

RESUMEN

El Anexo-A "DISEÑO MECÁNICO", trata sobre los cálculos mecánicos del tanque.

Este anexo consta de doce capítulos, en seis de los cuales se calculan las diversas partes individualizadas del tanque, como son espesores de la envolvente, rigidez de la envolvente frente al viento, espesor del fondo y de la viga anular perimetral del fondo, viga contraviento y la flotabilidad y rigidez del techo flotante y cálculo de las patas del techo flotante y de los compartimentos estancos que lo componen...

En otros cuatro capítulos, los cálculos y comprobaciones hacen referencia al conjunto del tanque, analizando su comportamiento frente a las acciones externas como son, las cargas sobre el fondo, el sistema de enfriamiento del tanque para caso de contingencia por fuego, el viento y el sismo.

En el capítulo once se relaciona el presupuesto correspondiente a las partes de diseño mecánico del tanque, sin incluir el de Obra Civil, ni el que corresponde a Seguridad, Salud y Medio Ambiente, los cuales se incluyen en los respectivos anexos.

El último capítulo, el doce es en el que hay una recopilación de planos constructivos más significativos en la construcción del tanque.

En todos los capítulos se procede a calcular y comprobar la bondad de los cálculos, para asegurar la seguridad en cada elemento del tanque y en su conjunto, puesto que la seguridad es el primer objetivo en toda refinería.

Las dos comprobaciones globales de estabilidad, implican el asegurar que no se produzca el vuelco del tanque ni la deformación por alabeo de la pared del tanque por acción del sismo.

Todos los cálculos están amparados por la solvencia que da el uso de formulas extraídas del Código (American Petroleum Institute) API -650, reconocido mundialmente en el diseño de tanques atmosféricos, al igual que en métodos y normas que son aceptadas por los organismos oficiales.



Los cálculos, tanto mecánicos como la exposición del desarrollo de los trabajos de la Obra Civil y sus referencias pueden servir de guía, a otros estudiantes de próximos cursos, o bien a profesionales que puedan interesarse en el diseño de tanques con techos flotantes.



A. DISEÑO MECÁNICO

Sumario

A.1. DETERMINACIÓN DE LOS ESPESORES DE LA ENVOLVENTE.....	7.
A.1.1. Características del tanque.....	7.
A.1.1.1. Datos de diseño del tanque.....	7.
A.1.1.2. Datos sobre las virolas.....	7.
A.1.2. Método utilizado para determinar el espesor de las virolas.....	8.
A.1.3. Exposición del método de cálculo.....	8.
A.1.4. Cálculo de la 2ª virola.....	12.
A.1.5. Resumen de los espesores de las virolas.....	16.
A.2. COMPROBACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LA ENVOLVENTE POR VIENTO.....	19.
A.2.1. Datos de diseño.....	19.
A.2.2. Cálculo de la envolvente transformada.....	21.
A.3. DISEÑO DEL FONDO Y DEL ANILLO PERIMETRAL DEL FONDO.....	23.
A.3.1. Diseño del espesor del fondo.....	23.
A.3.2. Espesor y ancho del anillo perimetral del fondo.....	23.
A.3.2.1. Espesor del anillo perimetral del fondo.....	23.
A.3.2.2. Ancho del anillo perimetral del fondo.....	24.
A.4. DISEÑO DE LA VIGA CONTRAVIENTO.....	25.
A.4.1. Módulo de sección necesario.....	25.
A.5. ACCIONES SOBRE EL FONDO DE TANQUE.....	27.
A.5.1. Datos (tanque nuevo).....	27.
A.5.2. Acciones sobre el fondo (tanque nuevo).....	27.



