

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO
RING-WALL DE LOS TANQUES METÁLICOS DE ALMACENAMIENTO
SEGÚN NORMA API-650

LEONARDO CARDILES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DEL SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO
RING-WALL DE LOS TANQUES METÁLICOS DE ALMACENAMIENTO
SEGÚN NORMA API-650

LEONARDO CARDILES

Trabajo de monografía para optar al título de Especialista en estructuras

Director

ÁLVARO VIVIESCA JAIMES

Ingeniero civil, M.Sc., Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DEL SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS.....	12
1.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
2. MARCO TEÓRICO	13
3.1. CARGAS	13
3.2. RESPUESTA DINÁMICA Y EFECTO HIDRODINÁMICO	16
3. DESCRIPCIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA FUNDACIÓN TIPO RING-WALL	18
3.1. DATOS DE ENTRADA.....	18
3.2. DEFINICIÓN DE LAS CARGAS.....	21
3.2.1. Carga muerta.....	21
3.2.2. Cargas por presión interna y externa	22
3.2.3. Carga de viento	23
3.2.4. Carga por sismo	24
3.3. CRITERIOS DE ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO	28
3.3.1. Estabilidad al volcamiento por viento para tanques no anclados (API-650 numeral 5.11.2).....	29
3.3.2. Estabilidad al levantamiento por carga sísmica (API-650 numeral E-6.2.1) ..	29
3.3.3. Estabilidad al levantamiento por presión interna	31
3.4. CRITERIOS DE ESTABILIDAD PARA TANQUES ANCLADOS	31
3.5. ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO PARA TANQUES CON PRESIÓN INTERNA < 2.5 PSI	33
3.6. ESTABILIDAD AL DESLIZAMIENTO Y AL VOLCAMIENTO	34
3.7. REVISIÓN CAPACIDAD PORTANTE	35
3.8. DISEÑO REFORZAMIENTO DEL RING-WALL	36

3.8.1.	Cuantías mínimas de refuerzo.....	38
3.8.2.	Diseño por cortante	38
3.9.	EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	39
4.	CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS.....	75
5.	CONCLUSIONES	78
	BIBLIOGRAFÍA.....	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Asentamientos máximos permitidos (Tomado del API-650)	19
Tabla 2. Factor de importancia (Tomado del API-650)	24
Tabla 3. Factor de reducción de respuesta sísmica (Tomado del API-650)	26
Tabla 4. Relación de anclaje J (Tomado del API-650)	30

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Espectro sísmico de diseño (Tomado de ASCE 7-10).....	15
Figura 2. Modelo matemático de la respuesta dinámica del sistema líquido-tanque....	16
Figura 3. Coeficiente C_i para el período impulsivo	18
Figura 4. Estabilidad por carga de viento para tanques no anclados (Tomado del API-650)	24
Figura 5. Fuerzas que intervienen en la estabilidad del conjunto tanque-fundación	34
Figura 6. Combinaciones de carga para condiciones de servicio (Tomado del API-650)	35
Figura 7. Diagrama de cuerpo libre para determinar el Twist moment (Tomado del Process Industry Practices).....	37
Figura 8. Hoja de datos mecánica – Datos generales	40
Figura 9. Hoja de datos mecánica – Arreglo general	40
Figura 10. Hoja de datos mecánica – Detalle anclaje	40
Figura 11. Geometría de la fundación para el tanque.....	50
Figura 12. Geometría de la fundación y refuerzos.....	74
Figura 13. Conformación cónica del relleno para compensación de asentamiento	75
Figura 14. Detalle para cleanout cuando el tanque se soporta en un ring-wall	76

RESUMEN

TÍTULO: GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO RING-WALL DE LOS TANQUES METÁLICOS DE ALMACENAMIENTO SEGÚN NORMA API-650 *

AUTOR: LEONARDO CARDILES **

PALABRAS CLAVES: Modos de vibración, Hojas de datos, Presión interna, Fuerza 'Hoop tension', Momento 'Twist Moment', ring-wall, relación de anclaje.

DESCRIPCIÓN: La fundación anular o ring-wall para un tanque de almacenamiento metálico circular busca igualar dos presiones: aquellas ejercidas al suelo a causa del peso del producto almacenado y aquellas ejercidas por el peso propio del tanque y el techo sobre la misma fundación. Adicionalmente, el sismo, el viento y las presiones internas incrementan las sollicitaciones sobre la fundación y el suelo.

El objetivo del presente trabajo consiste en el planteamiento de una guía para describir la secuencia en el diseño de la cimentación tipo fundación anular o ring-wall para tanques de almacenamiento metálicos bajo los parámetros de diseño y exigencias del API-650 y teniendo en cuenta, primordialmente, el efecto hidrodinámico de la carga sísmica de diseño sobre el tanque y los análisis de estabilidad por levantamiento por presión interna, viento y sismo.

Se ilustra cómo se emplea la guía en el diseño de la fundación para un caso real de aplicación de un tanque con presión interna ubicado en el municipio de Acacias, Meta, empleando el método de esfuerzos de trabajo para el análisis y las revisiones de estabilidad al deslizamiento, volcamiento, levantamiento y capacidad portante del suelo e implementando el método de la resistencia última para el diseño del concreto reforzado. Los tanques con presión interna generalmente resultan con fundaciones de dimensiones mayores a los tanques sometidos únicamente a presión atmosférica.

Finalmente se dan algunas recomendaciones de tipo constructivo con el fin de garantizar la estabilidad durante el montaje y construcción como durante la vida útil del tanque.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela Ingeniería Civil. Director M. Sc. Ph. D. Álvaro Viviescas Jaimes.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGICAL DESIGN GUIDE FOR RING-WALL FOUNDATIONS FOR STEEL STORAGE CIRCULAR TANKS AS PER API-650*

AUTHOR: LEONARDO CARDILES **

KEY WORDS: Vibration modes, spreadsheets, internal pressure, Hoop tension, Twist Moment, ring-wall, anchorage ratio.

DESCRIPTION: Ring-wall foundations for storage steel circular tanks are intended to transmit and resist pressures caused by self weights of the product, the circular shell and the roof. Furthermore, earthquakes, wind and internal pressures are combined with self-weights to increase stresses that foundation and soil are requested to hold.

The objective of this work is to develop a step by step guide for designing ring-wall foundations for storage steel circular tanks as per API-650's requirements and parameters focused on the effect of hydrodynamic loads generated by seismic loads and stability analysis including internal pressure up-lift, wind and earthquake loads.

It includes an explanation of how to use the design guide through an application example of a tank with internal pressure located in Acacias, Meta, using allowable stress design method to check stability, overturning, uplift and soil pressure conditions and load and resistance factor design method to calculate the reinforcement for a concrete ring foundation. Tanks with internal pressure generally need bigger foundations than those with only atmospheric pressure.

Finally, constructive recommendations are given in order to guarantee stability during erection, construction and tank's operation period.

* Bachelor work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director M. Sc. Ph. D. Álvaro Viviescas Jaimes.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la industria del Oil & Gas, con plantas industriales, refinerías, estaciones de bombeo y almacenamiento donde son necesarios los tanques conformados por láminas de acero al carbón hace importante divulgar los métodos y criterios de diseño de los tipos de cimentación para los tanques de gran diámetro; esto aunado a que en los programas de pregrado universitarios de Ingeniería Civil en Colombia o no se menciona el diseño del tipo de cimentación mencionado, o se trata de una manera informativa; por lo tanto, se hace necesario establecer una guía metodológica que permita a los estudiantes y profesionales vinculados al diseño de facilidades para la industria Oil & Gas u otros segmentos de aplicación, abordar el problema del diseño y análisis de cimentación de tanques metálicos de almacenamiento de una manera clara, secuencial y acorde con el cumplimiento de la normativa vigente complementándolo con las buenas prácticas de la ingeniería civil y del sector energético.

La guía planteada no pretende ser un manual único e irrefutable acerca del diseño de cimentaciones tipo ring-wall; sino todo lo contrario, una divulgación de las buenas prácticas de la ingeniería a nivel local y mundial, que cumple con las exigencias mínimas dadas en el API-650, ASCE 7-10, y sea una base para los profesionales que recién enfrentan los problemas de diseño de estas fundaciones no convencionales, dado que requiere la interacción con otras disciplinas (Geotecnia, Ing. Eléctrica, Ing. Mecánica, Ing. química de procesos).

A futuro, se espera que esta guía sea complementada y generalizada a todos los casos posibles ilustrado con sus respectivos ejemplos de aplicación (cimentación con pilotes, tanques con presión interna alta mayor a 2.5 psi y/o con cubierta geodésica, anclaje mediante pernos posinstalados) o la comparación de la respuesta mediante el empleo de los métodos de análisis por elementos finitos.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una guía metodológica para el diseño de cimentaciones tipo Ring-Wall de tanques de almacenamiento según norma API-650.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Revisar la bibliografía referente al análisis y diseño de cimentaciones para tanques circulares.
- Establecer el método de diseño de este tipo de cimentaciones a la luz de las normativas vigentes (API-650, ASCE 7-10).
- Establecer la secuencia de análisis y diseño de las cimentaciones tipo ring-wall para tanques de almacenamiento estandarizados por el API-650.
- Realizar un análisis descriptivo por cada paso que establece la guía metodológica propuesta.
- Ilustrar con un caso 'real' (tanque de almacenamiento con presión atmosférica) la aplicación de la guía de diseño.

2. MARCO TEÓRICO

La cimentación tipo ring-wall para un tanque circular de almacenamiento busca igualar tanto la presión de contacto al nivel de desplante de la fundación (las cuales se generan por el peso de los shells, el techo del tanque y el peso propio de la fundación) como las presiones que se generan en el centro del tanque debido al peso del líquido contenido. La geometría de este tipo de fundaciones consiste generalmente en una sección rectangular con (o sin) zapata, según requerimientos de diseño, conformando longitudinalmente un anillo en concreto reforzado.

Aunque existen otras opciones de cimentación para tanques de almacenamiento, como las losas de fundación estas resultan onerosamente costosas en comparación con la cimentación tipo ring-wall; es por ello que se aplica como criterio general que, tanques de diámetro mayor a 8 m (50 pies), sean cimentados con este tipo de fundaciones. Para tanques de diámetros menores a 5.00 m se puede utilizar losas de fundación.

2.1. CARGAS

Carga muerta: La carga muerta corresponderá a los pesos propios de las partes que conforman el tanque metálico apoyado directamente en el ring-wall. Entre estas se tienen: Peso del techo, peso de las láminas que conforman el cuerpo del tanque, peso de la lámina de fondo, peso de los elementos misceláneos adosados interna y externamente al tanque (escaleras, barandas, boquillas, manholes, internos).

Carga por presión interna: Estas cargas son generadas por condiciones asociadas al proceso del sistema a la que esté integrado el tanque. Entre las cuales se identifican:

Presión interna de operación: La que normalmente estará presente durante la vida útil del sistema del tanque

Presión interna por prueba hidrostática: En el momento de realizar el comisionamiento antes de entrega y puesta en marcha del sistema del tanque, se realiza una prueba hidrostática con llenado del tanque con el fin de verificar la integridad de la instalación y montaje del tanque.

Presión interna a la falla: Presión teórica a la cual se verá sometida el tanque hasta alcanzar el límite de resistencia del sistema del tanque y sus elementos de conexión, juntas, costuras.

Cargas por fluido: Referente al peso del fluido contenido y, dependiendo de los niveles requerido por las condiciones de procesos, pueden presentarse hasta 4 casos: nivel bajo bajo (LLL), nivel bajo (LL), nivel alto HL, nivel alto alto (HHL). Adicionalmente, la masa del líquido definirá los modos de vibración principales y que representan el efecto hidrodinámico causado por la carga sísmica sobreimpuesta

Carga viva: Establecida por el API-650 y el ASCE 5-10 por un valor mínimo de 1KN/m² aplicada en el área horizontal proyectada del techo del tanque.

Carga de viento: Considera el efecto del viento sobre el tanque como una presión que varía con la altura y afectada por la ubicación geográfica y topográfica (exposición), importancia de la estructura o del equipo, la rugosidad (más referida a forma geométrica de la superficie del equipo o estructura).

De acuerdo al ASCE 7-10, la presión ejercida por el viento de diseño se estima mediante la expresión:

$$p = 0.00256K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I \cdot G_v \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

K_z : Coeficiente de exposición de acuerdo a ASCE 7-10 sección 6.5.6.6

K_{zt} : Coeficiente topográfico de acuerdo a ASCE 7-10 sección 6.5.7.2

K_d : Factor de direccionalidad de acuerdo a ASCE 7-10 sección 6.5.4.4

V : Velocidad de diseño

I : Factor de importancia de acuerdo a ASCE 7-10 sección 6.2

G : Factor efecto ráfaga para la exposición respectiva de acuerdo a ASCE 7-10 sección 6.5.4.4

Carga de sismo: Se evalúa el efecto del sismo mediante el análisis dinámico espectral (análisis estático) determinando las fuerzas de diseño (cortante y momento en la base) a partir de un espectro de diseño (ver Figura 1). Este espectro de diseño se elabora a partir de la zona sísmica en donde se encuentra ubicado el tanque, el perfil del suelo en el sitio y el factor de importancia correspondiente a la clasificación del grupo de uso asignada al equipo.

El período del tanque es determinado mediante el análisis hidrodinámico descrito en el numeral 3.2.

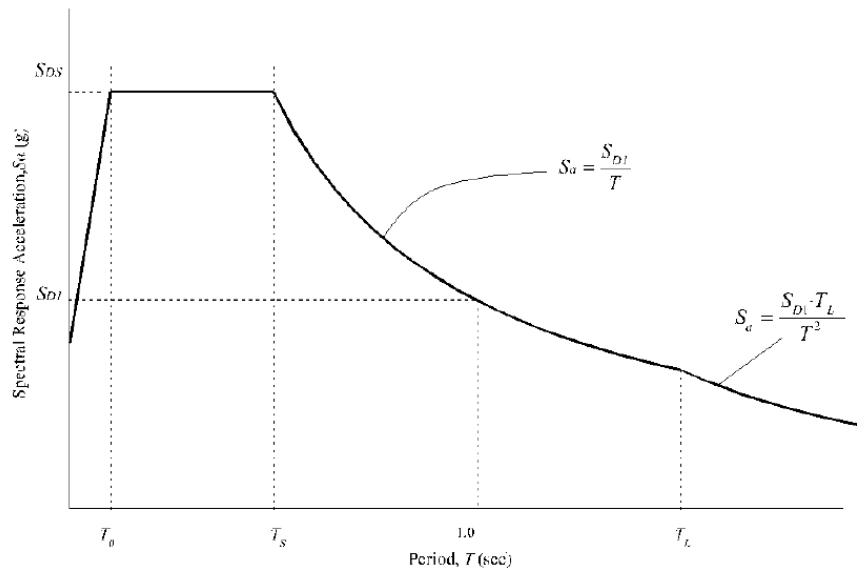


Figura 1. Espectro sísmico de diseño (Tomado de ASCE 7-10)

2.2. RESPUESTA DINÁMICA Y EFECTO HIDRODINÁMICO

El modelo matemático de la respuesta dinámica de un tanque y su contenido se puede representar bajo el esquema de masas aisladas conectadas por resortes que representan la rigidez respectiva (ver fig. 2). Bajo una excitación sísmica en la base del tanque, el líquido contenido tiende a responder en diversos modos de vibración, sin embargo la respuesta dinámica puede agruparse en el primer modo de vibración de los siguientes tipos, identificados principalmente el modo convectivo y el impulsivo:

- 1) Modo convectivo, la masa del contenido se desplaza más lenta (períodos largos) y es la que resulta del movimiento tipo oleaje y le corresponde la porción de la masa del líquido en la parte superior del tanque.
- 2) Modo impulsivo, la masa del contenido se desplaza con períodos de vibración similares a las paredes del tanque por lo que se acelera junto con el tanque. Le corresponde a la masa del líquido en el sector central e inferior del tanque.

