

DOCUMENTO P

DISEÑO SÍSMICO DE TANQUES METÁLICOS

PDVSA FJ-251. ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA

NOTA DEL COORDINADOR

Aprobadas en Abril de 1993, estas especificaciones están incorporadas al Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA, Especialidad N° 19. Contiene comentarios no reproducidos aquí. En la Guía de Ingeniería PDVSA 90615 1.014 se ejemplifica su aplicación.

CONTENIDO	Pág
1 GENERAL	633
1.1 ALCANCE	633
1.2 REFERENCIAS	633
2 GLOSARIO Y NOTACIÓN	633
2 1 GLOSARIO	633
2.2 NOTACIÓN	635
3 MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO	637
4 ESPECTROS DE DISEÑO	638
5 COMPONENTES SÍSMICAS	639
6 COMBINACIÓN DE ACCIONES	639
7 MODELO MATEMÁTICO	639
7 1 PROCEDIMIENTO	639
7 2 PESOS EFECTIVOS	640
7 3 ALTURAS EFECTIVAS	641
7 4 PERÍODOS DE VIBRACIÓN	641
8 FUERZAS EN LA BASE DEL TANQUE	643
8 1 COMPONENTE SÍSMICA HORIZONTAL	643
8.2 COMPONENTE SÍSMICA VERTICAL	644
9. ALtura MÁXIMA DE OSCILACIÓN DEL LÍQUIDO	645
10. DISEÑO	645
10.1 GENERAL	645
10.2 RESISTENCIA AL VOLCAMIENTO	645
10.3 ESPESOR DE LA PLANCHA DE FONDO	646
10.4 COMPRESIÓN ACTUANTE EN EL ANILLO INFERIOR	646
10 5 COMPRESIÓN ADMISIBLE EN EL ANILLO INFERIOR	648
10.6 ANILLOS SUPERIORES	648
10.7 ANCLAJE DE TANQUES	648
10 8 ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL NETO	649
10 9 TUBERÍAS	650
10 10 CONSIDERACIONES ADICIONALES	650

1. GENERAL

1.1. ALCANCE

En estas especificaciones se establecen los criterios mínimos para el diseño sísmico de tanques de acero, cilíndricos, verticales, con presión interna no mayor a la presión atmosférica y que están apoyados directamente sobre el terreno

Este volumen de especificaciones va acompañado de un volumen de comentarios que tiene como propósito señalar los fundamentos de estas especificaciones y ejemplificar su aplicación.

Estas especificaciones deben ser utilizadas en conjunto con las especificaciones de Ingeniería PDVSA JA-221 "Diseño Antisísmico de Instalaciones Industriales".

Las especificaciones contenidas en la Sección 3 de ésta especificación pueden ser sustituidas por los resultados de estudios de sitio que incorporan el peligro sísmico en la zona y las características propias del subsuelo local.

1.2. REFERENCIAS

1.2.1. ESPECIFICACIONES DE INGENIERIA PDVSA

PDVSA Normas de diseño, Prevención y Protección contra Incendios.
PDVSA JA-221 Diseño Antisísmico de Instalaciones Industriales. Volumen 18.

1.2.2. REFERENCIAS DE LA INDUSTRIA

COVENIN 1618: Estructuras de Acero para Edificaciones. Proyecto, Fabricación y Construcción.
COVENIN 1753: Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones. Análisis y Diseño.
COVENIN 1756: Edificaciones Antisísmicas.
M.J.N PRIESTLEY (Editor and Chairman). Seismic Design of Storage Tanks. New Zealand National Society for Earthquake Engineering. December, 1986.
API Standard 650, Appendix E. Seismic Design of Storage Tanks. Última edición.

2. GLOSARIO Y NOTACIÓN

2.1. GLOSARIO

Amortiguamiento: Capacidad de los materiales y sistemas de disipar energía.

Análisis Dinámico: Análisis para determinar la respuesta ante solicitaciones dinámicas. Con frecuencia en las normas se hace referencia al análisis realizado en base a un espectro de diseño, tomando en cuenta las propiedades modales de la estructura y obteniendo la respuesta mediante la combinación de los valores correspondientes a cada modo.

Anclajes: Pernos, barras o planchas utilizadas para anclar el tanque al anillo de concreto.

Carga de Servicio: Es una combinación de cargas probables en condiciones normales de servicio, que la estructura debe ser capaz de resistir con sus elementos estructurales sometidos a esfuerzos admisibles, inferiores a su capacidad real.

Carga Permanente: Es la debida al peso de todos los componentes estructurales, así como los sistemas y componentes no estructurales permanentes tales como tuberías, plataformas, bandejas y equipos fijos de servicio.

Cedencia: Estado en el cual un material exhibe una desviación especificada de la proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones.

Coefficiente de Amortiguamiento Equivalente: Es la fracción del amortiguamiento crítico que incorpora las diversas formas de disipación de energía del sistema tanque-líquido-suelo.

Coefficiente Sísmico: Es el cociente entre la fuerza cortante horizontal de diseño que actúa en el nivel de base (corte basal) y el peso total por encima del mismo.

Ductilidad: Es la capacidad que poseen los componentes de un sistema estructural de hacer incursiones alternantes en el dominio inelástico, sin pérdida apreciable en su capacidad resistente (véase: Factor de Ductilidad).

Efectos Convectivos: Son aquellos efectos dinámicos asociados a las oscilaciones del líquido.

