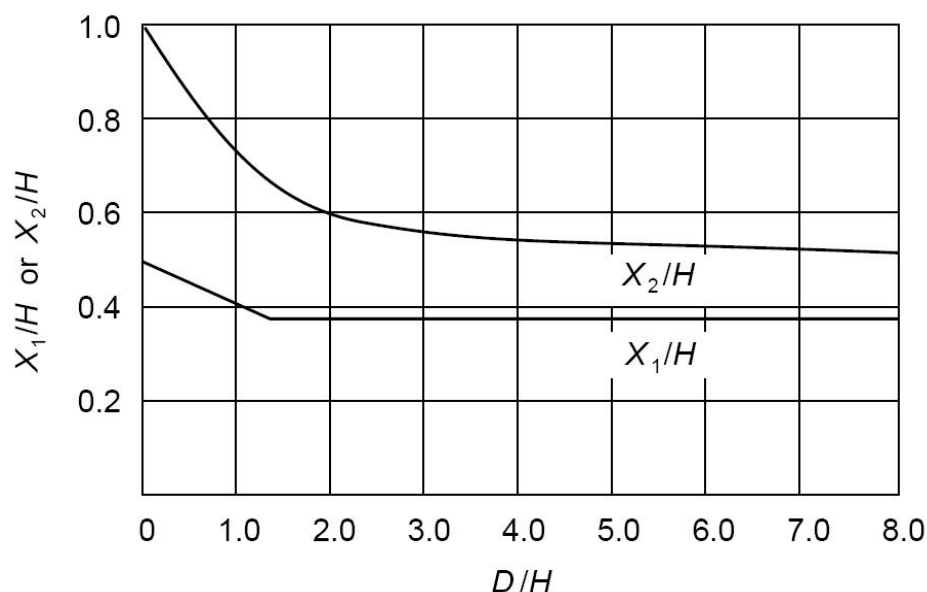


Gráfico No. 2: Centroide de fuerzas sísmicas

El coeficiente de fuerza lateral C_1 debe de calcularse como 0.6. El coeficiente C_2 se determina como una función del primer modo fundamental de vaivén, T (en segundos), y las condiciones del suelo en el sitio del tanque. T puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$T = k(D^{0.5})$$

Donde k es un factor obtenido del gráfico de relación No. 3 para la relación D/H . Si $T \leq 4.5$ segundos:

$$C_2 = \frac{0.75S}{T}$$

Si $T > 4.5$ segundos:

$$C_2 = \frac{3.375S}{T^2}$$

Donde S es el factor de sitio obtenido de la tabla No. 11, o por estudios geotécnicos apropiados.

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

$$w_L = 7.9t_b \sqrt{F_{by}GH}$$

Siempre y cuando no sea mayor que:

$$1.25GHD$$

Donde:

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

t_b = espesor del fondo del tanque sin CA en Pulgadas,

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

Gráfico No. 3: Factor k

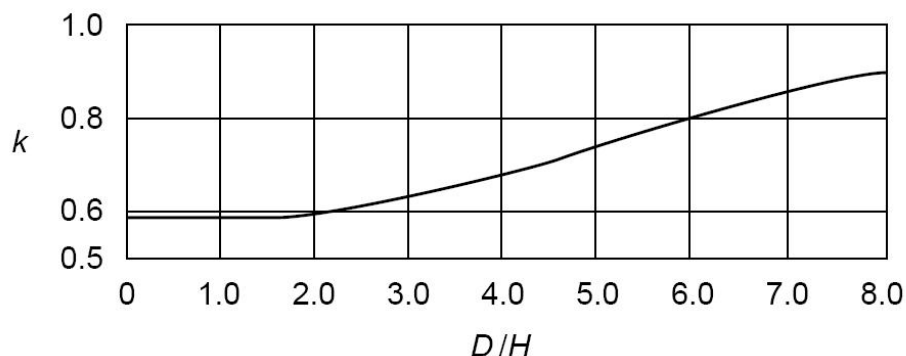


Tabla No. 11: Coeficientes de sitio

Tipo	Descripción del perfil del suelo	Factor S
S_1	Material rocoso y/o suelo duro o denso donde su profundidad no excede los 200 pies.	1.0
S_2	Suelo duro o denso donde su profundidad excede los 200 pies.	1.2
S_3	Suelo con 40 pies o más que contenga más de 20 pies de arcilla suave a medio dura pero más de 40 pies de arcilla suave.	1.5
S_4	Suelo que contenga más de 40 pies de arcilla suave.	2.0

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

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

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

d. Resumen de cálculos. Utilizando el procedimiento anterior, se calcula la resistencia del tanque a fuerzas sísmicas. En caso que no cumpla con los factores de seguridad para volteo y deslizamiento (1.5), el tanque deberá ser anclado.