Los anteriores modos resultan finalmente en las presiones hidrodinámicas ejercida a las paredes del tanque y transmitidas a la fundación

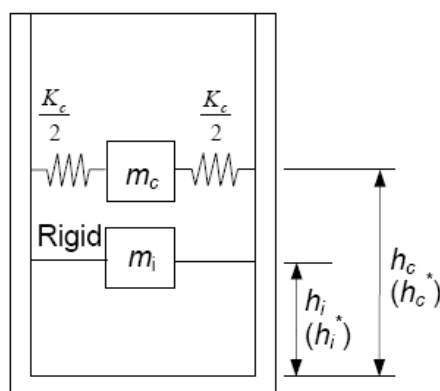


Figura 2. Modelo matemático de la respuesta dinámica del sistema líquido-tanque

A cada uno de estos modos de vibración se les puede determinar su respectivo período natural de vibración mediante las siguientes expresiones establecidas

en el API 650, las cuales parten del modelo matemático (ver figura 1) planteado por Housner (1985):

Para el período impulsivo

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \left(\frac{C_i \cdot H}{\sqrt{\frac{t_u}{\sqrt{D}}}} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} \right)$$

Para el período convectivo:

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.6g \cdot \tanh\left(\frac{3.6H}{D}\right)}}$$

Donde

C_i : Coeficiente para determinar el período impulsivo del sistema hidrodinámico

(Ver figura 3)

t_u : Espesor equivalente del cuerpo del tanque

H : Altura nominal del tanque

D: Diámetro nominal del tanque

ρ : Densidad del material del tanque

E: Módulo de elasticidad del material del tanque

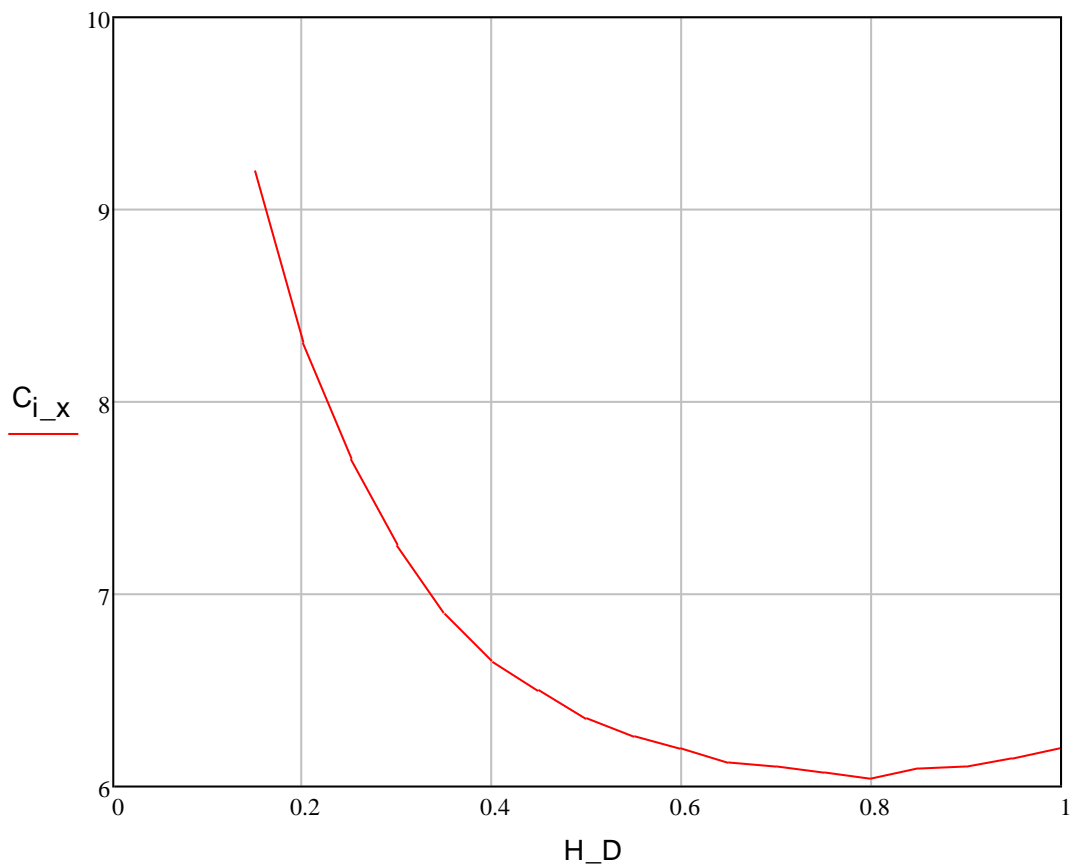


Figura 3. Coeficiente C_i para el período impulsivo

3. DESCRIPCIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA FUNDACIÓN TIPO RING-WALL

3.1. DATOS DE ENTRADA

Los datos iniciales que se requiere para definir la fundación de los tanques de almacenamiento son principalmente tres:

Estudio de suelos: dentro de este estudio se debe definir claramente la capacidad portante del sitio donde quedará emplazado el tanque, y deberá definir la capacidad tanto en la fundación ring-wall como en el interior del tanque donde quedará alojado el producto almacenado.

Con el fin de no generar sobre esfuerzos a las tuberías conectadas al tanque, esta capacidad portante estará limitada a un asentamiento diferencial máximo

de 12 mm (0.5 plg.) para tanques anclados y 25 mm para tanques autoportados. Ver tabla 1.

Condición	Desplazamiento de diseño ASD mm (in.)
Tanques mecánicamente anclados	
Asentamiento vertical por levantamiento relativo a los soportes del sistema de tubería o a la fundación	25 (1)
Desplazamiento vertical relativo a los soportes del sistema de tubería o a la fundación	13 (0.5)
Rango de desplazamiento horizontal (radial o tangencial) relativo al soporte o a la fundación	13 (0.5)
Tanques auto-soportados	
Asentamiento vertical por levantamiento relativo a los soportes del sistema de tubería o a la fundación:	
Relación de anclaje (J) menor o igual a 0.785	25 (1)
Relación de anclaje (J) mayor a 0.785	100 (4)
Desplazamiento vertical relativo a los soportes del sistema de tubería o a la fundación:	
Para tanques con una fundación tipo ring-wall o losa continua	13 (0.5)
Para tanques cimentados en una terraza	25 (1)
Rango de desplazamiento horizontal (radial o tangencial) relativo al soporte o a la fundación	50 (2)

Tabla 1. Asentamientos máximos permitidos (Tomado del API-650)

Además, se deben consignar los valores de: peso específico del suelo, ángulo de fricción interna, coeficiente fricción suelo-concreto.

Hojas de datos de procesos y mecánica: Los profesionales de ingeniería de procesos y de ingeniería mecánica suministran las hojas de datos (Data Sheets para el vocablo inglés) de procesos y mecánica respectivamente.

Hoja de datos de procesos: Deberá contener la información mínima de:

- Dimensiones y datos generales: Diámetro, Altura, capacidad de
- Almacenamiento, tipo y densidad del producto, con o sin presión interna y su respectivo valor
- Niveles de procesos:
 - LLL (Nivel más bajo de operación del tanque)
 - LL (Nivel bajo de operación del tanque)
 - NL (Nivel normal de operación del tanque)
 - HL (Nivel alto de operación del tanque)
 - HHL (Nivel más alto o máximo esperado en el tanque)

Hoja de datos de mecánica: Amplía y detalla aún más la información presentada en la hoja de datos de procesos tomando de base esta última. Se incluye, además de lo presentado en la de procesos:

- Dimensiones (espesor, ancho) y material de cada una de las láminas que conforman el tanque.
- Espesor de corrosión permitido para cada lámina del cuerpo, techo y fondo del tanque.
- Tipo y dimensiones del techo con su curvatura
- Presión interna tanto de diseño, prueba y operación
- Presión externa
- Dimensión y ubicación de las aberturas y manholes
- Ubicación y distribución de los pernos de anclaje
- Peso tanque vacío, en operación y prueba hidrostática.
- Fuerza total de levantamiento (Si aplica)
- Valores de cortante y momento por viento y sismo de diseño (deseable)

Planos de fabricación del tanque: Es la información del tanque ampliamente definida y es, en estricto, la que deberá usarse para el diseño de la fundación. Específica de manera definitiva y completamente los datos anteriormente listados en la hoja de datos mecánica. Adicionalmente, incluye:

Peso de los elementos misceláneos (escaleras, barandas, y elementos externos adosados.

Peso de los elementos internos del tanque (anillos internos, brazos, piernas, líneas de distribución).

Otros datos son requeridos con el fin de definir los sistemas de impermeabilización y aislamiento del tanque. Entre otros se tiene: estudios de protección catódica, requerimientos de operación y mantenimiento del tanque.

3.2. DEFINICIÓN DE LAS CARGAS

A partir de la información consignada en las hojas de datos mecánica o en los planos de fabricación se procede a determinar las distintas cargas mencionadas en el numeral 3.1.

Sin embargo, en muchas ocasiones el cliente solicita la entrega de los diseños y planos de construcción de la fundación mucho antes de que los planos de fabricación estén preparados con el fin de acelerar procesos de construcción, por lo que generalmente se usa la información de la hoja de datos mecánica y de procesos para estimar las cargas y dimensiones respectivas.

Es importante resaltar que, al usar la información de las hojas de datos mecánicas y de procesos, se debe aclarar al cliente que antes de proceder con la construcción de la cimentación se debe verificar la información que el fabricante del tanque posea con el fin de evitar inconvenientes constructivos o diseños subestimados.

Partiendo de este hecho general, en ciertas ocasiones la hoja de datos no posee la información de cargas de sismo o viento, y aún si las tuviera, se puede realizar un estimado con base a las indicaciones del API-650. A continuación se describe como realizar el estimativo de cargas para el análisis.

3.2.1. Carga muerta

La hoja de datos brinda la información del peso del tanque vacío, sin embargo se hace necesario para el análisis, contar con los pesos de techo, cuerpo y fondo:

Techo: dependiendo de su configuración (cónica, semiplana, geodésica, domo) se estima el área y con el espesor y el peso específico se evalúa el peso correspondiente.

Fondo: Con el diámetro nominal del tanque se estima el área y con el espesor y el peso específico se evalúa el peso correspondiente.

Cuerpo: Generalmente el cuerpo del tanque consiste en espesores de lámina que van decreciendo en su grosor desde la lámina más inferior hasta la superior, por lo que se requiere (para practicidad en los cálculos posteriores del momento bajo carga sísmica) estimar un espesor promedio del cuerpo del tanque. Esto se determina realizando un promedio ponderado mediante la sumatorio de los productos del espesor, centroide y ancho de cada lámina dividido entre la sumatoria de los productos de centroide y el ancho de cada lámina. Con el espesor promedio, el diámetro y altura nominal del tanque y el peso específico se evalúa el peso correspondiente.

Peso de los misceláneos e internos: En caso de que las hojas de datos no lo especifiquen, se recomienda asumir entre 20% - 30% del peso del tanque vacío, para asignarle el peso a los elementos misceláneos e internos.

3.2.2. Cargas por presión interna y externa

Generalmente, las presiones que no se especifican en la hoja de datos es la presión de falla, la cual puede estimarse por API-650 numeral F.6 como:

$$P_f = 1.6 \cdot P - \frac{0.000746 D_{LR}}{D^2}$$

donde,

P_f : Presión a la falla

P : Presión interna de diseño

D_{LR} : Peso de la lámina de techo y sus elementos estructurales adosados

D : Diámetro nominal del tanque

Finalmente, las cargas por presión interna (sea cual fuere) y externas se obtienen multiplicando el valor de dichas presiones por el área en planta del tanque (considerando el diámetro nominal del mismo). Las cargas obtenidas se denominan cargas de levantamiento 'uplift' y permiten el chequeo de estabilidad del tanque y de la fundación bajo esta sollicitación.

3.2.3. Carga de viento

La estimación de la carga de viento sobre el tanque se realiza por el método analítico plateado en ASCE 7-10, mediante la Ec. 1.

Determinada la presión de diseño, se evalúa la carga horizontal sobre las paredes del tanque (P_{WS}) y la carga 'uplift' sobre el techo (P_{WR}) como sigue:

$$P_{WS} = 0.86 \left(\frac{V}{190} \right)^2$$

$$P_{WR} = 1.44 \left(\frac{V}{190} \right)^2$$

Posteriormente con las áreas proyectadas del cuerpo del tanque y del techo, respectivamente, se tienen las cargas totales horizontal y de levantamiento 'uplift' sobre dichas superficies.

De acuerdo con la figura 4, con las cargas anteriormente calculadas y tomando un punto para realizar el equilibrio de momentos rotacionales servirá para realizar los chequeos de estabilidad para la sollicitaciones del viento en condición no anclada del tanque. Así mismo, la suma de ambos momentos de volcamiento (horizontal y uplift) aplicada sobre el perímetro del tanque permite establecer la sobrecarga por viento por metro lineal en la fundación del ring-wall:

$$w_v = \frac{4 \cdot M_{v_total}}{\pi \cdot D^2}$$

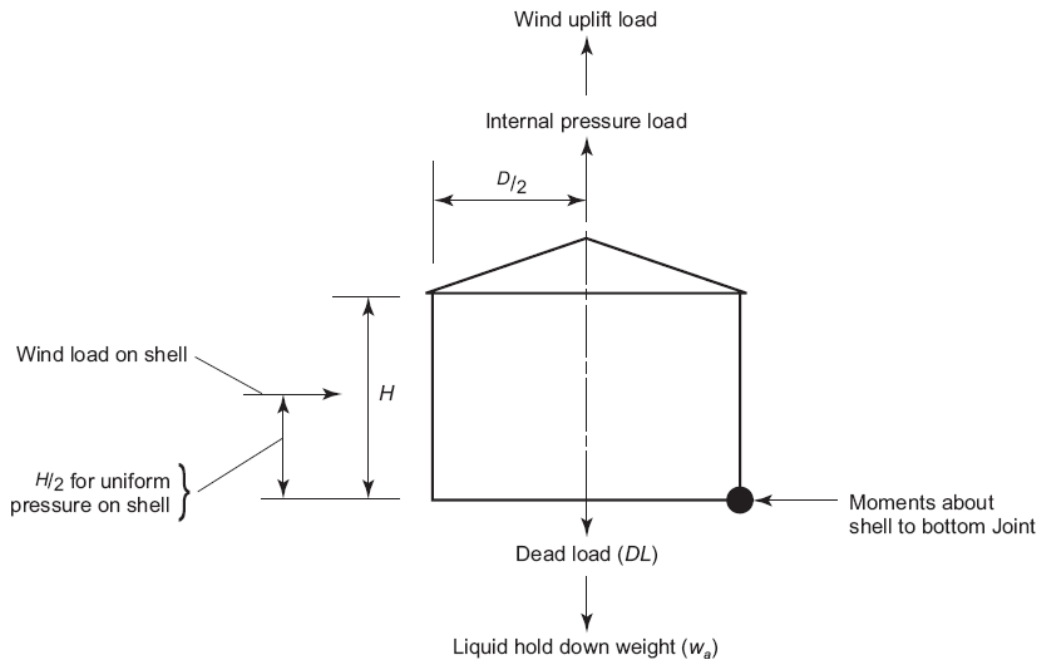


Figura 4. Estabilidad por carga de viento para tanques no anclados (Tomado del API-650)

3.2.4. Carga por sismo

Para determinar las cargas sísmicas se procede como sigue:

- I. Se determina el coeficiente de Importancia basada en la tabla 2

Grupo de uso	Coeficiente de importancia
I	1.0
II	1.25
III	1.5

Tabla 2. Factor de importancia (Tomado del API-650)

El **grupo de uso III**, se refieren a los tanques que deben brindar un esencial servicio a las facilidades para asistir en salud y recuperar vidas posterior a un evento sísmico; o aquellos tanques que almacenan cantidades importantes de sustancias altamente tóxicas y que no poseen un sistema primario de contingencia en caso de derrame que prevenga una exposición al público y medio ambiente.

El **grupo de uso II**, se refieren a los tanque que pueden contener sustancias peligrosas en caso de exposición pública y carecen de control secundario en caso de derrame; o tanques que brindan servicio a grandes facilidades.

Aquellos tanques que no clasifican en el grupo de uso III y II, se categorizan en el **grupo de uso I**.

- II. Basado en la zona sísmica donde esté ubicado el tanque se determina los coeficientes de aceleración y velocidad pico efectiva A_a y A_v
- III. Con el tipo de perfil suelo establecido por el ingeniero geotecnista, se determina los coeficientes F_a y F_v
- IV. Se determina los valores de período corto y período largo, T_C y T_L respectivamente.

$$T_S = 0.48 \cdot \frac{A_v \cdot F_v}{A_a \cdot F_a}$$

$$T_L = 2.4F_v$$

- V. Con los parámetros resueltos de los 4 puntos anteriores, es posible determinar los valores de aceleración para el modo impulsivo y convectivo considerando los correspondientes períodos descritos en el numeral 3.2.