Efectos Impulsivos: Son aquellos efectos dinámicos asociados al movimiento del líquido como un cuerpo rígido

Espectros: Define la respuesta máxima de osciladores de un grado de libertad y de un mismo amortiguamiento, sometidos a una historia de aceleraciones dada, expresada en función del período.

Espectros de Diseño: Es aquel espectro asociado a sismos de diseño, en el cual se ha incorporado el amortiguamiento y el factor de reducción de respuesta correspondiente al sistema resistente a sismos.

Factor de Ductilidad: Es un valor que describe la ductilidad global esperada del sistema resistente a sismos, el cual cuantifica la relación entre los desplazamientos máximos reales y los desplazamientos calculados suponiendo un comportamiento elástico lineal de la estructura.

Factor de Reducción de Respuesta: Es el factor que divide las ordenadas del espectro de respuesta elástica para obtener el espectro de diseño

Grado de Riesgo: Escala de clasificación de riesgos que depende del número de personas expuestas y de las eventuales pérdidas económicas como consecuencia de falla o mal funcionamiento de la estructura

Modo Convectivo: Es el primer modo de vibración del líquido contenido en el tanque; el líquido experimenta un movimiento oscilatorio respecto a un eje horizontal que coincide con el diámetro del tanque.

Modo Impulsivo: Es el modo de vibración del sistema tanque-líquido en donde el líquido se mueve al unísono con el tanque.

Nivel de Base: Es el nivel de la estructura donde se admite que las acciones sísmicas se transmiten a ella.

Peligro Sísmico: Cuantifica la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos futuros que pueden afectar en forma adversa el comportamiento de instalaciones, y por ende la actividad del hombre

Período de Vibración: Es una propiedad del sistema tanque-líquido, que depende de su geometría, sus masas y sus rigideces.

Período medio de Retorno: Duración media entre ocurrencias de un determinado evento.

Probabilidad de Excedencia: Probabilidad de que un nivel específico del movimiento del terreno, o un nivel de efectos económicos o sociales causados por el sismo, sea excedido en un lugar o región durante un lapso de tiempo determinado.

Vida Útil: Número de años representativo de la duración económica probable de una instalación.

2.2. NOTACIÓN

- Ad** = Ordenada del espectro de diseño expresada como fracción de la aceleración de la gravedad. Es adimensional.
- Ao** = Aceleración máxima del terreno expresada como fracción de la aceleración de la gravedad. Es adimensional.
- D** = Diámetro del tanque, en metros.
- E** = Módulo de elasticidad de las paredes del tanque, en kilogramos por centímetro cuadrado.
- Fa** = Esfuerzo admisible de compresión en la base de la concha, en kilogramos por centímetro cuadrado.
- Fby** = Esfuerzo correspondiente al límite elástico de la plancha de fondo, en kilogramos por centímetro cuadrado.
- Fty** = Esfuerzo correspondiente al límite elástico del anillo inferior de la pared del tanque, en kilogramos por centímetro cuadrado.
- G** = Gravedad específica del líquido almacenado.
- H** = Altura máxima del líquido, en metros.
- Kh** = Coeficiente usado para el cálculo del período T1.
- Kv** = Coeficiente usado para el cálculo del período Tv.
- M** = Momento en la base del tanque debido a la combinación de los efectos impulsivos y convectivos, en kilogramo-metro.
- M1** = Momento en la base del tanque debido a los efectos impulsivos, en kilogramo-metro.
- M2** = Momento en la base del tanque debido a los efectos convectivos, en kilogramo-metro.
- P** = Probabilidad de que la aceleración del terreno no exceda el valor a, en t años.
- Pe** = Punto de ebullición del líquido (°C).

- Pi** = Punto de inflamación del líquido (°C).
- R** = Radio nominal del tanque, en metros.
- T** = Período fundamental de la estructura, en segundos.
- T1** = Período del modo impulsivo, en segundos.
- T2** = Período del modo convectivo, en segundos.
- Tv** = Período de vibración vertical del sistema tanque-líquido, en segundos.
- T°** = Valor del período que caracteriza el espectro elástico normalizado, en segundos.
- T*** = Valor del período que caracteriza el espectro elástico normalizado, en segundos.
- V** = Fuerza cortante en la base del tanque debida a los efectos impulsivos y convectivos, en kilogramos.
- V1** = Fuerza cortante en la base del tanque debida a los efectos impulsivos, en kilogramos.
- V2** = Fuerza cortante en la base del tanque debida a los efectos convectivos, en kilogramos.
- W** = Peso total del líquido, en kilogramos.
- WL** = Máximo peso del contenido del tanque que se puede utilizar para resistir el momento de vuelco, en kilogramos por metro.
- Wp** = Peso de las paredes del tanque, en kilogramos.
- Wt** = Peso de las paredes del tanque más el peso de la porción del techo que se apoya en las mismas, en kilogramos por metro lineal de circunferencia.
- Wte** = Peso del techo del tanque, en kilogramos
- W1** = Peso efectivo del líquido que vibra al unísono con el tanque (modo impulsivo), en kilogramos.
- W2** = Peso efectivo del líquido que participa en el primer modo de vibración del líquido (modo convectivo), en kilogramos.
- Xp** = Altura del centro de gravedad de las paredes, referida a la base del tanque, en metros
- Xte** = Altura del centro de gravedad del techo, referida a la base del tanque, en metros.
- X1** = Altura del peso W1, en metros.
- X2** = Altura del peso W2, en metros.
- a** = Aceleración máxima del terreno (cm/s²).
- a*** = Aceleración característica del peligro sísmico en cada localidad (cm/s²).
- b** = Fuerza de compresión en la base de la concha, en kilogramos por metro lineal de circunferencia.
- d** = Altura máxima de oscilación del líquido, en metros.
- fc** = Esfuerzo de compresión actuante en el anillo inferior de la pared del tanque, en kilogramos por centímetros cuadrados.
- g** = Aceleración de gravedad igual a 981 cm/seg².