A.5.3. Acciones periféricas (tanque nuevo).....	28.
A.5.4. Datos (tanque corroído).....	28.
A.5.5. Acciones sobre el fondo (tanque corroído).....	29.
A.5.6. Acciones periféricas (tanque corroído).....	29.
A.5.7. Cálculo de las cargas sobre la infraestructura de apoyo.....	30.
A.5.8. Cuadro de cargas uniformes sobre la base.....	31.
A.5.9. Cuadro de cargas puntuales sobre la base.....	31.
A.6. TECHO FLOTANTE.....	33.
A.6.1. Bases generales.....	33.
A.6.2. Cálculo de la flotabilidad del techo” Tipo Simple Pontón”.....	34.
A.6.2.1. Esquema.....	34.
A.6.3. Datos.....	34.
A.6.4. Cálculos previos.....	35.
A.6.5. Cálculo del hundimiento.....	35.
A.6.6. Cálculo del margen de seguridad.....	35.
A.6.7. Determinación de la rigidez del pontón.....	36.
A.6.8. Datos de partida.....	36.
A.6.9. Tamaño de las paredes del pontón.....	36.
A.6.10. Número y tamaño de los angulares transversales rigidizadores.....	37.
A.6.11. Área mínima necesaria en el pontón.....	37.
A.6.12. Área del pontón.....	37.
A.6.13. Flecha de la membrana del techo por la columna de agua.....	38.
A.6.14. Volumen desplazado por la deformación de la membrana.....	38.
A.6.15. Incremento del hundimiento por la carga de agua.....	38.
A.6.16. Tensiones en el borde interior del pontón.....	38.
A.7. CÁLCULO DE LOS SOPORTES TUBULARES DEL TECHO FLOTANTE.....	39.
A.7.1. Datos del techo.....	41.
A.7.2. Datos de las patas.....	42.
A.7.3. Cálculo del coeficiente de compresión.....	43.
A.7.4. Cálculo de las tensiones admisibles a compresión en las patas.....	43.
A.7.5. Cálculo de las tensiones de trabajo a compresión en las patas.....	44.



A.8. EVALUACIÓN DEL CAUDAL DE AGUA PARA EL ENFRIAMIENTO.....	45.
A.8.1. Datos.....	45.
A.8.2. Evaluación del caudal de agua necesaria para el sistema.....	45.
A.8.3. Caudal total de agua para el sistema de enfriamiento.....	46
A.9. ESTABILIDAD DEL TANQUE DEBIDO A LA ACCIÓN DEL VIENTO.....	47.
A.9.1. Datos.....	47.
A.9.2. Cálculos.....	47.
A.10. ESTABILIDAD DEL TANQUE DEBIDO A LA ACCION DEL SISMO.....	49.
A.10.1. Datos.....	49.
A.10.2. Calculo del periodo de oscilación y de los coeficientes laterales de fuerza.....	49.
A.10.3. Determinación de las fuerzas sísmicas y de los brazos de los momentos.....	50.
A.10.4. Determinación del momento sísmico de vuelco.....	50.
A.10.5. Cálculo del peso de la porción líquida que se opone al vuelco.....	50.
A.10.6. Compresión en las paredes de la envolvente.....	51.
A.10.7. Máxima fuerza de compresión admisible.....	51.
A.11. PRESUPUESTO.....	53.
A.11.1. Descripción del presupuesto.....	53.
A.12. PLANOS.....	55.
A.12.1. Esquema del conjunto.....	55.
A.12.2. Plano de la distribución de las chapas en la envolvente	57.
A.12.3. Plano del techo flotante.....	59.
A.12.4. Plano de los soportes tubulares.....	61.
A.12.5. Plano de la viga contraviento.....	63.
A.12.6. Plano de la barandilla de la viga contraviento.....	65.



A.12.7. Plano del drenaje del fondo.....	67.
A.12.8. Plano de las conexiones y drenajes en el techo.....	69.
A.12.9. Plano de los tubos guía	71.
.A.12.10.Plano de la pantalla contra incendios y conexión eléctrica.....	73.