Modo impulsivo

$$A_{imp} = 2.5 \cdot Q \cdot F_a \cdot A_a \cdot I$$

Modo convectivo

Para $T_C \leq T_L$

$$A_{conv} = 2.5 \cdot k \cdot Q \cdot F_a \cdot S_0 \cdot \left(\frac{T_S}{T_{conv}} \right) \cdot I$$

Para $T_C > T_L$

$$A_{conv} = 2.5 \cdot k \cdot Q \cdot F_a \cdot S_0 \cdot \left(\frac{T_S \cdot T_L}{T_{conv}^2} \right) \cdot I$$

Donde $K=1.5$ para espectro de aceleración con amortiguamiento del 5% del crítico

- VI. Para obtener las fuerzas sísmicas de diseño se debe aplicar un factor de modificación de respuesta. El API-650 utiliza el método de diseño por esfuerzos de trabajo (método ASD); en ese sentido se aplican los factores que se muestran en la tabla 3

Sistema de anclaje	R_{wi} , Impulsivo	R_{wc} , Convectivo
Autosoportado	3.5	2.0
Anclado Mecánicamente	4.0	2.0

Tabla 3. Factor de reducción de respuesta sísmica (Tomado del API-650)

- VII. En la estimación de las solicitaciones sísmicas deben tener en cuenta la masa efectiva que participa con las paredes del tanque durante la excitación sísmica. Esta masa efectiva está directamente relacionada con las propiedades geométricas del tanque (relación H/D), la intensidad del sismo, y las propiedades físicas del producto.

Cuando $\frac{D}{H} \geq 1.333$, el peso efectivo del modo impulsivo se define como

$$W_{imp} = \frac{\tanh\left(0.866 \cdot \frac{D}{H}\right)}{0.866 \cdot \frac{D}{H}} \cdot W_p$$

Cuando $\frac{D}{H} < 1.333$, entonces

$$W_i = \left(1 - 0.218 \cdot \frac{D}{H}\right) \cdot W_p$$

Para el modo convectivo, el peso efectivo correspondiente se estima como

$$W_{conv} = 0.230 \cdot \frac{D}{H} \cdot \tanh\left(\frac{3.67 \cdot H}{D}\right) \cdot W_p$$

donde, W_p es el peso total del producto

VIII. Adicionalmente, para cada fuerza sísmica impulsiva o convectiva le corresponde un centro de acción donde se aplica la correspondiente componente de fuerza horizontal. Esta se evalúa como sigue:

Cuando $\frac{D}{H} \geq 1.333$, la altura desde la base del tanque para la fuerza impulsiva se define como

$$X_i = 0.375 \cdot H$$

Cuando $\frac{D}{H} < 1.333$, entonces

$$X_i = \left(0.5 - 0.094 \cdot \frac{D}{H} \right) \cdot H$$

Para la fuerza convectiva, la altura del centro de acción corresponde a

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

IX. Cortante basal de diseño: Se evalúa el cortante sísmico bajo la combinación de las fuerzas impulsivas y convectivas; para ello se recomienda utilizar el método SRSS. Por consiguiente,

$$V_{\text{imp}} = A_i \cdot (W_{\text{imp}} + W_r + W_f + W_t)$$

$$V_{\text{conv}} = A_c \cdot W_{\text{conv}}$$

por lo tanto,

$$V = \sqrt{\left[A_i \cdot (W_{\text{imp}} + W_r + W_f + W_t) \right]^2 + \left(A_c \cdot W_{\text{conv}} \right)^2}$$

donde

W_r : Peso del techo

W_f : Peso del fondo

W_t : Peso del cuerpo

X. Momento total en la base: Así mismo, para obtener el momento sísmico de volcamiento en la base del tanque, se realiza la combinación SRSS

de cada una de las fuerzas horizontales aplicadas en su centro de acción por el correspondiente brazo de momento con respecto a la base

$$M = \sqrt{[A_i \cdot (W_{imp} \cdot X_{imp} + W_r \cdot X_r + W_t \cdot X_t)]^2 + (A_c \cdot W_{conv} \cdot X_{conv})^2}$$

donde

X_r : Centro de acción del techo medido desde la base del tanque

X_t : Centro de acción del cuerpo medido desde la base del tanque del tanque.

- XI. Aceleración sísmica vertical: El valor de la aceleración sísmica vertical se estima como
- XII. Con el fin de considerar la simultaneidad de las fuerzas sísmicas horizontales y verticales, el API-650 combina el 100% de la carga sísmica horizontal y el 40% de la vertical; esto es, porque el 100% de la carga vertical no ocurre al mismo tiempo que la horizontal.

$$A_{vert} = \frac{2}{3} \cdot 0.7 \cdot (2.5 \cdot Q \cdot F_a \cdot A_a \cdot I)$$

3.3. CRITERIOS DE ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO

Según los requerimientos de estabilidad que se requiera evaluar para el tanque y su fundación, se deben cumplir los siguientes criterios:

3.3.1. Estabilidad al volcamiento por viento para tanques no anclados (API-650 numeral 5.11.2)

$$a) 0.6M_w + M_{Pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR}$$

$$b) M_w + F_p \cdot M_{Pi} < \frac{M_{DL} + M_F}{2} + M_{DLR}$$

$$c) M_w + F_p \cdot M_{Pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR}$$

donde

M_w : Momento de volcamiento en la base del tanque y el punto de unión con el cuerpo, a causa de la fuerza horizontal y 'uplift' del viento.

M_{Pi} : Momento de volcamiento en la base del tanque y el punto de unión con el cuerpo, a causa de la presión interna de diseño.

M_{DL} : Momento en la base del tanque y el punto de unión con el cuerpo, a causa del peso nominal del cuerpo del tanque.

M_{DLR} : Momento en la base del tanque y el punto de unión con el cuerpo, a causa del peso nominal del techo del tanque y sus elementos adosados.

M_F : Momento en la base del tanque y el punto de unión con el cuerpo, a causa del peso del producto almacenado en el tanque.

F_p : Factor de combinación por presión interna. Es la relación entre la presión interna de operación contra la presión de diseño, pero mínimo de 0.4.

Si no se cumple las anteriores condiciones, el tanque requerirá sistema de anclaje a la fundación

3.3.2. Estabilidad al levantamiento por carga sísmica (API-650 numeral E-6.2.1)

Para este caso, se evalúa el criterio de la relación de anclaje J descrito en la tabla 4.

Relación de Anclaje J	Criterio
$J \leq 0.785$	Levantamiento no calculado bajo momento de volcamiento por sismo de diseño. El tanque es auto-soportado
$0.785 < J \leq 1.54$	Tanque se levanta, pero es estable bajo las cargas de diseño cumpliendo con los requerimientos de compresión límite a las paredes del tanque. El tanque es auto-soportado
$J > 1.54$	EL tanque no es estable y la condición de auto-soportado no se satisface bajo las cargas de diseño. Se debe anclar mecánicamente

Tabla 4. Relación de anclaje J (Tomado del API-650)

La relación de anclaje J, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 [w_t \cdot (1 - 0.4A_{vert}) + w_a - 0.4w_{int}]}$$

donde,

M_{rw} : Momento de volcamiento por sismo actuando en la base del cuerpo del tanque a lo largo del perímetro

w_t : Peso del cuerpo y del techo por metro lineal actuando en la base del tanque a lo largo del perímetro

w_a : Fuerza por metro lineal resistente al levantamiento aplicada en base del anillo del tanque

w_{int} : Carga de levantamiento por presión de diseño por metro lineal de circunferencia del tanque

Así mismo, w_a (porción del contenido que sirve para contrarrestar la fuerza de levantamiento ejercida por el momento de volcamiento del sismo) se calculan como sigue:

w_a : mínimo valor entre $99t_a \cdot \sqrt{F_y \cdot H \cdot \gamma_e}$ y $201.1 \cdot H \cdot D \cdot \gamma_e$

$$w_t = \frac{W_s}{\pi \cdot D} + w_{rs}$$

donde

w_{rs} : Carga del techo aplicada en la base del cuerpo del tanque por metro lineal de la circunferencia del tanque incluyendo el 10% de la carga de nieve especificada

3.3.3. Estabilidad al levantamiento por presión interna

El tanque debe poseer suficiente contrapeso para contrarrestar el levantamiento ocasionado por las presiones internas a la que está sometido. Para ello se deben cumplir los siguientes criterios:

- a) $W_{pi} < W_{cs} + W_{cr}$
- b) $W_{pi_t} < W_s + W_r + W_{misc}$

donde

W_{pi} : Peso total por presión interna de diseño

W_{pi_t} : Peso total por presión de prueba

W_{cs} : Peso total del cuerpo del tanque corroído

W_{cr} : Peso total del techo corroído

W_s : Peso del cuerpo del tanque de fabricación

W_r : Peso del techo del tanque de fabricación

W_{misc} : Peso de los internos del tanque

3.4. CRITERIOS DE ESTABILIDAD PARA TANQUES ANCLADOS

En caso de que los numerales 4.3.1, 4.3.2 o 4.3.3 no se satisfagan, es requerido que el tanque sea anclado a la fundación, por lo que el peso propio

de esta contribuirá como lastre para evitar el levantamiento del tanque. El API-650 (numeral 5.12) exige para ello que el peso del tanque, el peso del producto sobre la fundación y el peso propio de la fundación sean mayores a las combinaciones descritas en la Tabla 5. De igual manera estas combinaciones corresponderán a la fuerza de levantamiento que los pernos embebidos en la fundación deberán asumir para garantizar el correcto anclaje. La resistencia permisible de los pernos se establece en la tercera columna de la tabla mencionada. La fuerza que asume cada perno es:

$$t_b = \frac{U}{N}$$

Donde U es la máxima carga de levantamiento para los casos presentados en al tabla 5, N es el número de pernos.

El número de pernos son mínimo 4 y su máximo espaciamiento no debe superar los 3 metros circunferenciales.

Para el diseño de los pernos deberá tenerse en cuenta el diámetro nominal menos alguna corrosión permitida. Como recomendación se sugiere usar un diámetro mínimo a especificar en el diseño en 25 mm incluyendo la correspondiente corrosión.

Caso de carga para levantamiento	Carga de levantamiento Neto, U (N)	Esfuerzo permisible para los pernos de anclaje (MPa)
Presión de diseño	$(P - 0.08t_h) \cdot D^2 \cdot 785 - W_1$	$5/12x F_y$
Presión de prueba	$(P_t - 0.08t_h) \cdot D^2 \cdot 785 - W_1$	$5/9x F_y$
Presión a la falla	$(1.5 \cdot P_f - 0.08t_h) \cdot D^2 \cdot 785 - W_3$	F_y
Carga de viento	$P_{WR} \cdot D^2 \cdot 785 + \left(4 \cdot \frac{M_{WH}}{D}\right) - W_2$	$0.8x F_y$
Carga sísmica	$4 \cdot \frac{M_{rw}}{D} - W_2 \cdot (1 - 0.4A_v)$	$0.8x F_y$
Presión de diseño + Viento	$(F_p \cdot P + P_{WR} - 0.08t_h) \cdot D^2 \cdot 785 + 4 \cdot \frac{M_{WH}}{D} - W_1$	$5/9x F_y$

Presión de diseño + sismo	$(F_p \cdot P - 0.08t_h) \cdot D^2 \cdot 785 + 4 \cdot \frac{M_{rw}}{D} - W_1 \cdot (1 - 0.4A_v)$	$0.8x F_y$
Presión por fragilidad	$(3 \cdot P_f - 0.08t_h) \cdot D^2 \cdot 785 - W_3$	F_y

Tabla 5. Fuerzas netas de levantamiento (tomado del API-650)

Las variables de la tabla 5 se definen como:

M_{WH} : Momento de volcamiento causado por la fuerza de viento horizontal sobre el cuerpo del tanque, N-m.

M_{rw} : Momento en la base por sismo, N-m.

P : Presión de diseño, kPa.

P_f : Presión a la falla, kPa.

P_t : Presión de prueba, kPa.

P_{WR} : Presión de levantamiento 'uplift' del viento sobre el techo del tanque, kPa.

t_h : Espesor de la lámina del techo del tanque, mm (incluyendo la corrosión cuando se combina con W_1 y espesor nominal cuando se combina con W_3)

W_1 : Peso del cuerpo del tanque menos el espesor de corrosión incluyendo algún otro peso sobre el cuerpo del tanque excepto el asociado al techo y sus elementos adosados, N.

W_2 : Peso del cuerpo del tanque menos el espesor de corrosión incluyendo el peso asociado al techo y sus elementos adosados teniendo en cuenta la corrosión permitida, N.

W_3 : Peso del cuerpo del tanque usando el espesor nominal incluyendo algún otro peso sobre el cuerpo del tanque excepto el asociado al techo y sus elementos adosados usando de igual manera espesores nominales, N.

3.5. ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO PARA TANQUES CON PRESIÓN INTERNA < 2.5 PSI

El API 650 precisa el chequeo de las condiciones de levantamiento para los casos en que exista presión interna de operación en los tanques y esta no

supere los 2.5 psi. En el numeral F.7.4 se especifica que el peso del tanque y su fundación (en caso de estar anclado) deberá ser mayor que cualquiera de las siguientes condiciones:

- a) 1.5 veces el peso total por presión de diseño sumado al peso total por levantamiento 'uplift' por carga de viento. Para este caso se toma el peso del tanque en considerando la corrosión permitida.
- b) 1.25 veces el peso total por presión de prueba. Para este caso se toma el peso del tanque con los espesores nominales.
- c) 1.5 veces el peso total por presión a la falla. Se recomienda tomar el peso del tanque teniendo en cuenta la condición corroída.

3.6. ESTABILIDAD AL DESLIZAMIENTO Y AL VOLCAMIENTO

Para los requisitos de estabilidad al deslizamiento y volcamiento, deben tener en cuenta que las fuerzas desestabilizadoras son el sismo, el viento y las presiones internas/externas; mientras que las fuerzas resistentes serán el peso del fluido, el peso del tanque y la fundación (para los tanques anclados). La Figura 5 esquematiza el equilibrio que se requiere para la estabilidad del conjunto tanque-fundación.

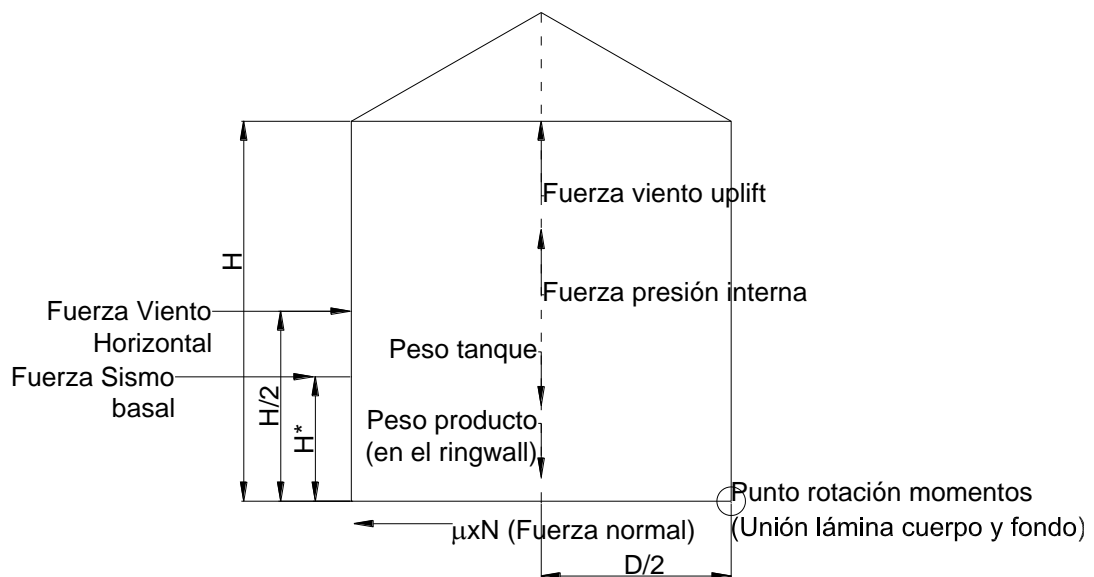


Figura 5. Fuerzas que intervienen en la estabilidad del conjunto tanque-fundación

Además, se deben considerar los siguientes factores mínimos de seguridad:

FS \geq 2.0 Para volcamiento

FS \geq 1.5 Para deslizamiento

En el caso del deslizamiento se debe tener en cuenta el coeficiente de fricción μ entre concreto y suelo de fundación, dado por el Ingeniero geotecnista. Este valor no debe superar 0.4.

3.7. REVISIÓN CAPACIDAD PORTANTE

Básicamente, se debe realizar la verificación de que las cargas actuantes (Viento, sismo, peso del tanque), el peso del producto y el peso de la fundación y el suelo, no sobrepasen la capacidad admisible del terreno tanto en el contacto de la zapata del ring-wall, así como en el contacto del relleno que soporta el producto almacenado (interior del tanque).