- p** = Exponente que define la rama descendente del espectro.
p1 = Probabilidad de excedencia anual.
t = Vida útil o vida económica asignada a la instalación (años)
tc = Espesor del anillo inferior de la pared del tanque, en milímetros.
tb = Espesor de la plancha de fondo que está debajo del anillo inferior, en milímetros
tm = Espesor promedio de los anillos que constituyen la pared del tanque, en milímetros.
 β = Uno de los parámetros que definen la forma de los espectros.
 β^* = Factor de amplificación espectral.
 σ = Esfuerzo circunferencial máximo en el anillo inferior de la pared del tanque, en kg/cm².
 $\sigma_{\theta h}$ = Esfuerzo circunferencial en la base de la concha, debido a la componente horizontal del sismo, en kg/cm².
 $\sigma_{\theta v}$ = Esfuerzo circunferencial en la base de la concha, debido a la componente vertical del sismo, en kg/cm².
 γ = Valor característico del peligro sísmico en cada localidad.
 γ_L = Peso específico del líquido, en kg/m²
 ξ = Coeficiente de amortiguamiento equivalente. Adimensional.

3. MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO

La aceleración máxima del terreno es una función de la probabilidad anual de excedencia del movimiento y de la vida útil del tanque.

La probabilidad de excedencia anual (p_1) del movimiento sísmico de diseño se determina según lo indicado en la Tabla 3.1. La definición del Grado de Riesgo está dada en la Sección 4 de la especificación PDVSA JA-221.

Tabla 3. 1

PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA ANUAL (p_1) DE LOS MOVIMIENTOS DE DISEÑO

CONTENIDO DEL TANQUE	GRADO DE RIESGO		
	A (MENOR)	B (INTERMEDIO)	C (MAYOR)
Líquidos no inflamables ni tóxicos, o de baja inflamabilidad	0,002	0,002	0,002
Líquidos de mediana inflamabilidad.	0,002	0,002	0,001
Líquidos tóxicos o de alta inflamabilidad.	0,002	0,001	0,0005
Agua contra incendio.	0,001	0,001	X

X =Se seleccionará el valor más pequeño entre los valores de p_1 asociados a cada tanque de la planta.

La probabilidad (P) de no excedencia del movimiento sísmico durante la vida útil de la instalación es:

$$P = (1 - p1)^t$$

Donde "t" es la vida útil, en años.

Conocidos los valores de "P" y "t", la aceleración máxima "a" del terreno se determina según la fórmula 6.3 de la Sección 6.2 de PDVSA JA-221. Esta se refiere a las componentes horizontales del movimiento sísmico.

La aceleración de la componente vertical del movimiento sísmico es igual a 2/3 el valor de la componente horizontal.

4. ESPECTROS DE DISEÑO

Los espectros de diseño están dados en la Sección 7 de la Especificación PDVSA JA-221, expresados como una función del coeficiente de amortiguamiento equivalente ξ y el factor de ductilidad del sistema en consideración. El factor de ductilidad se tomará igual a la unidad.

El coeficiente de amortiguamiento equivalente del sistema tanque-líquido-suelo está dado en la Tabla 4.1 de esta especificación. La designación del tipo de suelo corresponde a la clasificación dada en la Sección 5.1 de PDVSA JA-221.

Tabla 4.1

COEFICIENTES DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE (ξ)

	EFECTOS IMPULSIVOS				EFECTOS CONVECTIVOS
	SUELOS S1 Y S2		SUELOS S3 Y S4		
	DIRECCIÓN HORIZONTAL	DIRECCIÓN VERTICAL	DIRECCIÓN HORIZONTAL	DIRECCIÓN VERTICAL	
TANQUES ANCLADOS	0,03 (a)	0,05	0,05 (b)	0,08	0,005
TANQUES NO ANCLADOS	0,10	0,05	0,15	0,08	0,005

(a): Se puede elevar hasta 5% si los anclajes se diseñan como anclajes dúctiles que trabajen en el rango inelástico.

(b): Se puede elevar hasta 7% si los anclajes se diseñan como anclajes dúctiles que trabajen en el rango inelástico.

Cuando se trate de determinar el espectro de diseño para los efectos convectivos, la ordenada espectral para períodos mayores que 3 segundos puede ser calculada utilizando un valor del exponente "p" igual a 1,5, en sustitución del valor dado en la Tabla 6.1 de la Especificación PDVSA JA-221.

Las fórmulas para determinar el espectro de diseño para los efectos impulsivos son las siguientes:

$$Ad = A_o \quad ; T \leq 0,05 \text{ seg}$$

$$Ad = A_o \left[1 + \left(\frac{T - 0,05}{T^o - 0,05} \right) (\beta^* - 1) \right] \quad ; 0,05 \text{ seg} < T < T^o$$

$$Ad = \beta^* A_o \quad ; T^o \leq T \leq T^*$$

$$Ad = \beta^* A_o \left(\frac{T^*}{T} \right)^p \quad ; T > T^*$$

Para los efectos convectivos, a las cuatro zonas espectrales anteriores se le añade una quinta zona dada por.

$$Ad = \beta^* A_o \left(\frac{T^*}{3} \right)^p \left(\frac{3}{T} \right)^{1,5} \quad ; T > 3,00 \text{ seg}$$

Donde:

Ad = Ordenada del espectro de diseño expresada como fracción de la aceleración de gravedad. Es adimensional;

Ao = Aceleración máxima del terreno expresada como fracción de la aceleración de gravedad. Es adimensional.