Tabla No. 12: Resumen del cálculo de cargas sísmicas

REGLON	PROCEDIMIENTO	VALOR	UNIDAD
Zona sísmica	Zona 4	0.40	--
Factor de importancia (<i>I</i>)	Especificado por el Cliente	1.00	--
Relacion <i>D/H</i>	<i>D / H</i>	2.55	--
Coeficiente de fuerza lateral (<i>C₁</i>)		0.6	--
Coeficiente del sitio (<i>S</i>)		1.2	--
Coeficiente <i>k</i>		0.62	--
Primer periodo natural de vaivén (<i>T</i>)	$k (D^{0.5})$	6.26	Sec
Coeficiente de fuerza lateral <i>C₂</i> Con <i>T</i> >4.5 sec	$(3.375 S) / T^2$	0.10	--
Peso total de la pared del tanque <i>W_s</i>		189.5	Kips
Centroide de la pared del tanque <i>X_s</i>		20.17	Pies
Peso total del techo del tanque <i>W_r</i>		150	Kips
Altura total de la pared del tanque <i>H_r</i>		46	Pies
Peso del contenido (<i>W_c</i>)		16,086	Kips
Relación <i>W₁/W_T</i>		0.45	--
Relación <i>W₂/W_T</i>		0.5	--
Relación <i>X₁/H</i>		0.38	--
Relación <i>X₂/H</i>		0.56	--
Peso <i>W₁</i>		7,239	Kips
Peso <i>W₂</i>		8,043	Kips
Altura <i>X₁</i>		15.20	Kips
Altura <i>X₂</i>		22.40	Kips
Momento de volteo por sismo (<i>M_s</i>)		36,434	Kips-Pie
Fuerza lateral sismo (<i>P_T</i>)		2,152	Kips
Espesor del fondo sin CA	3/8" - 2(1/16")	1/4	Plg
Esfuerzo de fluencia del fondo		36,000	PSI
Contenido del tanque estabilizante (<i>w_L</i>)	$7.9 t_b (F_{bv} G H)^{0.5}$	2,107	Lbs/Pie
		2.11	Kip/Pie
No mayor que	1.25 G H D	4,023	Lbs/Pie
Circunferencia del tanque (<i>C</i>)	$D\pi$	320	Pies
Contenido total estabilizante	$C \times w_L$	674	Kips
Peso total estabilizante (<i>W_T</i>)	$W_s + W_r + W_b + wLC$	1,139	Kips
Brazo de momento estabilizante	$D / 2$	50.93	Pies
Momento estabilizante (<i>M_s</i>)	$W_T * D / 2$	57,979	Kips-Pie
μ s del fondo del tanque y suelo		0.4	--
Fricción resistente al deslizamiento (<i>F_f</i>)	$\mu_s * (W_T - w_L C + W_C)$	6,620	Kips
Factor de resistencia al volteo	M_s / M_s	1.59	--
Factor de resistencia al deslizamiento	P_T / F_f	3.08	--

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

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

$$\frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} \leq 0.785$$

Entonces:

$$b = w_t + \frac{1.273M_s}{D^2}$$

Si:

$$0.785 < \frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} \leq 1.5$$

b puede ser calculada a partir del siguiente parámetro y del gráfico No. 4.

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

Por último, si:

$$1.5 < \frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} \leq 1.57$$

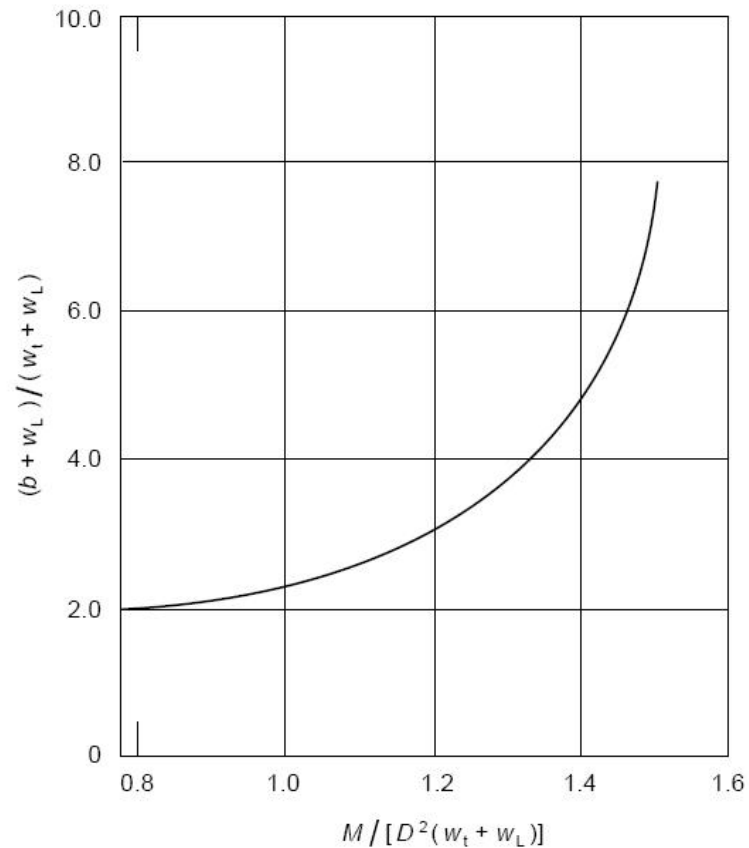
b se obtiene a partir de:

$$\frac{b + w_L}{w_t + w_L} = \frac{1.490}{1 - \frac{0.637M_s}{D^2(w_t + w_L)}}$$

Donde:

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

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

Gráfico No. 4: Fuerza compresiva b 

Si:

$$\frac{M_s}{D^2(w_t + w_L)} > 1.57 \quad \text{ó} \quad \frac{b}{12t} > F_a$$

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

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

$$b = w_t + \frac{1.273M_s}{D^2}$$

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

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

Pero si:

$$\frac{GHD^2}{t^2} < 10^6 \quad \blacktriangleright \quad F_a = \frac{10^6 t}{2.5D} + \sqrt{GH}$$

Sin embargo, F_a nunca debe de ser mayor que $0.5F_{ty}$, donde:

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

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

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

Tabla No. 13: Resumen del cálculo de fuerzas compresivas

RENGLON	PROCEDIMIENTO	VALOR	UNIDAD
Relación	$M_s/[D^2(w_t+w_L)]$	1.11	--
$0.785 < M_s/[D^2(w_t+w_L)] < 1.5$	ver tabla	--	--
Interpolando y despejando b	6600		lbs-pie
Espesor de la parte baja de la pared sin CA	7/16"-1/16"	3/8"	Pulgada
Esfuerzo en pared (f_a)	$b/(12t)$	1,467	PSI
Parametro	GHD^2/t^2	2,331,023	
Parametro Mayor que 10^6			
Esfuerzo permisible en compresión (F_a)	$(106t)/(2.5D)+600(GH)^{0.5}$	4,845	PSI

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

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

Los anclajes serán diseñados para que resistan cada uno de los casos de carga especificados en la tabla No. 14. La carga por anclaje será calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$t_b = U/N$$

Donde:

t_b = carga por anclaje,

U = carga neta de levantamiento,

N = numero de anclajes,

P = presión de diseño en pulgadas de columna de agua,

P_t = presión de prueba en pulgadas de columna de agua,

P_f = presión de falla en pulgadas de columna de agua,

- t_h = espesor de las planchas del techo en pulgadas,
 W_1 = carga muerta de la pared excluyendo ca en lbs,
 W_2 = carga muerta de la pared y el techo, excluyendo ca, en lbs,
 W_3 = carga muerta de la pared incluyendo ca.