Las fuerzas actuantes se combinan acorde con lo establecido por el ASCE 7-10 (concordante con el API-650) para las condiciones de servicio (Ver Figura 6)

a) Fluid and Internal Pressure: $D_L + F + P_i$
b) Hydrostatic Test: $D_L + H_t + P_t$
c) Wind and Internal Pressure: $D_L + W + F_p P_i$
d) Wind and External Pressure: $D_L + W + 0.4 P_e$
e) Gravity Loads:
1) $D_L + (L_r \text{ or } S_u \text{ or } S_b) + 0.4 P_e$
2) $D_L + P_e + 0.4(L_r \text{ or } S_u \text{ or } S_b)$
f) Seismic: $D_L + F + E + 0.1S_b + F_p P_i$
g) Gravity Loads for Fixed Roofs with Suspended Floating Roofs:
1) $D_L + D_f + (L_r \text{ or } S) + P_e + 0.4(P_{fe} \text{ or } L_{f1} \text{ or } L_{f2})$
2) $D_L + D_f + (P_{fe} \text{ or } L_{f1} \text{ or } L_{f2}) + 0.4[(L_r \text{ or } S) + P_e]$

Figura 6. Combinaciones de carga para condiciones de servicio (Tomado del API-650)

3.8. DISEÑO REFORZAMIENTO DEL RING-WALL

Una vez definidas las dimensiones del ring-wall que satisfagan las condiciones de estabilidad al levantamiento, volcamiento, deslizamiento y capacidad portante, se determinan las fuerzas o esfuerzos que requiere resistir la sección definida de concreto del ring-wall y su correspondiente refuerzo. Por la configuración geométrica del ring-wall y la excentricidad entre la posición de las cargas verticales que actúan en el ring-wall y el centro geométrico del mismo, existen dos fenómenos que definen el reforzamiento de la fundación: El 'hoop tension' y el 'twist moment'.

'Hoop tension' es la fuerza axial aplicada en la sección transversal del ring-wall producto de la presión lateral debido tanto por la sobrecarga del líquido almacenado en el tanque y las cargas muertas (Cuerpo, techo, internos, y lámina del fondo) como la presión lateral ejercida por el relleno contenido por la fundación. Como recomendación, no se debe considerar la presión pasiva del suelo en el exterior del ringwall.

Su evaluación se realiza mediante la siguiente expresión:

$$T_h = R \cdot h \cdot k \cdot \left(W_p + \frac{\gamma_s \cdot h}{2} \right)$$

donde

R : Radio del tanque

h: Altura del ring-wall

k : Coeficiente presión de tierras

W_p : Peso del producto

γ_s : Peso específico del suelo

Al ser una fuerza de tensión, el refuerzo es el que asume la sollicitación. Este refuerzo se calcula aplicando el factor de reducción a la tensión $\phi=0.9$:

$$A_s = \frac{1.6 \cdot T_h}{0.9 \cdot f_y}$$

El 'Twist moment' es el momento torsor alrededor del eje longitudinal del ring-wall que se genera debido a la excentricidad de la carga vertical ejercida por las láminas del tanque y el líquido contenido con respecto al centro geométrico de la fundación (ver figura 7 para el cálculo del twist momento Mt). De acuerdo con Roark, el 'Twist moment' Mt se puede transformar en un momento flector alrededor del eje horizontal de la sección transversal del ring-wall como:

$$M = Mt \times (Rs - L + b/2)$$

La anterior expresión nos definirá el refuerzo necesario el cual se determinará como el diseño de una viga sometida a un momento flector.

El refuerzo que se defina para el 'twist moment' debe ser complementario al refuerzo determinado para el 'hoop tension' y deberá colocarse como refuerzo inferior en la sección transversal del ring-wall.

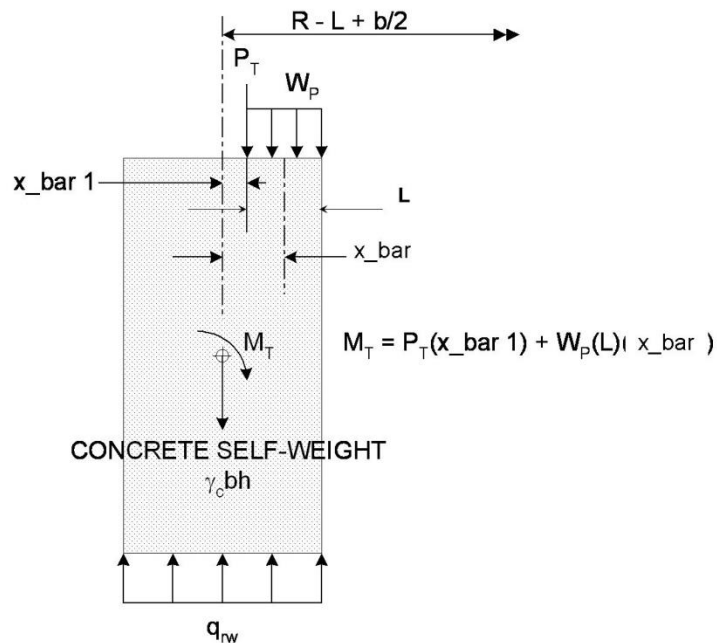


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre para determinar el Twist moment (Tomado del Process Industry Practices)

3.8.1. Cuantías mínimas de refuerzo

En concordancia con el ACI 318 se debe proveer de las siguientes cuantías mínimas de refuerzo por retracción y temperatura de fraguado considerando el área gross de la sección transversal:

Refuerzo vertical (Fy= 420 MPa)

0.0012 para diámetros de varilla menor o igual a N°5

0.0015 para diámetros de varilla mayor a N°5

Refuerzo horizontal (Fy= 420 MPa)

0.0020 para diámetros de varilla menor o igual a N°5

0.0025 para diámetros de varilla mayor a N°5

3.8.2. Diseño por cortante

El diseño por cortante se divide en las dos secciones que conforman la fundación del tanque:

Cortante para el ring-wall: Al ser un elemento sometido a una gran carga axial causada por el hoop tensión, la capacidad nominal a cortante se expresa como:

$$V_c = 2 \cdot \left(1 + \frac{N_u}{500A_g} \right) \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$$

Donde, N_u es la carga axial y es negativa si está a tensión. Nótese que en ese

caso $\frac{N_u}{A_g}$ deberá ser mayor a 500 o por el contrario, el miembro pierde totalmente

su capacidad a cortante

Cortante para la zapata: Se verifica que la zapata tenga el suficiente espesor para que la capacidad del miembro a cortante resista las solicitaciones mayoradas correspondientes. Por consiguiente la resistencia nominal a corte se expresa como:

$$V_c = 0.75 \cdot \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \cdot b_w \cdot d$$

3.9. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el fin de ilustrar la aplicación de la guía metodológica, se tomará un caso práctico ficticio pero muy común en la industria Oil & Gas.

El caso consiste en el diseño de la fundación tipo ring-wall para un tanque de almacenamiento de capacidad nominal de 50.000 bbls de mezcla de crudo y agua ubicado en el municipio de Acacias, Meta. No se poseen los planos de fabricación del tanque por lo que el cliente solicita adelantar los diseños con la hoja de datos mecánica que se presenta en la figura 8, 9 y 910.

Acorde con la importancia del proyecto y el servicio que prestará a la comunidad, el tanque se ha clasificado dentro del grupo de uso IV según la clasificación de la NSR-10

El estudio de suelos dictamina que el terreno donde se localizará el tanque se clasifica como perfil tipo D, con capacidad portante de 18 tonf/m² con Df a 1.00 m para un asentamiento máximo de 25.4 cm. El peso específico, el ángulo de fricción y el coeficiente de fricción interna concreto-suelo son 17.85 kN/m³, 25°, y 0.4 respectivamente.

COIL TANK	PRESSURE INTERNAL/EXTERNAL	OPER.: 0.25-0.75	DESIGN: 1.5/-0.036		
	TEMPERATURE	OPER.: 150-190	DESIGN: 240		'F
	HYDR. TEST PRESS.	BY DESIGN CODE			
COIL	PRESSURE	OPER.: N.A	DESIGN: N.A		
	TEMPERATURE	OPER.: N.A	DESIGN: N.A		
	HYDR. TEST PRESS.	N.A			
					psig
POS.	ELEMENTS	STRESS RELIEF	X RAY %	JOINT EFF.	CORROSION ALLOWANCE
1	SHELL	NO	BY DESIGN CODE		0.0625 in
2	BOTTOM	NO	BY DESIGN CODE		0.0625 in
3	ROOF	NO	BY DESIGN CODE		0.0625 in
4	CLEAN OUT OPENING	YES	BY DESIGN CODE		0.0625 in
NOMINAL CAPACITY		54430 bbl	WORKING CAPACITY	50677 bbl	
WEIGHT (EMPTY)		526,228 lb	WEIGHT (HDR. TEST)	19,550,607 lb	
WEIGHT (OPER.)		18,409,145 lb	WEIGHT (INTERNAL)	-	lb
UPLIFT. LOAD		(1,739,543) lb			

ROOF:	0.5625	-
BOTTOM:	0.3125	-
ANNULAR RING	0.3125	26.625
RING # 6	0.25	72
RING # 5	0.25	72
RING # 4	0.3125	96
RING # 3	0.4375	96
RING # 2	0.5	96
RING # 1	0.625	96
	THK	WIDE
PLATE MIN DIMENSIONS (in)		

Figura 8. Hoja de datos mecánica – Datos generales

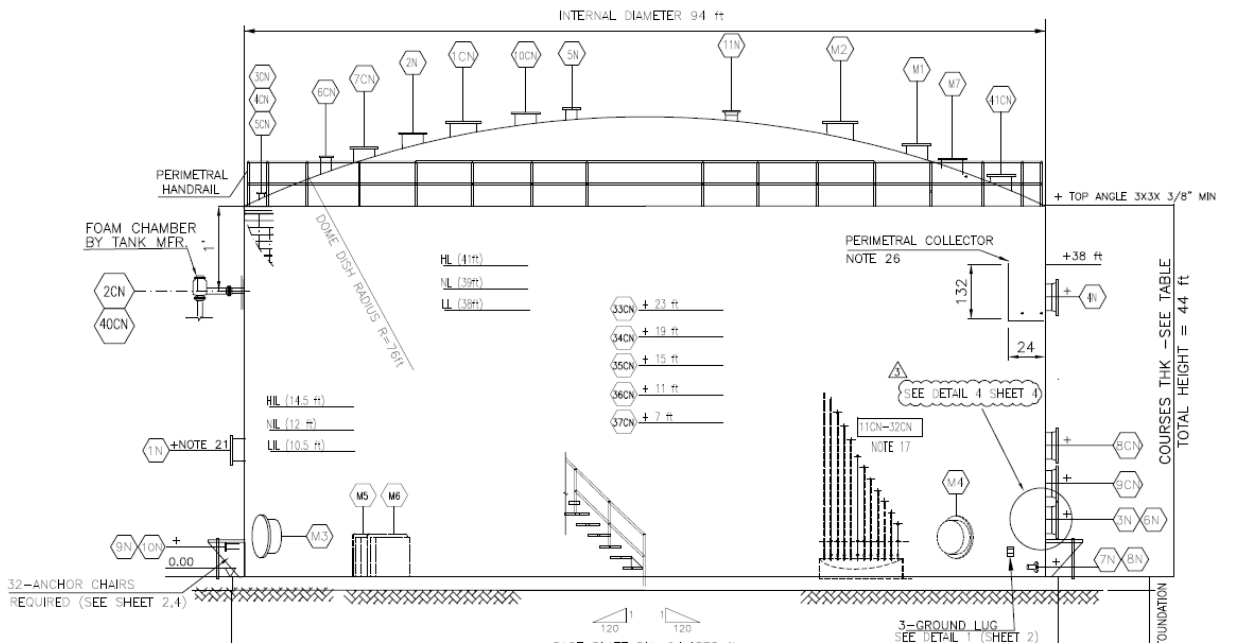


Figura 9. Hoja de datos mecánica – Arreglo general

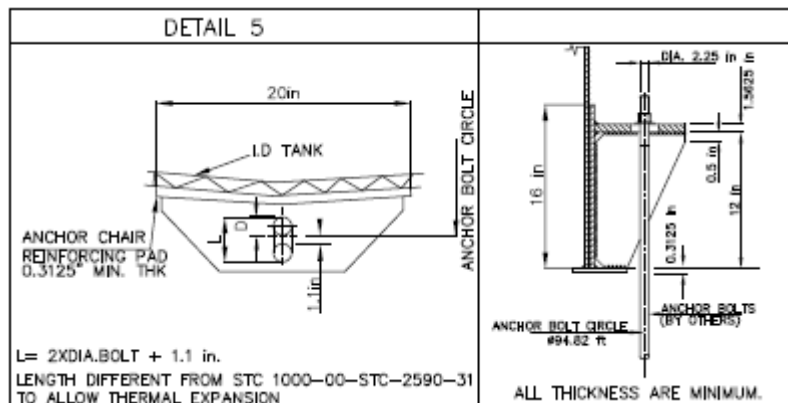


Figura 10. Hoja de datos mecánica – Detalle anclaje

Se empleará para el desarrollo de ejemplo de aplicación el programa Mathcad V 14, el cual es un software para ejecutar, documentar cálculos y trabajos de diseño. Su formato visual y su interfaz de bloc de notas de Mathcad integran notaciones matemáticas estándar, texto y gráficos en una única hoja de trabajo, y permite diseñar y documentar los trabajos de ingeniería con cálculos y compatibilidad de unidades.

Basados en las variables de entrada se desarrollará paso a paso el análisis y diseño correspondiente.

VARIABLES DEL TANQUE Y EL CONTENIDO

$D_{ntanque} = 28.651\text{m}$	Diámetro nominal del tanque
$H_{ntanque} = 12.802\text{m}$	Altura nominal del tanque
$E_{tanque} = 2 \times 10^5 \cdot \text{MPa}$	Módulo de elasticidad material tanque
$t_{fondo} = 0.008\text{m}$	Espesor lámina del fondo
$t_{techo} = 0.014\text{m}$	Espesor lámina techo
$t_{prom_cuerpo} := thk_{avg} \cdot in$	
$t_{prom_cuerpo} = 0.007\text{m}$	Espesor promedio del cuerpo
$t_{corrosion} = 0.002\text{m}$	Espesor de corrosión permitida
$X_{cuerpo} := \frac{\sum thkXH_i}{\sum thk} \text{m} = 5.095 \text{m}$	Altura centroidal del cuerpo
$X_{techo} := H_{ntanque} + \frac{3}{4} \cdot \frac{(2R_{domo} - h_{techo})^2}{3 \cdot R_{domo} - h_{techo}}$	
$X_{techo} = 32.686\text{m}$	Altura centroidal del techo

$\rho_{\text{producto}} = 928.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densidad del producto
$\gamma_{\text{prod}} = 1.023 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$	Peso específico del producto
$H_{\text{HL}} = 12.497\text{m}$	Nivel Alto del producto
$H_{\text{NL}} = 3.658\text{m}$	Nivel normal del producto
$H_{\text{LL}} = 3.2\text{m}$	Nivel bajo del producto
$P_{i_{\text{diseño}}} = 1.163 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$	Presión interna de diseño
$P_{i_{\text{oper}}} = 0.194 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$	Presión interna de operación
$P_{i_{\text{prueba}}} = 0.775 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$	Presión interna de prueba
$P_{i_{\text{falla}}} := 1.6 \cdot P_{i_{\text{diseño}}} - \frac{0.00746 \cdot (W_{\text{N_techo}} + W_{\text{misc}})}{D_{\text{ntanque}}^2}$	
$P_{i_{\text{falla}}} = 1.858 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$	Presión interna a la falla
$P_{\text{ext}} = 0.581 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$	Presión externa
$\frac{H_{\text{ntanque}}}{D_{\text{ntanque}}} = 0.447$	

Determinada los datos de entrada del tanque necesarios para el análisis, se procede con el cálculo de las cargas