Los parámetros β^* , T^o , T^* y p están dados en la Sección 6.2.1. de PDVSA JA-221; el valor del factor de reducción R se ha supuesto igual a 1,0; $T^* = T^+$.

5. COMPONENTES SÍSMICAS

El movimiento sísmico está caracterizado por espectros actuando en cada una de las dos direcciones horizontales ortogonales y la dirección vertical.

6. COMBINACIÓN DE ACCIONES

Las tres componentes sísmicas del movimiento se consideran actuando simultáneamente. Su efecto neto se incorpora en el cálculo de las solicitaciones de diseño

7. MODELO MATEMÁTICO

7.1. PROCEDIMIENTO

El análisis sísmico descrito en esta Sección se basa en suponer que la respuesta dinámica en dirección horizontal del sistema tanque-líquido está

definida por dos modos de vibración: un modo impulsivo donde una parte del líquido se mueve al unísono con el tanque y un modo convectivo donde una parte del líquido oscila independientemente del movimiento del tanque.

El modelo dinámico está constituido por dos pesos equivalentes donde uno representa el efecto del modo impulsivo y el otro el efecto del modo convectivo. La altura equivalente de cada peso referida al fondo del tanque, se utiliza para calcular los momentos de volcamiento en la base, resultantes de los efectos hidrodinámicos.

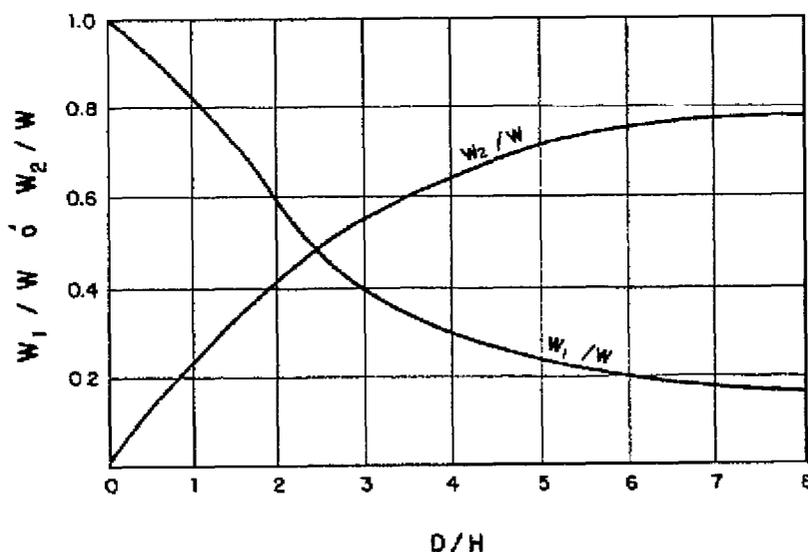
Para el cálculo de los efectos hidrodinámicos que induce la acción sísmica, se podrán utilizar modelos más refinados que los aquí indicados siempre que sea debidamente justificado.

7.2. PESOS EFECTIVOS

Los pesos efectivos W_1 y W_2 se determinan multiplicando por W los valores W_1/W y W_2/W obtenidos de la Figura 7.1, donde:

- W_1** = Peso efectivo del líquido que vibra al unísono con el tanque (modo impulsivo), en kilogramos;
- W_2** = Peso efectivo del líquido que participa en el primer modo de vibración del líquido (modo convectivo), en kilogramos;
- W** = Peso total del líquido, en kilogramos,
- D** = Diámetro nominal del tanque, en metros,
- H** = Altura máxima del líquido, en metros.

Figura 7.1



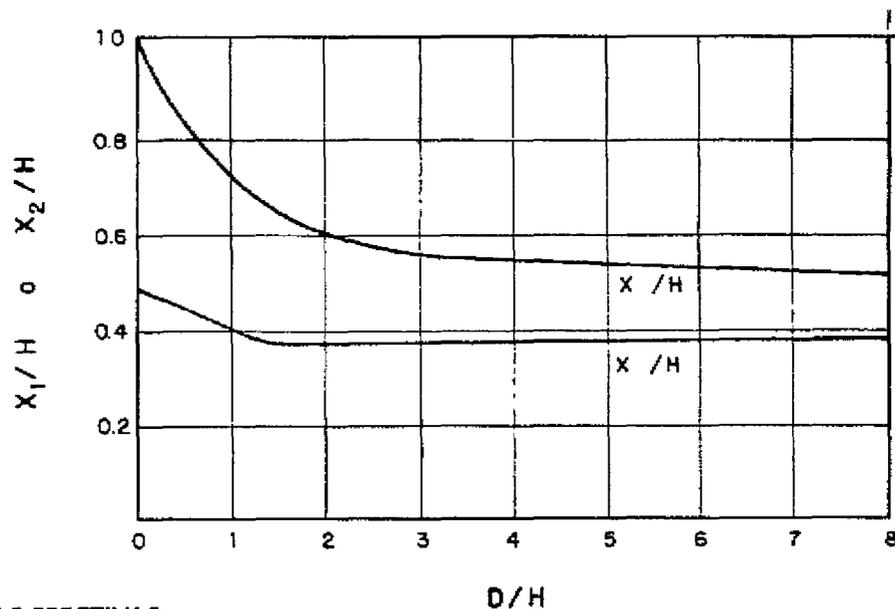
7.3. ALTURAS EFECTIVAS

Las alturas medidas desde el fondo del tanque hasta el centroide de cada peso efectivo, se obtienen de multiplicar por H los valores X_1/H y X_2/H obtenidos de la Figura 7.2, donde:

X_1 = Altura del peso W_1 , en metros;

X_2 = Altura del peso W_2 , en metros.