Tabla No. 14: Cargas de levantamiento

Caso de carga de levantamiento	Formula de levantamiento neto	Esfuerzo permisible del perno de anclaje (PSI)
Presión de diseño	$[(P - 8t_h) \times D^2 \times 4.08] - W_1$	15,000
Presión de prueba	$[(P_t - 8t_h) \times D^2 \times 4.08] - W_1$	20,000
Presión de falla	$[(1.5 \times P_f - 8t_h) \times D^2 \times 4.08] - W_3$	F_y
Carga de viento	$[4 \times M_w / D] - W_2$	$0.8 \times F_y$
Carga de sismo	$[4 \times M_s / D] - W_2$	$0.8 \times F_y$
Presión de diseño + viento	$[(P - 8t_h) \times D^2 \times 4.08] + [4 M_w / D] - W_1$	20,000
Presión de diseño + sismo	$[(P - 8t_h) \times D^2 \times 4.08] + [4 M_s / D] - W_1$	$0.8 \times F_y$

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

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

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

I. Resumen del diseño

Los resultados del diseño realizado en el ejemplo se resumen en la tabla No. 15.

Tabla No. 15: Resumen de diseño

1.0 DIMENSIONES	
Diámetro nominal	101.85 Pies
Circunferencia	320.00 Pies
Alto de pared	46.00 Pies
Alto de techo	12.75 Pies
Altura total	58.73 Pies
Pendiente del techo	25%
2.0 FONDO	
Distribución de planchas	A tope con juntas soldadas
Espesor	3/8 de Pulgada
3.0 PAREDES	
Carrera 1	6 pies de alto x 1/4 de pulgada de espesor
Carrera 2	8 pies de alto x 1/4 de pulgada de espesor
Carrera 3	8 pies de alto x 1/4 de pulgada de espesor
Carrera 4	8 pies de alto x 5/16 de pulgada de espesor
Carrera 5	8 pies de alto x 3/8 de pulgada de espesor
Carrera 6	8 pies de alto x 7/16 de pulgada de espesor
Número de planchas por anillo	16 planchas de 20 pies
4.0 ALMACENAJE	
Capacidad	2,438,100 galones de etanol de alto grado
Nivel máximo de operación	40 Pies
Altura considerada para accesorios	6 pies
5.0 TECHO	
Techo primario	De armaduras radiales
Techo secundario	Flotante
Espesor de planchas del techo	1/4 de pulgada
6.0 CIMIENTO	
Altura	3 pies
Ancho	1 pie
Refuerzo de cero del concreto	6 varillas No 8
7.0 ANCLAJES	
Número de anclajes	No necesarios

J. Consideraciones Importantes

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

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

VIII. CONCLUSIONES

1. Los tanques superficiales cilíndricos de almacenamiento de líquidos bajo presión atmosférica son estructuras de acero que su finalidad es almacenar fluidos de manera segura, práctica y eficiente por medio de la combinación adecuada de los elementos estructurales que los componen.
2. El flujo de información que debe existir entre el cliente y el diseñador debe ser bueno, ya que esto permite que el diseño se aplique mejor a los requerimientos del cliente y el cliente conozca los parámetros bajo cuales se diseña el tanque de almacenamiento.
3. La información recabada y establecida previo al diseño tal como el líquido a almacenar, capacidad del tanque y propiedades del suelo, es de mucha importancia ya que sobre estos datos es que se basa el diseño del tanque.
4. Sería muy difícil elaborar una guía que tratara todas las configuraciones de elementos que se podrían presentar en un tanque, ya que las combinaciones son muchas, y cada caso difiere significativamente del otro.

IX. RECOMENDACIONES

1. Antes de realizar cualquier diseño, se debe llevar a cabo el estudio de suelo, ya que éste definirá la capacidad del tanque e inclusive, la factibilidad de la construcción del mismo ya que si se pronostica un mal suelo, puede que las medidas precautorias sean económicamente prohibitivas.
2. Realizar un estudio previo de los materiales que se encuentran disponibles en el mercado, para así utilizar los que le den mejores resultados al cliente y al comprador, en términos de economía, resistencia, y disponibilidad.
3. Debido a que muchas veces las especificaciones y necesidades del cliente cambian durante el transcurso de un proyecto, éste tiene que hacérselas saber al diseñador para que éste las considere y aplique, de lo contrario podría producirse un diseño deficiente por falta de información.
4. Establecer claramente la función de servicio del tanque, ya que puede darse el caso que un tanque se utilice primero para almacenar un líquido, pero posteriormente cambiar a otro. Esto implica que el tanque debe ser diseñado para ambos casos y basar el diseño bajo las condiciones críticas, ya que un tanque que almacena un líquido no necesariamente cumple con los criterios para almacenar otro.

X. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Comité 318 (2001). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. E.E.U.U, ACI Journal. 670 págs.
- American Institute of Steel Construction. *Manual of Steel Construction Allowable Stress Design*. 2ª Revisión de la 9ª Edición. E.E.U.U. AISC, Inc.
- American Petroleum Institute. 2003. *Welded Steel Tanks for Oil Storage; API Standard 650*. 10a edición. E.E.U.U. API.
- Cheremisinoff, Paul N. 1996. *Storage Tanks*. 1ª edición. E.E.U.U. Gulf Publishing Company. 303 Páginas.
- Gaylord, Edwin H. Jr. y Gaylord, Charles N. 1968. *Structural Engineering Handbook*. E.E.U.U. McGraw Hill.
- Gordon, James Edward. 1978. *Structures Or Why Things Don't Fall Down*. 1ª edición. E.E.U.U. Da Capo Press Inc. 395 Páginas
- *Storage Tanks*. <http://www.wikipedia.com>

XI. ANEXOS

Figura No. 9: Tanque atmosférico



Figura No. 10: Tanque cilíndrico con tapas elipsoidales



Figura No. 11: Tanque esférico de almacenamiento de gases



Figura No. 12: Tanque refrigerado



Figura No. 13: Tanque con techo cónico



Figura No. 14: Tanque con techo de domo

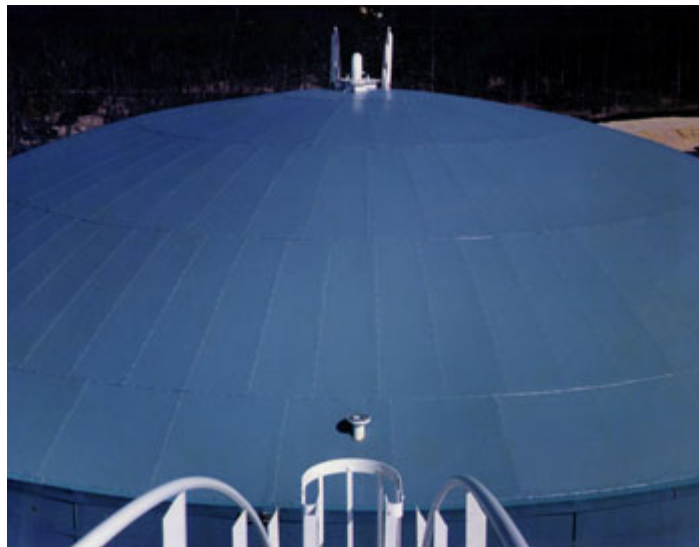


Figura No. 15: Tanque con techo de sombrilla (nótese los quiebres en el domo)



Figura No. 16: Tanque con techo flotante externo

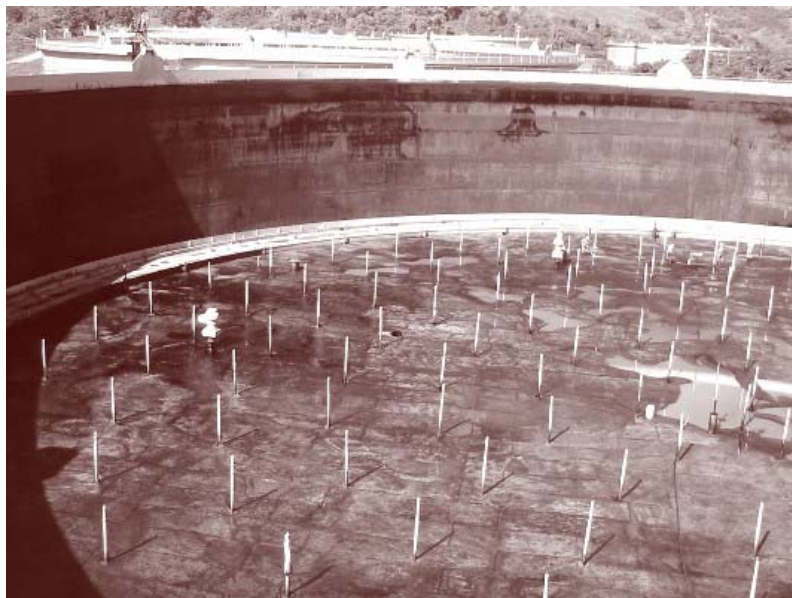


Figura No. 17: Tanque con techo flotante interno y techo cónico soportado por armaduras