CARGAS

CARGAS MUERTAS DEL TANQUE Y DEL CONTENIDO

$W_{T_vacío} = 263.114 \text{ tonf}$	Peso tanque vacío
$W_{T_oper} = 9204.573 \text{ tonf}$	Peso tanque operación
$W_{T_prueba} = 9775.303 \text{ tonf}$	Peso tanque prueba
$W_{N_techo} = 89.345 \text{ tonf}$	Peso techo espesor nominal
$W_{N_fondo} = 44.253 \text{ tonf}$	Peso fondo espesor nominal
$W_{N_cuerpo} = 81.349 \text{ tonf}$	Peso cuerpo espesor nominal
$W_{misc} = 78.934 \text{ tonf}$	Peso de los elementos internos y misceláneos
$W_{C_techo} = 79.417 \text{ tonf}$	Peso techo espesor corroído
$W_{C_fondo} = 35.402 \text{ tonf}$	Peso fondo espesor corroído
$W_{C_cuerpo} = 63.746 \text{ tonf}$	Peso cuerpo espesor corroído
$W_{prod_oper} = 8941.459 \text{ tonf}$	Peso total producto operación
$W_{prod_prueba} = 9512.19 \text{ tonf}$	Peso total producto en prueba

CARGA DE VIENTO

$V_{diseño} = 33.333 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad de diseño
$P_{WS} = 0.003 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$	Presión horizontal viento sobre el tanque
$P_{WR} = 0.005 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$	Presión vertical sobre techo tanque
$W_{V_hor} := P_{WS} \cdot A_{V_tanque}$	
$W_{V_hor} = 1.714 \text{ tonf}$	Fuerza total viento horizontal

$$W_{V_upft} := P_{WR} \cdot A_{techc}$$

$$W_{V_upft} = 3.603 \text{ tonf} \quad \text{Fuerza total viento uplift}$$

$$M_{V_hor} := W_{V_hor} \cdot \frac{H_{ntanque}}{2}$$

$$M_{V_hor} = 10.972 \text{ tonf} \cdot \text{m} \quad \text{Momento total viento horizontal}$$

$$M_{V_upft} := W_{V_upft} \cdot \frac{D_{ntanque}}{2}$$

$$M_{V_upft} = 51.611 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \quad \text{Momento total viento uplift}$$

$$M_{V_total} := M_{V_hor} + M_{V_upf}$$

$$M_{V_total} = 62.583 \text{ tonf} \cdot \text{m} \quad \text{Momento total viento}$$

$$w_{V_ringw} := \frac{4 \cdot M_{V_total}}{\pi \cdot D_{ntanque}^2}$$

$$w_{V_ringw} = 0.097 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad \text{Sobrecarga viento sobre el ring-wall}$$

Previo al análisis de la carga por sismo, se verificará si se requiere anclar el tanque a causa de las presiones internas

CARGA LEVANTAMIENTO POR PRESION INTERNA/EXTERNA

$$W_{pi_diseño} := P_{i_diseño} \cdot \frac{\pi D_{ntanque}^2}{4}$$

$$W_{pi_diseño} = 749.496 \text{ tonf} \quad \text{Carga total por presión interna diseño}$$

$$M_{pi_diseño} := W_{pi_diseño} \cdot \frac{D_{ntanque}}{2}$$

$$M_{pi_diseño} = 1.074 \times 10^4 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m} \quad \text{Momento total por presión de diseño}$$

$$W_{pi_oper} := P_{i_oper} \cdot \frac{\pi D_{ntanque}^2}{4}$$

$$W_{pi_oper} = 124.916 \text{ tonf}$$

Carga total por presión interna de operación

$$M_{pi_oper} := W_{pi_oper} \cdot \frac{D_{ntanque}}{2}$$

$$M_{pi_oper} = 1789.497 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

Momento total por presión de operación

$$W_{pi_prueba} := P_{i_prueba} \cdot \frac{\pi D_{ntanque}^2}{4}$$

$$W_{pi_prueba} = 499.664 \text{ tonf}$$

Carga total por presión de prueba

$$M_{pi_prueba} := W_{pi_prueba} \cdot \frac{D_{ntanque}}{2}$$

$$M_{pi_prueba} = 7157.987 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

Momento total por presión de prueba

$$W_{pi_falla} := P_{i_falla} \cdot \frac{\pi D_{ntanque}^2}{4}$$

$$W_{pi_falla} = 1198.208 \text{ tonf}$$

Carga por presión interna a la falla

$$W_{p_ext} := P_{ext} \cdot \frac{\pi D_{ntanque}^2}{4}$$

$$W_{p_ext} = 374.748 \text{ tonf}$$

Carga por presión externa

REVISIÓN ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO POR PRESION INTERNA

$$Pint_Comb1 := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } W_{pi_diseño} < W_{c_cuerpo} + W_{c_techo} \\ \text{"ANCLAR"} & \end{cases}$$

$$Pint_Comb1 = \text{"ANCLAR"}$$

CARGA DE SISMO

SUG := 3

Grupo de uso

$$FI := \begin{cases} 1 & \text{if } SUG = 1 \\ 1.25 & \text{if } SUG = 2 \\ 1.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad FI = 1.5$$

tanque_anclado := SI

Coefficiente de reducción para carga del modo impulsivo

$$R_{wi} := \begin{cases} 3.5 & \text{if } \text{tanque_anclado} = \text{"NO"} \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad R_{wi} = 4$$

Coefficiente de reducción para carga del modo convectivo

$$R_{wc} := \begin{cases} 2 & \text{if } \text{tanque_anclado} = \text{"NO"} \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad R_{wc} = 2$$

Q := 1.0

k := 1.5

$A_a := 0.2C$

$A_v := 0.25$

Perfil del suelo = D

$F_a := 1.4C$

$F_v := 2.0$

$S_0 := 0.2C$

$$S_{DS} := 2.5 \cdot F_a \cdot Q \cdot S_0 \quad S_{DS} = 0.7$$

$$T_S := 0.48s \cdot \frac{A_v \cdot F_v}{A_a \cdot F_a} \quad T_S = 0.857s$$

$$T_L := 2.4s F_v \quad T_L = 4.8s$$

$$C_{imp} := C_i \left(\frac{H_{ntanque}}{D_{ntanque}} \right) = 6.51$$

$$T_{imp} := \frac{1}{\sqrt{2000}} \left(\frac{C_{imp} \cdot H_{ntanque}}{\sqrt{\frac{t_{prom_cuerpo}}{D_{ntanque}}}} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{\rho_{producto}}{E_{tanque}}} \right)$$

$$T_{imp} = 0.008s \quad \text{Período modo impulsivo}$$

$$T_{conv} := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{D_{ntanque}}{3.68 \cdot g \cdot \tanh\left(\frac{3.68 H_{ntanque}}{D_{ntanque}}\right)}}$$

$$T_{conv} = 5.811s \quad \text{Período modo convectivo}$$

$$A_{imp} := 2.5 \cdot Q \cdot F_a \cdot S_0 \cdot \left(\frac{FI}{R_{wi}} \right)$$

$$A_{imp} = 0.263 \quad \text{Fracción gravedad modo impulsivo}$$

$$A_{conv} := \begin{cases} 2.5 \cdot k \cdot Q \cdot F_a \cdot S_0 \cdot \left(\frac{T_S}{T_{conv}} \right) \cdot \left(\frac{FI}{R_{wc}} \right) & \text{if } T_S \leq T_L \\ 2.5 \cdot k \cdot Q \cdot F_a \cdot S_0 \cdot \left(\frac{T_S \cdot T_L}{T_{conv}^2} \right) \cdot \left(\frac{FI}{R_{wc}} \right) & \text{if } T_S > T_L \end{cases}$$

$$A_{conv} = 0.116 \quad \text{Fracción gravedad modo convectivo}$$

$$A_{\text{vert}} := 0.14 \cdot S_{\text{DS}}$$

$$A_{\text{vert}} = 0.098$$

Fracción gravedad aceleración vertical

$$W_{\text{imp_prod}} := \begin{cases} \frac{\tanh\left(0.866 \cdot \frac{D_{\text{ntanque}}}{H_{\text{ntanque}}}\right)}{0.866 \cdot \frac{D_{\text{ntanque}}}{H_{\text{ntanque}}}} \cdot W_{\text{prod_oper}} & \text{if } \frac{D_{\text{ntanque}}}{H_{\text{ntanque}}} \geq 1.3333 \\ \left(1 - 0.218 \cdot \frac{D_{\text{ntanque}}}{H_{\text{ntanque}}}\right) \cdot W_{\text{prod_oper}} & \text{if } \frac{D_{\text{ntanque}}}{H_{\text{ntanque}}} < 1.3333 \end{cases}$$

$$W_{\text{imp_prod}} = 4425.957 \cdot \text{tonf}$$

Peso total modo impulsivo

$$W_{\text{conv_prod}} := 0.230 \cdot \frac{D_{\text{ntanque}}}{H_{\text{ntanque}}} \cdot \tanh\left(\frac{3.67 \cdot H_{\text{ntanque}}}{D_{\text{ntanque}}}\right) \cdot W_{\text{prod_oper}}$$

$$W_{\text{conv_prod}} = 4268.762 \cdot \text{tonf}$$

Peso total modo convectivo

$$W_{\text{T_prod}} := W_{\text{imp_prod}} + W_{\text{conv_prod}}$$

$$W_{\text{T_prod}} = 8694.719 \cdot \text{tonf}$$

Peso total por carga sísmica

$$\frac{W_{\text{T_prod}}}{W_{\text{prod_oper}}} = 97.241\%$$

Estrictamente el peso total de la carga sísmica debería ser igual al peso del producto, dado que toda la masa se acelera con la excitación. Sin embargo, el valor del 97.24% se explica a razón de que el método para obtener los valores de porcentaje de aceleración para los modos impulsivo y convectivo son aproximados y referidos al primer modo de vibración.

$$X_{imp} := \begin{cases} (0.375 \cdot H_{ntanque}) & \text{if } \frac{D_{ntanque}}{H_{ntanque}} \geq 1.3333 \\ \left(0.5 - 0.094 \cdot \frac{D_{ntanque}}{H_{ntanque}}\right) \cdot H_{ntanque} & \text{if } \frac{D_{ntanque}}{H_{ntanque}} < 1.3333 \end{cases}$$

$$X_{imp} = 4.801\text{m} \quad \text{Punto de acción fuerza impulsiva}$$

$$X_{conv} := \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 \cdot H_{ntanque}}{D_{ntanque}}\right) - 1}{\left(\frac{3.67 \cdot H_{ntanque}}{D_{ntanque}}\right) \sinh\left(\frac{3.67 \cdot H_{ntanque}}{D_{ntanque}}\right)} \right] \cdot H_{ntanque}$$

$$X_{conv} = 7.532\text{m} \quad \text{Punto de acción fuerza convectiva}$$

$$V_{s_oper} := \sqrt{[A_{imp} \cdot (W_{imp_prod} + W_{N_techo} + W_{N_fondo} + W_{misc} + W_{N_cuerpo})]^2 + (A_{conv} \cdot W_{conv_prod})^2}$$

$$V_{s_oper} = 1334.488\text{tonf} \quad \text{Fuerza total cortante sísmica en operación}$$

$$M_{s_oper} := \sqrt{[A_{imp} \cdot (W_{imp_prod} \cdot X_{imp} + (W_{N_cuerpo} + W_{misc}) \cdot X_{cuerpo} + W_{N_techo} \cdot X_{techo})]^2 + [A_{conv} \cdot (W_{conv_prod} \cdot X_{conv})]^2}$$

$$M_{s_oper} = 7547.065\text{tonf}\cdot\text{m} \quad \text{Momento total sísmico en operación}$$

$$V_{s_vacio} := [A_{imp} \cdot (W_{c_techo} + W_{c_fondo} + W_{misc} + W_{c_cuerpo})]$$

$$V_{s_vacio} = 67.594\text{tonf} \quad \text{Cortante total sísmico tanque vacío}$$

$$M_{s_vacio} := [A_{imp} \cdot (W_{c_cuerpo} + W_{misc}) \cdot X_{cuerpo} + W_{c_techo} \cdot X_{techo}]$$

$$M_{s_vacio} = 2786.654\text{tonf}\cdot\text{m} \quad \text{Momento total sísmico tanque vacío}$$

$$w_{s_ringw_vacio} := \frac{4 \cdot M_{s_vacio}}{\pi \cdot D_{ntanque}^2} + \frac{(W_{T_vacio} - W_{N_fondo})}{\pi \cdot D_{ntanque}} \cdot (1 + 0.4A_{vert})$$

$$w_{s_ringw_vacio} = 6.849 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad \text{Sobrecarga tanque vacío por sismo en el ring-wall}$$

$$w_{s_ringw_oper} := \frac{4 \cdot M_{s_oper}}{\pi \cdot D_{ntanque}^2} + \frac{(W_{T_vacio} - W_{N_fondo})}{\pi \cdot D_{ntanque}} \cdot (1 + 0.4A_{vert})$$

$$w_{s_ringw_oper} = 14.233 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad \text{Sobrecarga tanque operación por sismo en el ring-wall}$$

Definidas las cargas se procede con las revisiones de las condiciones de estabilidad del tanque y la fundación ring-wall. Para ello se parte de una geometría de la fundación (ver figura 11) considerando la geometría del tanque (Diámetro, ubicación de los pernos) y las recomendaciones geotécnicas.

ESQUEMA GEOMÉTRICO DE LA FUNDACIÓN

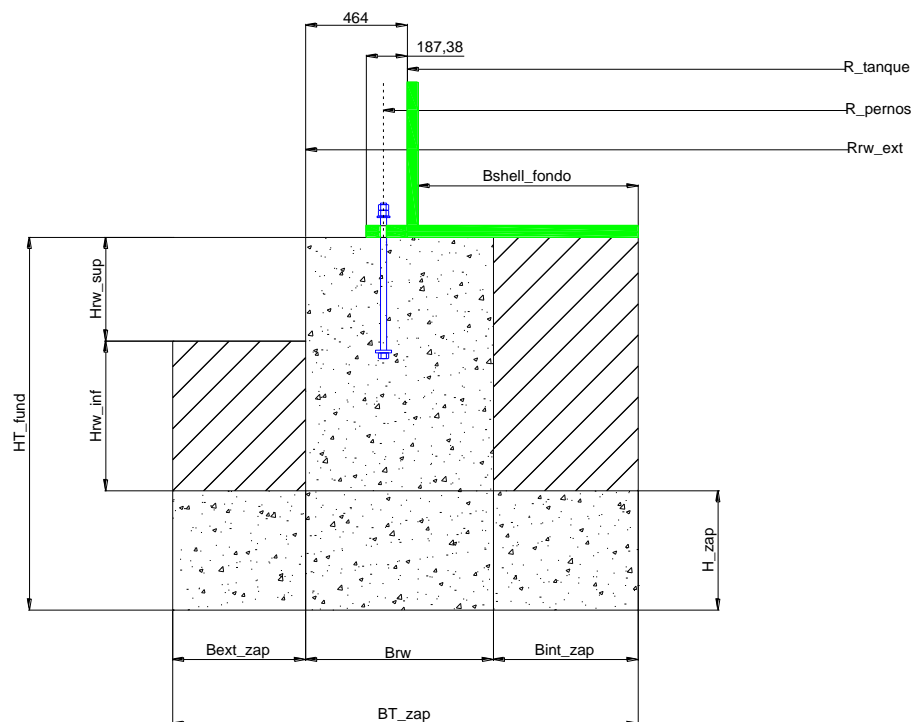


Figura 11. Geometría de la fundación para el tanque

GEOMETRÍA DE LA FUNDACIÓN

$B_{rw} := 1.3\text{m}$	Ancho del ringwall (pedestal)
$H_{rw_sup} := 0.40\text{m}$	Altura ring-wall que sobresale del terreno
$H_{rw_inf} := 2.00\text{m}$	Altura ring-wall por debajo del terreno
$H_{T_rw} := H_{rw_sup} + H_{rw_inf}$	
$H_{T_rw} = 2.4\text{m}$	Altura total del ring-wall
$A_{T_rw} := B_{rw} \cdot H_{T_rw} = 3.12\text{m}^2$	Área transversal ring-wall
$B_{int_zap} := 1.85\text{m}$	Ancho interno de la zapata
$B_{ext_zap} := 0.55\text{m}$	Ancho externo zapata
$B_{T_zap} := B_{ext_zap} + B_{int_zap} + B_{rw}$	
$B_{T_zap} = 3.7\text{m}$	Ancho total zapata
$H_{zap} := 0.6\text{m}$	Altura o espesor de la zapata
$H_{T_fund} := H_{T_rw} + H_{zap}$	
$H_{T_fund} = 3\text{m}$	Altura total de la fundación
$A_{T_zap} := B_{T_zap} \cdot H_{zap}$	
$A_{T_zap} = 2.22\text{m}^2$	Área total de la zapata
$A_{T_fund} := A_{T_rw} + A_{T_zap}$	
$A_{T_fund} = 5.34\text{m}^2$	Área total de la fundación