Figura 7.2



ALTURAS EFECTIVAS

7.4. PERIODOS DE VIBRACIÓN

7.4.1. VIBRACIÓN HORIZONTAL

El período T_1 del modo impulsivo del sistema tanque-líquido está dado por:

$$T_1 = 1,762 \frac{H}{Kh} \left[\frac{\gamma_L}{g E} \right]^{1/2}$$

Donde:

γ_L = Peso específico del líquido, en kg/m^3 ;

E = Módulo de elasticidad de las paredes del tanque, en kg/cm^2 ;

Kh = Coeficiente definido en la Figura 7.3 siendo t_m el espesor promedio (en mm) de los anillos que constituyen la pared del tanque, y R el radio nominal (en metros) del tanque;

g = Aceleración de gravedad.

Figura 7.3

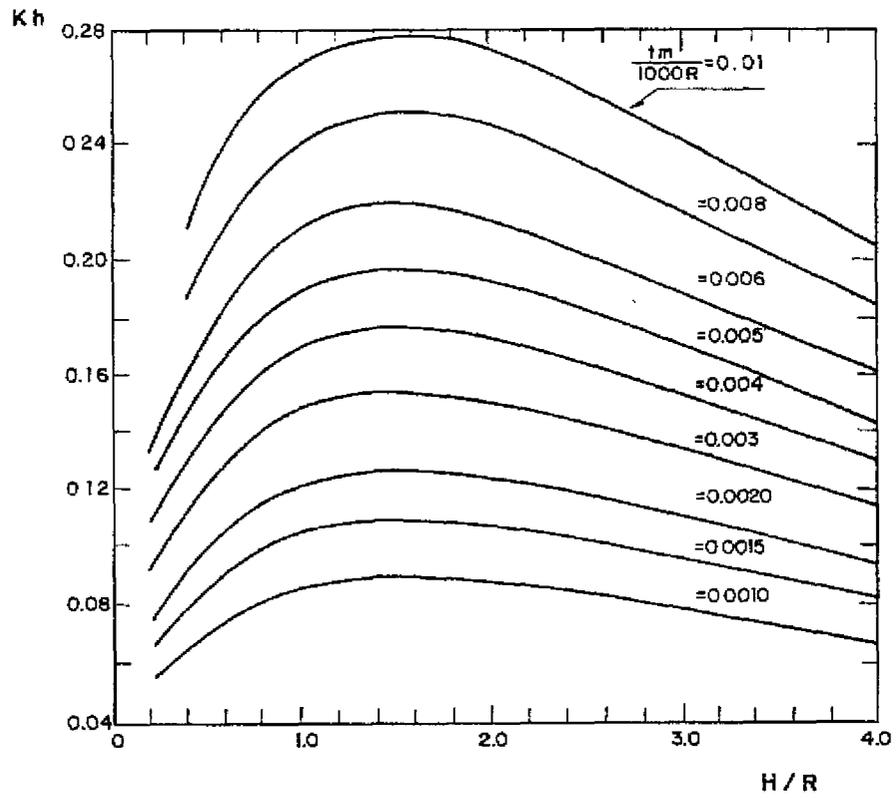
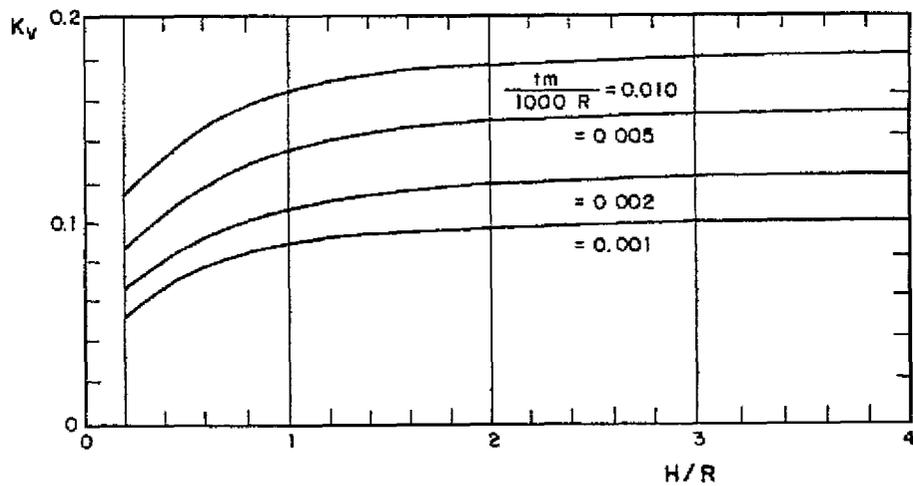
COEFICIENTE K_h

Figura 7.4

COEFICIENTE K_v

El período T2 del primer modo convectivo de oscilación del líquido está dado por:

$$T1 = \frac{20 \pi \left[\frac{D}{2g} \right]^{1/2}}{\left[1,84 \tanh (1,84 H / R) \right]^{1/2}}$$

7.4.2. VIBRACIÓN VERTICAL

El período fundamental Tv de vibración vertical del sistema tanque-líquido está dado por.

$$Tv = \frac{1,762 H}{Kv} \left[\frac{\gamma_L}{g E} \right]^{1/2}$$

Donde:

Kv = Coeficiente definido en la Figura 7 4, siendo tm el espesor promedio (en mm) de los anillos que constituyen la pared, y R el radio nominal (en metros) del tanque.