GEOMETRÍA SHELL Y ANCLAJES

$$R_{\text{tanque}} := \frac{D_{\text{ntanque}}}{2} = 14.326 \text{ m} \quad \text{Radio de ubicación de las láminas cuerpo del tanque}$$

$$R_{\text{pernos}} := \frac{94.82}{2} \text{ ft} = 14.451 \text{ m} \quad \text{Radio ubicación de los pernos de anclaje}$$

$$R_{\text{rw_ext}} := R_{\text{pernos}} + 0.35 \text{ m}$$

$$R_{\text{rw_ext}} = 14.801 \text{ m} \quad \text{Radio cara exterior del ring-wall (pedestal)}$$

$$B_{\text{shell_fondo}} := B_{\text{rw}} + B_{\text{int_zap}} - (R_{\text{rw_ext}} - R_{\text{tanque}} - B_{\text{ext_zap}})$$

$$B_{\text{shell_fondo}} = 3.225 \text{ m} \quad \text{Ancho del ring-wall al interior de las láminas del tanque}$$

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

$$\gamma_{\text{sf}} := 17.85 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \text{Peso específico del suelo}$$

$$\mu_{\text{f_c}} := 0.4 \quad \text{Coeficiente concreto suelo}$$

$$\phi_{\text{f}} := 30 \quad \text{Angulo de fricción interna}$$

$$\sigma_{\text{adm}} := 290 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Capacidad portante a 2.60 m de desplante}$$

$$K_{\text{O}} := 0.5 \quad \text{Coeficiente de presión de tierras condición reposo}$$

REVISIÓN ESTABILIDAD DEL SISTEMA TANQUE-FUNDACIÓN

ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO POR SISMO

A pesar que por presión interna el tanque requiere anclaje, para efectos académicos se ilustra el chequeo correspondiente al levantamiento por condición sísmica y por viento

$$\gamma_{p_sism} := \gamma_{prod} (1 - 0.4A_v)$$

Peso específico del producto considerando efectos sísmicos verticales

$$w_a := \min(99t_{fondo} \cdot \sqrt{F_{y_tanque} H_{ntanque} \gamma_{p_sism}}, 201.1 \cdot H_{ntanque} D_{ntanque} \gamma_{p_sism})$$

$$w_a = 450.676 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Fuerza proporcionada por el tanque resistente al levantamiento

$$J_T := \frac{M_{s_oper}}{D_{ntanque}^2 \cdot \left[\frac{W_{N_cuerpo} + W_{N_techo}}{\pi \cdot D_{ntanque}} \cdot (1 - 0.4A_{vert}) + w_a - 0.4 \cdot \frac{W_{pi_diseño}}{(\pi \cdot D_{ntanque})} \right]}$$

$$J_T = 0.02$$

Relación de anclaje

CHECK := "NO REQUIERE ANCLAJE" if $J_T \leq 0.785$
 "EL TANQUE SE LEVANTA, PERO ES AUTOSOPORTADO POR LAS CARGAS DE DISEÑO" if $J_T > 0.785 \wedge J_T \leq 1.54$
 "EL TANQUE NO ES ESTABLE, REQUIERE ANCLAJE" if $J_T > 1.54$ otherwise

CHECK = "NO REQUIERE ANCLAJE"

ESTABILIDAD AL VOLCAMIENTO POR VIENTO

$$M_{DL} := W_{N_cuerpo} \cdot \frac{D_{ntanque}}{2}$$

$$M_{DL} = 1165.379 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{DLR} := (W_{N_techo} + W_{misc}) \cdot \frac{D_{ntanque}}{2}$$

$$M_{DLR} = 2410.695 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$F_p := \max\left(\frac{P_{i_oper}}{P_{i_diseño}}, 0.4\right) \quad F_p = 0.4$$

$$w_{\text{prod}} := \min \left[\left(140 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right) \cdot H_{\text{ntanque}} D_{\text{ntanque}} \left(59 \cdot \frac{\sqrt{\text{N} \cdot \text{m}}}{\text{m}^2} \right) t_{\text{fondo}} \sqrt{F_{y_tanque} H_{\text{ntanque}}} \right]$$

$$w_{\text{prod}} = 2.967 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Peso lineal del producto de acuerdo al numeral 5.11.2.2 del API 650

$$W_{\text{prod_fund}} := \gamma_{\text{prod}} H_{\text{ntanque}} B_{\text{shell_fondo}} \pi \cdot (D_{\text{ntanque}} - B_{\text{shell_fondo}})$$

$$W_{\text{prod_fund}} = 3374.486 \text{ tonf}$$

Peso total del producto en el área de la fundación

$$w_{\text{prod_fund}} := \frac{W_{\text{prod_fund}}}{\left[\pi \cdot (D_{\text{ntanque}} - B_{\text{shell_fondo}}) \right]} = 42.245 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$W_{\text{prodMAX_fund}} := \gamma_{\text{prod}} H_{\text{HL}} B_{\text{shell_fondo}} \pi \cdot (D_{\text{ntanque}} - B_{\text{shell_fondo}})$$

$$W_{\text{prodMAX_fund}} = 3294.141 \cdot \text{tonf}$$

Peso del producto en el nivel HHL en el área de la fundación

$$w_{\text{prodMAX_fund}} := \frac{W_{\text{prodMAX_fund}}}{\left[\pi \cdot (D_{\text{ntanque}} - B_{\text{shell_fondo}}) \right]} = 41.239 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{PR}} := w_{\text{prod}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot \frac{D_{\text{ntanque}}}{2}$$

$$M_{\text{PR}} = 3826.2 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

Ahora se revisa el cumplimiento del literal a), b) y c) del numeral 4.3.1.

$$\text{Comb1}_{\text{viento}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } 0.6M_{V_total} + M_{\text{pi_diseño}} < \frac{M_{\text{DL}}}{1.5} + M_{\text{DLR}} \\ \text{"ANCLAR"} & \end{cases}$$

$$\text{Comb1}_{\text{viento}} = \text{"ANCLAR"}$$

$$\text{Comb2}_{\text{viento}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{V_{\text{total}}} + F_p \cdot M_{\text{pi_diseño}} < \frac{M_{\text{DL}} + M_{\text{PR}}}{2} + M_{\text{DLR}} \\ \text{"ANCLAR"} & \end{cases}$$

$$\text{Comb2}_{\text{viento}} = \text{"ANCLAR"}$$

$$\text{Comb3}_{\text{viento}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } M_{V_{\text{hor}}} + F_p \cdot M_{\text{pi_diseño}} < \frac{M_{\text{DL}}}{1.5} + M_{\text{DLR}} \\ \text{"ANCLAR"} & \end{cases}$$

$$\text{Comb3}_{\text{viento}} = \text{"ANCLAR"}$$

ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO PARA TANQUES ANCLADOS PESO DEL SISTEMA DE FUNDACIÓN

$$\gamma_c := 2.4 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{zap_int}} := B_{\text{int_zap}} \cdot H_{\text{zap}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot \gamma_c \quad W_{\text{zap_int}} = 239.788 \text{ tonf}$$

$$W_{\text{zap_ext}} := B_{\text{ext_zap}} \cdot H_{\text{zap}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot \gamma_c \quad W_{\text{zap_ext}} = 71.288 \text{ tonf}$$

$$W_{\text{zap_mid}} := B_{\text{rw}} \cdot H_{\text{zap}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot \gamma_c \quad W_{\text{zap_mid}} = 168.499 \text{ tonf}$$

$$W_{\text{zap_T}} := W_{\text{zap_int}} + W_{\text{zap_ext}} + W_{\text{zap_mid}} \quad W_{\text{zap_T}} = 479.575 \text{ tonf}$$

$$W_{\text{rw_sup}} := B_{\text{rw}} \cdot H_{\text{rw_sup}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot \gamma_c \quad W_{\text{rw_sup}} = 112.333 \text{ tonf}$$

$$W_{\text{rw_inf}} := B_{\text{rw}} \cdot H_{\text{rw_inf}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot \gamma_c \quad W_{\text{rw_inf}} = 561.665 \text{ tonf}$$

$$W_{\text{rw_T}} := W_{\text{rw_sup}} + W_{\text{rw_inf}} \quad W_{\text{rw_T}} = 673.998 \text{ tonf}$$

$$W_{\text{fund_T}} := W_{\text{zap_T}} + W_{\text{rw_T}} \quad W_{\text{fund_T}} = 1153.573 \text{ tonf}$$

$$W_{s_ext} := B_{ext_zap} \cdot H_{rw_inf} \cdot \pi \cdot D_{ntanque} \cdot \gamma \text{ sf}$$

$$W_{s_ext} = 198.659 \text{ tonf}$$

$$W_{s_int} := B_{int_zap} \cdot (H_{rw_inf} + H_{rw_sup}) \cdot \pi \cdot D_{ntanque} \cdot \gamma \text{ sf}$$

$$W_{s_int} = 801.858 \text{ tonf}$$

$$W_{s_T} := W_{s_int} + W_{s_ext} \cdot 0.5$$

$$W_{s_T} = 901.187 \text{ tonf}$$

CHEQUEO DE ESTABILIDAD AL LEVANTAMIENTO

$$W_1 := W_{c_cuerpo} \quad W_2 := W_{c_cuerpo} + W_{c_techo} + W_{prod_func}$$

$$W_1 = 63.746 \text{ tonf} \quad W_2 = 3517.649 \text{ tonf}$$

$$W_3 := W_{N_cuerpo} \quad W_3 = 81.349 \text{ tonf}$$

Determinado estos valores se realiza el chequeo descrito en la tabla 5

Por presión de diseño

$$t_{c_techo} := t_{techo} - t_{corrosion} = 0.013 \text{ m}$$

$$\text{Comb1}_{upft} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \left[\frac{P_{i_diseño}}{1000} - \left(0.08 \frac{N}{m^3} \right) t_{c_techo} \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_1 < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\left[\frac{P_{i_diseño}}{1000} - \left(0.08 \frac{N}{m^3} \right) t_{c_techo} \cdot 1000 \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_1 = 611.778 \cdot \text{tonf}$$

$$W_{fund_T} + W_{s_T} = 2054.761 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Comb1}_{upft} = \text{"CUMPLE"}$$

Por presión de prueba

$$\text{Comb2}_{\text{upft}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \left[\frac{P_{i_prueba}}{1000} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{c_techo} \cdot 1000 \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_1 < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\left[\frac{P_{i_prueba}}{1000} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{c_techo} \cdot 1000 \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_1 = 362.073 \cdot \text{tonf}$$

$$W_{fund_T} + W_{s_T} = 2054.761 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Comb2}_{\text{upft}} = \text{"CUMPLE"}$$

Por presión de falla

$$\text{Comb3}_{\text{upft}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \left[1.5 \frac{P_{i_falla}}{1000} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{techo} \cdot 1000 \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_3 < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"NO APLICA"} & \text{if } \left[1.5 \frac{P_{i_falla}}{1000} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{techo} \cdot 1000 \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 < W_3 + \gamma \text{ prod}^H \text{HL} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ntanque}^2}{4} \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\left[1.5 \frac{P_{i_falla}}{1000} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{techo} \cdot 1000 \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_3 = 1632.26 \cdot \text{tonf}$$

$$W_{fund_T} + W_{s_T} = 2054.761 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Comb3}_{\text{upft}} = \text{"NO APLICA"}$$

Por carga de viento

$$\text{Comb4}_{\text{upft}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{P_{WR}}{1000} \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{v_hor}}{D_{ntanque}} - W_2 < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"NO APLICA"} & \text{if } \frac{P_{WR}}{1000} \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{v_hor}}{D_{ntanque}} - W_2 < 0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{P_{WR}}{1000} \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{v_hor}}{D_{ntanque}} - W_2 = -3512.907 \cdot \text{tonf}$$

Comb4_{upft} = "NO APLICA"

Por carga de sismo

$$\text{Comb5}_{upft} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{4 \cdot M_{s_oper}}{D_{ntanque}} - W_2 \cdot (1 - 0.4A_V) < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"NO APLICA"} & \text{if } \frac{4 \cdot M_{s_oper}}{D_{ntanque}} - W_2 \cdot (1 - 0.4A_V) < 0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{4 \cdot M_{s_oper}}{D_{ntanque}} - W_2 \cdot (1 - 0.4A_V) = -2112.237 \cdot \text{tonf}$$

Comb5_{upft} = "NO APLICA"

Por carga de viento y presión de diseño

$$\text{Comb6}_{upft} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \left(F_p \cdot \frac{P_{i_diseño}}{1000} + \frac{P_{WR}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{c_techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{v_hor}}{D_{ntanque}} - (W_1 + W_{prod_fund}) < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"NO APLICA"} & \text{if } \left(F_p \cdot \frac{P_{i_diseño}}{1000} + \frac{P_{WR}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{c_techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{v_hor}}{D_{ntanque}} - (W_1 + W_{prod_fund}) < 0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\left(F_p \cdot \frac{P_{i_diseño}}{1000} + \frac{P_{WR}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{c_techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{v_hor}}{D_{ntanque}} - (W_1 + W_{prod_fund}) = -3207.435 \cdot \text{tonf}$$

Comb6_{upft} = "NO APLICA"

Por carga de sismo y presión de diseño

$$\text{Comb7}_{\text{upft}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \left(F_p \cdot \frac{P_{i_dise\tilde{n}o}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{c_techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^{2.785} + \frac{4 \cdot M_{s_oper}}{D_{ntanque}} - (W_1 + W_{prod_fund}) \cdot (1 - 0.4A_v) < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"NO APLICA"} & \text{if } \left(F_p \cdot \frac{P_{i_dise\tilde{n}o}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{c_techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^{2.785} + \frac{4 \cdot M_{s_oper}}{D_{ntanque}} - (W_1 + W_{prod_fund}) \cdot (1 - 0.4A_v) < 0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\left(F_p \cdot \frac{P_{i_dise\tilde{n}o}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{c_techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^{2.785} + \frac{4 \cdot M_{s_oper}}{D_{ntanque}} - (W_1 + W_{prod_fund}) \cdot (1 - 0.4A_v) = -1814.707 \text{ tonf}$$

$$\text{Comb7}_{\text{upft}} = \text{"NO APLICA"}$$

Por presi3n de fragilidad

$$\text{Comb8}_{\text{upft}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \left(3 \frac{P_{i_falla}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^{2.785} - W_3 < W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \\ \text{"NO APLICA"} & \text{if } techo = \text{"NO FRANGIBLE"} \vee \left(3 \frac{P_{i_falla}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^{2.785} - W_3 < 0 \end{cases}$$

$$\left(3 \frac{P_{i_falla}}{1000} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{techo} \cdot 1000 \right) \cdot D_{ntanque}^{2.785} - W_3 = 3428.66 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Comb8}_{\text{upft}} = \text{"NO APLICA"}$$

Se revisar3 las condiciones de estabilidad para tanques con presiones internas menores a 2.5 psi

CHEQUEO DE ESTABILIDAD LEVANTAMIENTO POR PRESION INTERNA MENOR A 2.5 PSI

$$\text{Comb1}_{\text{Pint_A}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } 1.5W_{pi_dise\tilde{n}o} + W_{v_upft} < W_{c_cuerpo} + W_{c_techo} + W_{fund_T} + W_{s_T} \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$1.5W_{pi_dise\tilde{n}o} + W_{v_upft} = 1127.847 \cdot \text{tonf}$$

$$W_{c_cuerpo} + W_{c_techo} + W_{fund_T} + W_{s_T} = 2197.924 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Comb1}_{\text{Pint_A}} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\text{Comb2}_{\text{Pint_A}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } 1.25W_{\text{pi_prueba}} + W_{\text{v_upft}} < W_{\text{N_cuerpo}} + W_{\text{N_techo}} + W_{\text{fund_T}} \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$1.25W_{\text{pi_prueba}} + W_{\text{v_upft}} = 628.183 \text{ tonl}$$

$$W_{\text{N_cuerpo}} + W_{\text{N_techo}} + W_{\text{fund_T}} = 1324.267 \text{ tonl}$$

$$\text{Comb2}_{\text{Pint_A}} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\text{Comb3}_{\text{Pint_A}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } 1.25W_{\text{pi_falla}} < W_{\text{c_cuerpo}} + W_{\text{c_techo}} + W_{\text{c_fondo}} + W_{\text{fund_T}} + w_{\text{prod}} \pi D_{\text{ntanque}} \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$1.25W_{\text{pi_falla}} = 1497.76 \text{ tonl}$$

$$W_{\text{c_cuerpo}} + W_{\text{c_techo}} + W_{\text{c_fondo}} + W_{\text{fund_T}} + w_{\text{prod}} \pi D_{\text{ntanque}} = 1599.227 \text{ tonl}$$

$$\text{Comb3}_{\text{Pint_A}} = \text{"CUMPLE"}$$

CHEQUEO ESTABILIDAD AL VOLCAMIENTO Y AL DESLIZAMIENTO

$$FS_{\text{volcamiento}} := 2.0 \quad FS_{\text{deslizamiento}} := 1.50$$

Volcamiento por sismo tanque en operación

$$\text{Comb1}_{\text{V_sism}} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{0.5 \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot (W_{\text{T_oper}} + W_{\text{fund_T}} + W_{\text{s_T}})}{M_{\text{s_oper}}} \geq 2.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{0.5 \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot (W_{\text{T_oper}} + W_{\text{fund_T}} + W_{\text{s_T}})}{M_{\text{s_oper}}} = 21.372$$

$$\text{Comb1}_{\text{V_sism}} = \text{"CUMPLE"}$$

Volcamiento por sismo tanque vacío

$$\text{Comb2}_{V_sism} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{0.5 \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot (W_{T_vacío} + W_{\text{fund_T}} + W_{S_T})}{M_{S_vacío}} \geq 2.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{0.5 \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot (W_{T_vacío} + W_{\text{fund_T}} + W_{S_T})}{M_{S_vacío}} = 11.916$$

$$\text{Comb2}_{V_sism} = \text{"CUMPLE"}$$

Volcamiento por viento tanque en operación

$$\text{Comb3}_{V_viento} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{0.5 \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot (W_{T_oper} + W_{\text{fund_T}} + W_{S_T})}{M_{V_total}} \geq 2.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Comb3}_{V_viento} = \text{"CUMPLE"}$$

Volcamiento por viento tanque vacío

$$\text{Comb4}_{V_viento} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{0.5 \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot (W_{T_vacío} + W_{\text{fund_T}} + W_{S_T})}{M_{V_total} + M_{pi_diseño}} \geq 2.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{0.5 \cdot D_{\text{ntanque}} \cdot (W_{T_vacío} + W_{\text{fund_T}} + W_{S_T})}{M_{V_total} + M_{pi_diseño}} = 3.075$$

$$\text{Comb4}_{V_viento} = \text{"CUMPLE"}$$

Deslizamiento por sismo tanque en operación

$$\text{Comb1}_{D_sism} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_oper} + W_{\text{fund_T}} + W_{S_T}) \cdot (1 - 0.4A_V)}{V_{s_oper}} \geq 1.5 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_oper} + W_{fund_T} + W_{s_T}) \cdot (1 - 0.4A_V)}{V_{s_oper}} = 3.037$$

Comb1_{D_sism} = "CUMPLE"

Deslizamiento por sismo tanque vacío

$$\text{Comb2}_{D_sism} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_vacío} + W_{fund_T} + W_{s_T}) \cdot (1 - 0.4A_V)}{V_{s_vacío}} \geq 1.5 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_vacío} + W_{fund_T} + W_{s_T}) \cdot (1 - 0.4A_V)}{V_{s_vacío}} = 12.345$$

Comb2_{D_sism} = "CUMPLE"

Deslizamiento por viento tanque en operación

$$\text{Comb3}_{D_viento} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_oper} + W_{fund_T} + W_{s_T})}{W_{v_hor}} \geq 1.5 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_oper} + W_{fund_T} + W_{s_T})}{W_{v_hor}} = 2627.322$$

Comb3_{D_viento} = "CUMPLE"

Deslizamiento por viento tanque vacío

$$\text{Comb4}_{D_viento} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_vacío} + W_{fund_T} + W_{s_T})}{W_{v_hor}} \geq 1.5 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\mu_{f_c} \cdot (W_{T_vacío} + W_{fund_T} + W_{s_T})}{W_{v_hor}} = 540.867$$

Comb4_{D_viento} = "CUMPLE"

VERIFICACIÓN CAPACIDAD PORTANTE

En el ring-wall

$$\sigma_{1_rw} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prod_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + P_{i_oper} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo}) + \frac{W_{fund_T}}{\pi \cdot \left(R_{rw_ext} + B_{ext_zap} - \frac{B_{T_zap}}{2} \right)}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{1_rw} = 23.978 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Check}_1 := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{1_rw}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Check}_1 = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{2_rw} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prodMAX_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + P_{i_prueba} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo}) + \frac{W_{fund_T}}{2\pi \cdot \left(R_{rw_ext} + B_{ext_zap} - \frac{B_{T_zap}}{2} \right)}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{2_rw} = 32.58 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Check}_2 := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{2_rw}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 & \frac{\sigma_{2_rw}}{\sigma_{adm}} = 0.999 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Check}_2 = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{3_rw} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + w_{v_ringw} + F_p \cdot P_{i_diseño} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo}) + \frac{W_{fund_T}}{\pi \cdot \left(R_{rw_ext} + B_{ext_zap} - \frac{B_{T_zap}}{2} \right)}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{3_rw} = 18.443 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Check}_3 := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{3_rw}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 & \frac{\sigma_{3_rw}}{\sigma_{adm}} = 0.566 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Check}_3 = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{4_rw} := \frac{\frac{W_{T_vacio} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + w_{v_ringw} + 0.4 \cdot P_{ext} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fond}) + \frac{W_{fund_T}}{2\pi \cdot \left(R_{rw_ext} + B_{ext_zap} - \frac{B_{T_zap}}{2} \right)}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{4_rw} = 9.748 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Check}_4 := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{4_rw}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 & \frac{\sigma_{4_rw}}{\sigma_{adm}} = 0.299 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Check}_4 = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{5_rw} := \frac{\frac{W_{T_vacio} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prod_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fond})} + w_{s_ringw_oper} + F_p \cdot P_i \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fond}) + \frac{W_{fund_T}}{2\pi \cdot \left(R_{rw_ext} + B_{ext_zap} - \frac{B_{T_zap}}{2} \right)}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{5_rw} = 30.006 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Check}_5 := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{5_rw}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 & \frac{\sigma_{5_rw}}{\sigma_{adm}} = 0.92 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Check}_5 = \text{"CUMPLE"}$$

En el fondo del tanque

$$\sigma_{1_Fond_TK} := \gamma \cdot \text{prod} \cdot H_{\text{ntanque}} + P_{i_oper}$$

$$\text{Check}_{1TK} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{1_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \frac{\sigma_{1_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} = 0.408$$

$$\text{Check}_{1TK} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{2_Fond_TK} := \gamma \cdot \text{prod} \cdot H_{HL} + P_{i_prueba}$$

$$\text{Check}_{2TK} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{2_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \frac{\sigma_{2_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} = 0.416$$

$$\text{Check}_{2TK} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{3_Fond_TK} := \gamma \cdot \text{prod} \cdot H_{\text{ntanque}} + F_p \cdot P_{i_dise\tilde{n}o}$$

$$\text{Check}_{3TK} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{3_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \frac{\sigma_{3_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} = 0.416$$

$$\text{Check}_{3TK} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{4_Fond_TK} := \gamma \cdot \text{prod} \cdot H_{\text{ntanque}} + 0.4P_{ext}$$

$$\sigma_{4_Fond_TK} = 13.332 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Check}_{4TK} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{4_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} \leq 1.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \frac{\sigma_{4_Fond_TK}}{\sigma_{adm}} = 0.409$$

$$\text{Check}_{4TK} = \text{"CUMPLE"}$$

$$\sigma_{5_Fond_TK} := \gamma \text{ prod} \cdot H_{\text{ntanque}} (1 + 0.4A_v) + F_p \cdot P_i_{\text{diseño}}$$

$$\sigma_{5_Fond_TK} = 14.874 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Check}_{5TK} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } \frac{\sigma_{5_Fond_TK}}{\sigma_{\text{adm}}} \leq 1.0 \\ \text{"REVISAR RING-WALL"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \frac{\sigma_{5_Fond_TK}}{\sigma_{\text{adm}}} = 0.456$$

$$\text{Check}_{5TK} = \text{"CUMPLE"}$$

DISEÑO CONCRETO REFORZADO RING-WALL

$$f'_c := 25\text{MPa} \quad \rho_{\text{min}} := 0.003\%$$

$$f_y := 420\text{MPa} \quad \phi_v := 0.75$$

$$\phi_b := 0.9$$

Fuerza Hoop Tension

Se procede a mayorar cada una de las combinaciones para cada estado límites de resistencia

$$F_{\text{hoop1}} := \left[1.4 \left[\gamma \text{ prod} \cdot H_{\text{HL}} + \frac{(W_{\text{misc}} + W_{\text{c_fondo}} + W_{\text{pi_oper}})}{A_{\text{fondo}}} \right] + \gamma \text{ sf} \cdot \frac{H_{\text{T_rw}}}{2} \right] \cdot R_{\text{tanque}} K_o \cdot H_{\text{T_rw}}$$

$$F_{\text{hoop1}} = 358.072 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{\text{hoop2}} := \left[1.4 \left[\gamma \text{ prod} \cdot H_{\text{ntanque}} + \frac{(W_{\text{misc}} + W_{\text{c_fondo}} + W_{\text{pi_prueba}})}{A_{\text{fondo}}} \right] + \gamma \text{ sf} \cdot \frac{H_{\text{T_rw}}}{2} \right] \cdot R_{\text{tanque}} K_o \cdot H_{\text{T_rw}}$$

$$F_{\text{hoop2}} = 379.567 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{\text{hoop3}} := \left[1.2 \left[\gamma \text{ prod} \cdot H_{\text{ntanque}} + \frac{(W_{\text{misc}} + W_{\text{c_fondo}} + 0.4W_{\text{pi_oper}})}{A_{\text{fondo}}} \right] + 1.4(0.4A_v) \left(\gamma \text{ prod} \cdot H_{\text{ntanque}} + \frac{W_{\text{misc}} + W_{\text{c_fondo}}}{A_{\text{fondo}}} \right) + \gamma \text{ sf} \cdot \frac{H_{\text{T_rw}}}{2} \right] \cdot R_{\text{tanque}} K_o \cdot H_{\text{T_rw}}$$

$$F_{\text{hoop3}} = 348.82 \cdot \text{tonf}$$

$$F_{u_hoop} := \max(F_{\text{hoop1}}, F_{\text{hoop2}}, F_{\text{hoop3}})$$

$$A_{s_hoop} := \frac{F_{u_hoop}}{0.9 \cdot f_y}$$

$$A_{s_hoop} = 8933.331 \cdot \text{mm}^2$$

Twist Moment

$$B_{int_shell} := B_{rw} - (R_{rw_ext} - R_{tanque})^2$$

$$B_{int_shell} = 0.825 \text{m}$$

Ancho del ring-wall por fuera del límite del diámetro de las láminas del tanque

A partir del diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 6,, se determina el Twist moment para cada combinación mayorada

$$M_{tw_1} := 1.4 \frac{(W_{N_cuerpo} + W_{N_techo} + W_{misc})}{\pi \cdot D_{ntanque}} \cdot \left(\frac{B_{rw}}{2} - B_{int_shell} \right) + 1.4 \left[w_{prod_fund}(B_{int_shell}) + P_{i_diseño} \cdot (B_{int_shell})^2 \right]$$

$$M_{tw_1} = 49.223 \cdot \frac{\text{tonf} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{ult_1} := M_{tw_1} \cdot (R_{tanque} - B_{shell_fondo} + B_{T_zap})$$

$$M_{ult_1} = 728.532 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{tw_2} := 1.4 \frac{(W_{N_cuerpo} + W_{N_techo} + W_{misc})}{\pi \cdot D_{ntanque}} \cdot \left(\frac{B_{rw}}{2} - B_{int_shell} \right) + 1.4 \left[w_{prodMAX_fund}(B_{int_shell}) + P_{i_prueba} \cdot (B_{int_shell})^2 \right]$$

$$M_{tw_2} = 47.692 \cdot \text{tonf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{ult_2} := M_{tw_2} \cdot (R_{tanque} - B_{shell_fondo} + B_{T_zap})$$

$$M_{ult_2} = 705.872 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{tw_2} := 1.4 \cdot \frac{(W_{N_cuerpo} + W_{N_techo} + W_{misc})}{\pi \cdot D_{tanque}} \cdot \left(\frac{B_{rw}}{2} - B_{int_shell} \right) + 1.4 \cdot [w_{prodMAX_fund}(B_{int_shell}) + P_{I_prueba}(B_{int_shell})^2]$$

$$M_{tw_2} = 47.692 \cdot \text{tonf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{ult_2} := M_{tw_2} \cdot (R_{tanque} - B_{shell_fondo} + B_{T_zap})$$

$$M_{ult_2} = 705.872 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{tw_3} := 1.2 \cdot \frac{(W_{N_cuerpo} + W_{N_techo} + W_{misc})}{\pi \cdot D_{tanque}} \cdot \left(\frac{B_{rw}}{2} - B_{int_shell} \right) + w_{prod_fund} B_{int_shell} + 0.4 \cdot P_{i_diseño} B_{int_shell}^2 + 1.4 \cdot w_{s_ringw_oper} \left(\frac{B_{rw}}{2} - B_{int_shell} \right)$$

$$M_{tw_3} = 31.1 \cdot \text{tonf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{ult_3} := M_{tw_3} \cdot (R_{tanque} - B_{shell_fondo} + B_{T_zap})$$

$$M_{ult_3} = 460.297 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$M_{ult_tw} := \max(M_{ult_1}, M_{ult_2}, M_{ult_3})$$

$$M_{ult_tw} = 728.532 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$R_n := \frac{M_{ult_tw}}{\phi \cdot b \cdot B_{rw} \cdot H_{T_rw}^2}$$

$$\rho_{req} := \frac{0.85 f'_c}{f_y} - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot R_n}{0.85 \cdot f'_c}}$$

$$A_{s_tw} := \begin{cases} \rho_{min} \cdot B_{rw} \cdot (H_{T_rw} - 0.05\text{m}) & \text{if } \rho_{req} < \rho_{min} \\ \rho_{req} \cdot B_{rw} \cdot (H_{T_rw} - 0.05\text{m}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{s_tw} = 1.008 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

Refuerzo mínimo vertical por retracción y fraguado

$$\rho_{\min_v} := 0.0015$$

$$A_{s_min_v} := \rho_{\min_v} \cdot B_{rw} \cdot 1.0 \frac{m}{m}$$

$$A_{s_min_v} = 1950 \cdot \frac{mm^2}{m}$$

Refuerzo mínimo horizontal por retracción y fraguado

$$\rho_{\min_h} := 0.0025$$

$$A_{s_min_h} := \rho_{\min_h} \cdot B_{rw} \cdot H_{T_rw}$$

$$A_{s_min_h} = 7800 \cdot mm^2$$

Acero de refuerzo ring-wall

$$A_{T_req} := \begin{cases} A_{s_min_h} & \text{if } A_{s_min_h} > A_{s_tw} + A_{s_hoop} \\ A_{s_tw} + A_{s_hoop} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{s_tw} + A_{s_hoop} = 1.901 \times 10^4 mm^2$$

$$A_{T_req} = 1.901 \times 10^4 mm^2$$

Refuerzo a flexión en la zapata por presión de suelo

$$\sigma_{zap1} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prod_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + P_{i_oper} \cdot B_{shell_fondo}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{zap1} = 12.614 \frac{tonf}{m^2}$$

$$\sigma_{zap2} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prodMAX_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + P_{i_prueba} \cdot B_{shell_fondo}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{zap2} = 12.848 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{zap3} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + w_{v_ringw} + F_p \cdot P_i_{diseño} \cdot B_{shell_fondo}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{zap3} = 1.459 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{zap4} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + w_{v_ringw} + 0.4 \cdot P_{ext} \cdot B_{shell_fondo}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{zap4} = 1.256 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{zap5} := \frac{\frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prod_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + w_{s_ringw_oper} + F_p \cdot P_i_{diseño} \cdot B_{shell_fondo}}{B_{T_zap}}$$

$$\sigma_{zap5} = 16.697 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$M_{ult_zap} := \max(\sigma_{zap1}, \sigma_{zap2}, \sigma_{zap3}, \sigma_{zap4}, \sigma_{zap5}) \cdot 1\text{m} \cdot \frac{B_{int_zap}^2}{2}$$

$$M_{ult_zap} = 28.572 \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$R_{n_zap} := \frac{M_{ult_zap}}{\phi_b \cdot 1\text{m} \cdot (H_{zap} - 0.05\text{m})^2}$$

$$R_{n_zap} = 104.948 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$$

$$\rho_{req_zap} := \frac{0.85f'_c}{f_y} - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot R_{n_zap}}{0.85 \cdot f'_c}}$$

$$A_{sf_zap} := \begin{cases} \rho_{min} \cdot 1\text{m} \cdot (H_{zap} - 0.05\text{m}) & \text{if } \rho_{req} < \rho_{min} \\ \rho_{req} \cdot 1\text{m} \cdot (H_{zap} - 0.05\text{m}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{sf_zap} = 1815 \text{mm}^2$$