8. FUERZAS EN LA BASE DEL TANQUE

8.1. COMPONENTE SÍSMICA HORIZONTAL

Las fuerzas resultantes en la base del tanque se obtienen combinando los efectos del modo impulsivo y del modo convectivo según el criterio del valor máximo probable.

8.1.1. FUERZA CORTANTE

La fuerza cortante máxima probable V está dada por:

$$V = (V1^2 + V2^2)^{1/2}$$

$$V1 = Ad1 (W1 + Wp + Wte)$$

$$V2 = Ad2 W2$$

Donde:

V1 = Fuerza cortante en la base debida a los efectos impulsivos, en kilogramos,

V2 = Fuerza cortante en la base debida a los efectos convectivos, en kilogramos;

Ad1 = Ordenada del espectro de diseño definido en la Sección 4, para el período T1.

- Ad2** = Ordenada del espectro de diseño definido en la Sección 4, para el período T2;
W1 = Peso efectivo definido en la Sección 7.2;
W2 = Peso efectivo definido en la Sección 7.2;
Wp = Peso de las paredes del tanque, en kilogramos;
Wte = Peso del techo del tanque, en kilogramos

8.1.2. MOMENTO EN LA BASE

El momento máximo probable en la base del tanque está dado por:

$$M = (M1^2 + M2^2)^{1/2}$$

$$M1 = Ad1 (W1 X1 + Wp Xp + Wte Xte)$$

$$M2 = Ad2 W2 X2$$

Donde:

- M1** = Momento en la base del tanque debido a los efectos impulsivos, en kilogramo-metro;
M2 = Momento en la base del tanque debido a los efectos convectivos, en kilogramo-metro;
X1 = Altura efectiva definida en el párrafo 7.3;
X2 = Altura efectiva definida en el párrafo 7.3;
Xp = Altura del centro de gravedad de las paredes, referida a la base del tanque, en metros;
Xte = Altura del centro de gravedad del techo, referida a la base del tanque, en metros.

8.1.3. ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL

El esfuerzo circunferencial (kg/cm²) producido en la base de la concha por la componente horizontal del sismo está dado por:

$$\sigma_{\theta h} = \frac{V}{10 \pi H t_c}$$

Donde:

- V** = Fuerza cortante máxima probable determinada en el párrafo 8.1.1, en kilogramos;
t_c = Espesor de la base de la concha (anillo inferior), en milímetros.

8.2. COMPONENTE SÍSMICA VERTICAL

El efecto de la componente sísmica vertical genera esfuerzos circunferenciales dados por:

$$\sigma_{\theta v} = \frac{\gamma_L H R}{10 t_c} Adv$$

Donde:

- $\sigma_{\theta v}$ = Esfuerzo circunferencial en la base de la concha (anillo inferior) debido a la componente sísmica vertical, en kilogramos por centímetro cuadrado;
- γ_L = Peso específico del líquido, en kilogramos por metro cúbico;
- Adv = Ordenada del espectro de diseño de la componente vertical del sismo (Sección 5), obtenida con el período T_v (párrafo 4.2).

9. ALTURA MÁXIMA DE OSCILACIÓN DEL LÍQUIDO

La altura máxima de la onda producida por las oscilaciones del líquido está dada por:

$$d = 0,48 D Ad2$$

Donde:

- $Ad2$ = Ordenada del espectro de diseño definido en la Sección 4, para el período $T2$;
- D = Diámetro nominal del tanque, en metros;
- d = Altura máxima de oscilación del líquido, en metros;

10. DISEÑO

10.1. GENERAL

Para efectos del diseño del tanque siguiendo el método de esfuerzos admisibles, las fuerzas en la base del tanque y los esfuerzos asociados a éstas, determinados en la Sección 8, se dividen entre 1,25.

10.2. RESISTENCIA AL VOLCAMIENTO

La resistencia al momento de vuelco es suministrada por el peso de las paredes del tanque y por el anclaje de las mismas. Para tanques no anclados, esta resistencia es provista por el peso de las paredes y por una parte del peso del contenido del tanque. Este peso está dado por:

$$WL = 3,16 t_b \sqrt{F_b \gamma G H}$$

Adicionalmente, WL no debe exceder el valor de $20 G H D$.

Donde:

- WL = Máximo peso del contenido del tanque que se puede utilizar para resistir el momento de vuelco, en kilogramos por metro;
- t_b = Espesor de la plancha de fondo que está debajo de la concha, en milímetros;

- F_{by}** = Esfuerzo correspondiente al límite elástico de la plancha de fondo, en kilogramos por centímetros cuadrado;
G = Gravedad específica del líquido almacenado;
H = Altura máxima del líquido, en metros,
D = Diámetro nominal del tanque, en metros.

10.3. ESPESOR DE LA PLANCHA DE FONDO

El espesor de la plancha de fondo que está debajo de la concha no debe exceder el mayor valor entre los dos siguientes: el espesor de la concha ó 6 mm. Cuando el espesor de la plancha de fondo que está debajo de la concha, es mayor que el del resto de las planchas del fondo, el ancho de la plancha de fondo más gruesa deberá ser mayor o igual que $0,0017 WL/GH$, donde el ancho está dado en metros y medido en dirección radial.