Chequeo cortante ringwall

$$N_{u_rw} := \frac{F_{u_hoop}}{A_{T_fund}} \cdot A_{T_rw}$$

$$V_{n_rw} := 2 \cdot \left(1 \frac{N}{m^2} + \frac{0.3 N_{u_rw}}{1.0m \cdot B_{rw}} \right) \cdot \frac{\sqrt{f'_c}}{6 \cdot \sqrt{Pa}} \cdot 1.m \cdot (H_{T_rw} - 0.05m)$$

$$V_{n_rw} = 2.004 \times 10^5 \cdot \text{tonf}$$

$$V_{ult_rw} := \left[\frac{F_{u_hoop}}{(R_{tanque} \cdot K_o \cdot H_{T_rw})} + 1.4 \cdot \gamma_{sf} \cdot H_{T_rw} \right] \cdot K_o \cdot H_{T_rw} \cdot 1m$$

$$V_{ult_rw} = 34.586 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Check_corte}_{rw} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{ult_rw} < V_{n_rw} \\ \text{"REVISAR"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Check_corte}_{rw} = \text{"CUMPLE"}$$

Chequeo cortante zapata

$$V_{n_zap} := 0.75 \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \sqrt{MPa} \cdot \frac{1m}{m} \cdot (H_{zap} - 0.05m) \cdot 1000$$

$$V_{n_zap} = 3.864 \times 10^4 \frac{\text{tonf}}{m}$$

Se determina la máxima fuerza cortante actuante

$$V_1 := \frac{\left[P_{i_diseño} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{c_techo} \right] \cdot D_{ntanque}^{2.785} - W_1}{\pi \cdot D_{ntanque}}$$

$$V_1 = 8321.841 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_2 := \frac{\left[P_{i_prueba} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{c_techo} \right] \cdot D_{ntanque}^{2.785} - W_1}{\pi \cdot D_{ntanque}} \quad V_2 = 5547.658 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_3 := \frac{\left[1.5P_{i_falla} - \left(0.08 \cdot \frac{N}{m^3} \right) t_{techo} \right] \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_3}{\pi \cdot D_{ntanque}}$$

$$V_3 = 1.996 \times 10^4 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_4 := \frac{P_{WR} \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{v_hor}}{D_{ntanque}} - W_2}{\pi \cdot D_{ntanque}}$$

$$V_4 = -3.397 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_5 := \frac{\left(F_p \cdot P_{i_diseño} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{c_techo} \right) \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 + \frac{4 \cdot M_{s_oper}}{D_{ntanque}} - (W_1 + W_{prod_fund}) \cdot (1 - 0.4A_v)}{\pi \cdot D_{ntanque}}$$

$$V_5 = 3306.347 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_6 := \frac{\left(3P_{i_falla} - 0.08 \cdot \frac{N}{m^3} t_{techo} \right) \cdot D_{ntanque}^2 \cdot 785 - W_3}{\pi \cdot D_{ntanque}}$$

$$V_6 = 3.991 \times 10^4 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_7 := \frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prod_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + P_{i_diseño} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})$$

$$V_7 = 138.904 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_8 := \frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prodMAX_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + P_{i_prueba} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})$$

$$V_8 = 106.945 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_9 := \frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + w_{v_ringw} + F_p \cdot P_{i_diseño} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})$$

$$V_9 = 41.041 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$V_{10} := \frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + w_{v_ringw} + 0.4 \cdot P_{ext} \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})$$

$$V_{10} = 22.469 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_{11} := \frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prod_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + w_{s_ringw_oper} + F_p \cdot P_i_diseño \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})$$

$$V_{11} = 97.422 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_{12} := \frac{W_{T_vacío} + W_{misc}}{\pi \cdot D_{ntanque}} + \frac{W_{prod_fund}}{\pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})} + w_{s_ringw_oper} + F_p \cdot P_i_diseño \cdot \pi \cdot (D_{ntanque} - B_{shell_fondo})$$

$$V_{12} = 97.422 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_{13} := 1.5 \frac{W_{pi_diseño} + W_{v_upf}}{\pi \cdot D_{ntanque}}$$

$$V_{13} = 12.55 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_{14} := 1.25 \frac{W_{pi_prueba}}{(\pi \cdot D_{ntanque})} + \frac{W_{v_upft}}{(\pi \cdot D_{ntanque})}$$

$$V_{14} = 6.979 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_{15} := 1.25 \frac{W_{pi_falla}}{(\pi \cdot D_{ntanque})}$$

$$V_{15} = 16.64 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_{ult_max} := \max(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{14}, V_{15})$$

$$V_{ult_max} = 3.991 \times 10^4 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$V_{ult_zap} := 1.4 \cdot \frac{\left(V_{ult_max} + \frac{W_{zap_T}}{\text{m}} \right)}{2}$$

$$V_{ult_zap} = 2.828 \times 10^4 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$\text{Check_corte}_{zap} := \begin{cases} \text{"CUMPLE"} & \text{if } V_{ult_zap} < V_{n_zap} \\ \text{"REVISAR"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Check_corte}_{zap} = \text{"CUMPLE"}$$

ESQUEMA DISEÑO DE LA FUNDACIÓN Y REFUERZOS

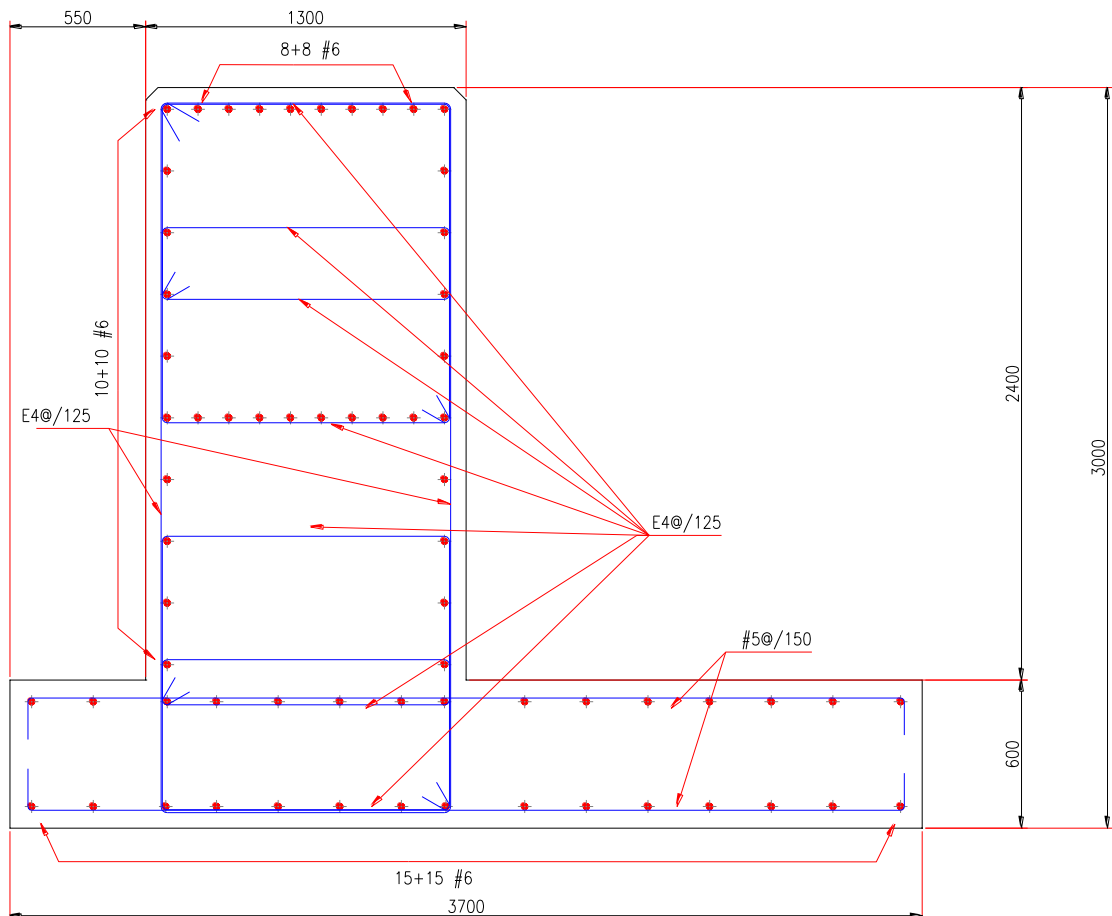


Figura 12. Geometría de la fundación y refuerzos

4. CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS

Además del adecuado análisis y diseño de la fundación existen, por buenas prácticas de la ingeniería y construcción, algunas recomendaciones que deben considerarse con el fin de garantizar la integridad del conjunto tanque-fundación tanto durante la construcción y montaje como en su vida útil:

- Conformación del relleno

Conformación cónica descendente del relleno desde el centro del tanque hacia los bordes con el fin de compensar los asentamientos a largo plazo (secundarios) dado que en el centro del tanque se generan las mayores presiones de contacto. En la práctica se acostumbra a dejar 25 mm en vertical por cada 300 mm en horizontal y, en algunas ocasiones, los últimos 9.00 m decrecer 0.50 m hasta el nivel 0.00 en forma parabólica. Esto contribuye adicionalmente como protección frente a la corrosión del fondo del tanque dado que se garantiza un correcto drenaje lateral. Siempre se deberá especificar, el espesor de las capas, material y porcentaje del ensayo proctor que especifique el estudio de suelos así como las recomendaciones de inclinación de taludes de la excavación para garantizar su estabilidad durante la construcción.

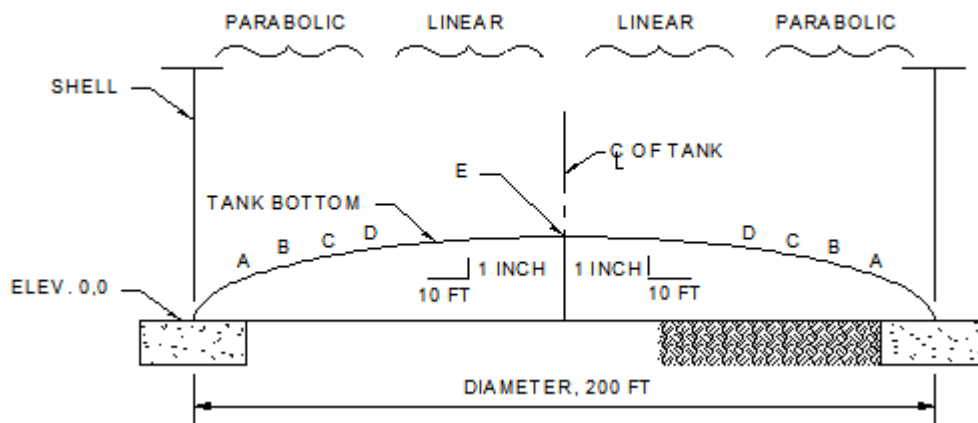


Figura 13. Conformación cónica del relleno para compensación de asentamiento

- Niveles de la superficie de la fundación

El nivel superior del ring-wall debe sobresalir (adicional al asentamiento esperado): 80 mm para áreas pavimentadas alrededor del tanque o 150 mm

para áreas no pavimentadas. Pero otro aspecto que lo condiciona es el cleanout, que es la entrada del tanque para mantenimiento y siempre queda por debajo del nivel superior del concreto del ring-wall (Ver figura 13). El detalle debe incluirse en los planos de construcción.

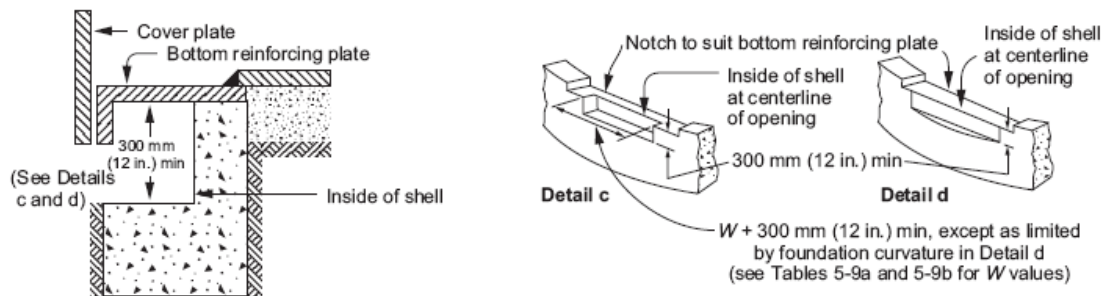


Figura 14. Detalle para cleanout cuando el tanque se soporta en un ring-wall

Es muy importante que, una vez definidos los planos de fabricación del tanque, se confirme esta información con el fin de actualizar los correspondientes planos y evitar algún error en la construcción por ejemplo: entrada enterrada.

- Tolerancias constructivas

La superficie superior del concreto para el ring-wall debe nivelarse ± 3 mm en 9 m circunferenciales y ± 12 mm del total del perímetro. Las anteriores tolerancias constructivas son medidas con respecto al promedio de la elevación del ring-wall indicada en los planos de construcción. De esta manera se puede garantizar que las paredes del tanque estén soportadas uniformemente en la fundación y se puede lograr asimismo una distribución uniforme de esfuerzos por peso propio del tanque a la fundación.

- Camas de protección frente a la corrosión

Para prevenir la corrosión del fondo del tanque, el relleno dentro del anillo se debe cubrir con un espesor de mínimo 100 mm de arena limpia sin sobreespesores con un sistema de protección catódica con el fin de prevenir corrosión temprana. Anteriormente, se usaba arena con mezcla asfáltica, sin embargo se debe evitar dado que en ciertas condiciones esto no contribuye a

la protección frente a la corrosión y puede ocasionar leves contaminaciones al subsuelo. La información de protección catódica deberá ser confirmada por un estudio especializado y ser confirmado previo a la construcción y conformación del tanque y el relleno

- Sistema secundario de contención de líquido

Para prevenir fugas y contaminación al subsuelo se debe proveer de un sistema de impermeabilización encima del relleno que soportará el fondo del tanque. Varios materiales se pueden emplear para ello (membranas poliméricas, elastoméricas, membranas de arcilla). Sin embargo el más común por costo, versatilidad y desempeño se usa las membranas en HDPE (High Density Poliethylene, por sus siglas en Inglés) la cual deberá anclarse al ring-wall posterior a su construcción y posterior a la conformación del relleno del interior del tanque

5. CONCLUSIONES

El diseño de la fundación de un tanque metálico para almacenamiento cubierto por la norma API-650, implica coordinar entre diferentes disciplinas que participan en la definición del tanque: Ingeniería de procesos y mecánica para las hojas de datos que incluyan lo requerido en el numeral 4.1.; Ingeniería geotécnica, para los parámetros geotécnicos requeridos en el diseño (capacidad portante, asentamientos, peso específico, etc.), recomendaciones constructivas para el relleno de fundación; e ingeniería eléctrica, para las recomendaciones de protección catódica.

Los tanque que poseen presión interna, generalmente requieren cimentaciones de mayores dimensiones (incluso con zapata) y requerimientos de anclajes, que aquellos con presión atmosférica y que usualmente son de frecuente uso en el sector Oil&Gas.

Se deben tener en cuenta los aspectos constructivos y plasmarlos en los planos correspondientes, para evitar afectar tanto la construcción como la integridad del tanque-fundación durante la operación y vida útil del tanque.

El método hidrodinámico de análisis abordado en la presente monografía, es pseudo-estático (análisis dinámico espectral) considerando una simplificación para el primer modo de vibración del contenido del tanque bajo una excitación sísmica. Fuera del alcance de este trabajo, se persigue que se realicen comparaciones con los métodos dinámicos que incluyan una análisis de al respuesta del tanque y fundación frente a los modos superiores de vibración (por ejemplo, modo torsional, rocking, etc.).

El hoop tension y el twist moment, son las principales condiciones que gobiernan el diseño del refuerzo de la fundación. Un análisis por elementos finitos determinando los esfuerzos principales sería un buen enfoque para comparar los resultados finales y lograr una optimización y sensibilidad en el diseño correspondiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] API-650 12th Edition. Welded tanks for oil storage. American Petroleum Institute, 2013.
- [2] ASCE 7-10. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, 2010.
- [3] Housner, G.W. The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the seismological Society of America, 1963.
- [4] NSR-10. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, 2010.