10.4. COMPRESIÓN ACTUANTE EN EL ANILLO INFERIOR

10.4.1. TANQUES NO ANCLADOS

La fuerza de compresión por unidad de longitud actuante en el anillo inferior de la pared está dada por:

$$\text{i) Si: } \frac{M}{D^2 (Wt + WL)} \leq 0,785$$

$$b = Wt + \frac{1,273 M}{D^2}$$

$$\text{ii) Si: } 0,785 < \frac{M}{D^2 (Wt + WL)} \leq 1,5$$

b se determina a partir del parámetro siguiente, obtenido de la Figura 10.1

$$\frac{b + WL}{Wt + WL}$$

$$\text{iii) Si: } 1,5 < \frac{M}{D^2 (Wt + WL)} \leq 1,57$$

b se obtiene de:

$$\frac{b + WL}{Wt + WL} = \frac{1,490}{\left[1 - \frac{0,637 M}{D^2 (Wt + WL)}\right]^{1/2}}$$

iv) Si: $\frac{M}{D^2 (W_t + W_L)} > 1,57$

ó cuando f_c es mayor que F_a (párrafo 10.5), el tanque es estructuralmente inestable por lo que es necesario tomar alguna de las siguientes medidas.

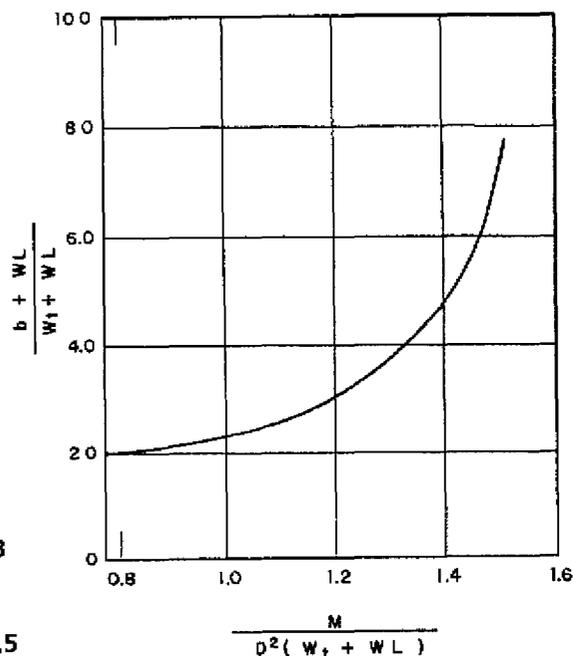
- Aumentar el espesor de la plancha de fondo que está debajo de la concha, respetando las limitaciones dadas en los párrafos 10.2 y 10.3.
- Aumentar el espesor t_c del anillo inferior de la pared
- Modificar las proporciones del tanque, aumentando el diámetro y reduciendo la altura.
- Anclar el tanque como se especifica en la Sección 10.7.

En las fórmulas anteriores, se tiene que:

- b** : Fuerza de compresión en el anillo inferior de la pared, en kilogramos por metro lineal de circunferencia;
- W_t** : Peso de las paredes del tanque y de la porción de techo que se apoya en las mismas, en kilogramos por metro lineal de circunferencia;
- M** : Momento en la base determinado según el Párrafo 8.1 2 dividido entre 1,25, en kilogramo-metro.

$$f_c = \frac{b}{10 t_c} \text{ Esfuerzo de compresión actuante en el anillo inferior de la pared del tanque, en kilogramos por centímetro cuadrado.}$$

Figura 10.1



CÁLCULO DEL PARÁMETRO B CUANDO SE TIENE:

$$0,785 \leq \frac{M}{D^2 (W_t + W_L)} \leq 1,5$$

10.4.2. TANQUES ANCLADOS

La fuerza de compresión en el anillo inferior de la pared se determina mediante:

$$b = Wt + \frac{1,273 M}{D^2}$$

10.5. COMPRESIÓN ADMISIBLE EN EL ANILLO INFERIOR

El esfuerzo de compresión actuante en el anillo inferior de la pared está dado por f_c . Este esfuerzo no debe exceder el valor F_a dado por:

i) Si: $G H D^2 / tc^2 \geq 44$

$$F_a = 844 tc / D$$

ii) Si: $G H D^2 / tc^2 < 44$

$$F_a = \frac{388 tc}{D} + 68,7 \sqrt{G H}$$

En cualquier caso, F_a no debe exceder el valor $0,5 F_{ty}$, donde:

tc : Espesor del anillo inferior de la pared, excluyendo el valor nominal por corrosión, en milímetros;

F_a : Esfuerzo admisible de compresión en el anillo inferior de la pared, en kilogramos por centímetro cuadrado;

F_{ty} : Esfuerzo correspondiente al límite elástico del anillo inferior de la pared del tanque, en kilogramos por centímetro cuadrado;

D, H: Expresados en metros.

10.6. ANILLOS SUPERIORES

Si el espesor en el anillo inferior de la pared calculado para resistir el momento debido a la acción sísmica, es mayor que el espesor requerido para resistir la presión hidrostática excluyendo de ambos el espesor por corrosión, el espesor de cada uno de los anillos superiores calculados para resistir la presión hidrostática deber ser incrementado en la misma proporción a menos que se haga un análisis especial para determinar el momento y los esfuerzos que genera la acción sísmica en cada uno de los anillos superiores.

10.7. ANCLAJE DE TANQUES

10.7.1. ANCLAJE MÍNIMO

Cuando se considere necesario anclar el tanque, el anclaje debe ser diseñado para suministrar la siguiente resistencia mínima en kilogramos por metro lineal de circunferencia:

$$\frac{1,273 M}{D^2} - Wt$$

Se deberán investigar los esfuerzos que se inducen en la concha en los puntos de conexión de los anclajes, bajo la condición de cedencia de los mismos.

10.7.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

10.7.2.1. La experiencia ha indicado que tanques anclados, diseñados adecuadamente, tienen mayor reserva resistente ante sismos que la que tienen tanques no-anclados. Si un tanque anclado no se diseña apropiadamente, su concha es susceptible de sufrir desgarramiento. Se debe verificar que la resistencia de los componentes del sistema de anclaje es mayor que la resistencia a la cedencia del anclaje de manera que estos cedan primero. Adicionalmente a los requisitos dados en el párrafo 10.7.1, en el diseño de los anclajes se deben tomar en cuenta los párrafos 10.7.2.2 a 10.7.2.6.

10.7.2.2. La distancia entre anclajes adyacentes no debe exceder 3 metros. En tanques con diámetros menores de 15 metros, esta distancia no debe exceder 1,80 metros. Cuando se utilicen pernos de anclaje, estos deben tener un diámetro mínimo de 25 mm, excluido el valor de corrosión

10.7.2.3. El máximo esfuerzo admisible para los componentes del anclaje no debe exceder los siguientes valores:

a) Para los anclajes, 0,8 veces el esfuerzo cedente (0,6 veces el esfuerzo cedente multiplicado por 1,33).

b) Para otras partes, 133 por ciento del esfuerzo admisible dado en la Sección 3.10 "Roofs" del API-650.

Estos esfuerzos pueden ser usados con otras cargas cuando éstas se combinan con las cargas sísmicas y domina el efecto combinado.

10.7.2.4. Los componentes del sistema de anclaje y la unión con la concha deben ser diseñados para una carga igual al producto del mínimo valor especificado del esfuerzo cedente por el área mínima de la sección del anclaje finalmente seleccionado.

10.7.2.5. La unión del anclaje a la fundación debe ser capaz de aceptar una fuerza igual a la resistencia mínima a la cedencia del anclaje. Anclajes con ganchos o planchas en su extremo se pueden utilizar para resistir la tracción.

10.7.2.6. La filial de PDVSA deberá especificar el espesor de corrosión que debe ser añadido a las dimensiones del anclaje. El anclaje definitivo, incluyendo el espesor de corrosión, debe ser usado para determinar las cargas de diseño de los componentes del sistema de anclaje y de la fundación.

10.8. ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL NETO

10.8.1. El esfuerzo máximo de tracción a lo largo de la circunferencia del anillo inferior, se determina superponiendo el esfuerzo hidrostático con el hidrodinámico debido a las componentes sísmicas horizontal y vertical.

$$\sigma = \frac{\gamma_L H R}{10 t_c} + \frac{[(\sigma_{\theta h})^2 + (\sigma_{\theta v})^2]^{1/2}}{1,25}$$

Donde:

- σ = Esfuerzo máximo de tracción, en kg/cm²;
- t_c = Espesor del anillo inferior de la pared del tanque en mm;
- $\sigma_{\theta h}$ = Esfuerzo producido por la componente horizontal del sismo (párrafo 8.1.3), en kg/cm²;
- $\sigma_{\theta v}$ = Esfuerzo producido por la componente vertical del sismo (párrafo 8.2), en kg/cm².

10.8.2. El esfuerzo máximo de tracción σ no deberá exceder el esfuerzo admisible del material dado en el párrafo 3.6.2 del API-650, multiplicado por 1,33.

10.9. TUBERIAS

Todas las tuberías unidas a la concha o al fondo del tanque deben poseer flexibilidad en la dirección vertical. En el caso de tuberías ubicadas en la porción superior del tanque, se les deberá permitir flexibilidad también en dirección horizontal. En el caso de tanques no anclados que pueden levantarse, las tuberías conectadas al tanque deben tener la capacidad de levantarse junto con el mismo, o deben colocarse de forma tal que la distancia horizontal medida desde la concha hasta el final del elemento de conexión sea igual a el ancho calculado en el párrafo 10.3 mas 30 cm.

10.10. CONSIDERACIONES ADICIONALES

10.10.1. Los tanques con techo fijo deberán ser diseñados para prevenir los daños que puedan causar las presiones ejercidas por las oscilaciones en la superficie del líquido, o alternatively, mantener una distancia libre entre la superficie del líquido y el techo igual a la altura máxima de oscilación del líquido determinada en la Sección 9. Los tanques con techo flotante, o los que no tengan techo, en los cuales no se pueda aceptar el derrame de su contenido, deberán diseñarse con el mismo criterio.

10.10.2. Las bases de las columnas que soportan el techo deberán ser diseñadas para prevenir movimiento lateral durante sismos. Las columnas serán diseñadas tomando en consideración las fuerzas que induce el movimiento oscilatorio de la superficie del líquido.

10.10.3. En el diseño de la fundación, se deben considerar las fuerzas verticales adicionales en la concha producidas por la acción sísmica.

10.10.4. Una alternativa válida de diseño de los anclajes en tanques consiste en el uso de anclajes dúctiles que trabajen en el rango inelástico. En este caso, la resistencia requerida en los anclajes, dada en el párrafo 10.7.1, se