A.1. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LA ENVOLVENTE.**A.1.1. Características del Tanque.****A.1.1.1. Datos de diseño del tanque.**

Diámetro interno 1ª virola	$D = 80,500 \text{ m.}$
Radio interno medio 1ª virola	$r = 40,268 \text{ m.}$
Altura máxima de llenado	$H_{Lle} = 18,300 \text{ m.}$
Altura total de la envolvente	$H_{Tot} = 19,500 \text{ m.}$
Numero de virolas	$N = 8$
Densidad del producto	$G = 870 \text{ kg/m}^3$
Suplemento por corrosión	$C = 1,50 \text{ mm}$
Coeficiente de soldadura	$E = 1,0$
Espesor mínimo especificado	$t_{min} = 11 \text{ mm}$

A.1.1. 2. Datos sobre las virolas

VIROLA	ALTURA mm	MATERIAL	TENSION EN OPERACIÓN MPa	TENSION EN PRUEBA MPa
1	2440	A-131 Gr EH 36	206,5	221
2	2440	A-131 Gr EH 36	206,5	221
3	2440	A-131 Gr EH 36	206,5	221
4	2440	A-131 Gr EH 36	206,5	221
5	2440	A-131 Gr EH 36	206,5	221
6	2440	A-131 Gr EH 36	206,5	221
7	2440	A-283 Gr C	137,6	165
8	2420	A-283 Gr C	137,6	165

El valor de la densidad del producto $G = 0,870$ es un valor numérico sin unidades y para el cálculo por disposición de la refinería se toma $G=1,0$. En las fórmulas en las que aparece G , se toma el valor numérico sin unidades.



A.1.2. Método utilizado para determinar el espesor de las virolas.

El método utilizado para el cálculo de los espesores de la virolas es el del “Método del Punto Variable”.

En origen fue desarrollado por L.P.Zick y R.V.McGrath bajo el título de “Desing of Large Diameter Cylindrical Shell” publicado por *Proceedings*- División of Refining, American Petroleum Institute. New York 1968 Volume 48, Pág. 1114-1140.

Este modelo de cálculo viene desarrollado en el libro “Welded Steel Tanks for Oil Storage” 10 Edición Septiembre 2003, API Standard 650.

El sistema de cálculo solo es usado cuando la propiedad .ha especificado que no desea el “método de 1 pie” y se cumple que:

$$\frac{L}{H} = 65,43 \leq \frac{1000}{6} = 166,67 \quad \text{Eq-1.1}$$

$L = (500 D t)^{0,5}$ en mm.

D = Diámetro medio del tanque en la 1º virola =80,536 m.

t₁ = Espesor de la 1ª virola (la del fondo) = 35,6 mm.

H = Máxima altura del diseño del nivel del líquido en.=18,3 m.

A.1. 3. Exposición del método de cálculo

Este es un método más elaborado que el clásico”Método del Pie”.

La diferencia fundamental es que para tanques de diámetro mayor de 60 metros el método del punto variable consigue una reducción sustancial, en el espesor de las virolas de la envolvente, frente al método clásico del “pie”.

Es un método más largo y por ser secuencial, pensado para desarrollarlo con programa informático, aunque también puede hacerse manualmente.



En este proyecto solo las tres primeras virolas tienen realizados los cálculos, pues de las 5 restantes solo se dan los resultados, para evitar el ocupar gran cantidad de páginas con las operaciones numéricas.

Básicamente el método consiste en que para obtener el valor del espesor de una virola, se parte siempre del valor conocido de la virola inferior, y del valor mínimo que debe de tener la virola en estudio con una formula conocida. Con estos dos valores se van determinando sucesivos valores del espesor en distintos puntos por encima de la junta inferior de la virola, hasta que por acotamiento de estos valores se puede determinar la posición del punto en el cual se obtiene el valor óptimo del espesor en la virola seleccionada.

Los pasos a seguir son:

1^{er} PASO

Aplicación del método de 1-pie cuyas formula se adjuntan para las condiciones de diseño y de prueba hidrostática a la 1^a virola

$$t_{1pd} = \frac{4,9 D (H - 0,3)}{S_d} + C = 35,8 \text{ 2mm.} \quad \text{Eq-1.1.2. (a)}$$

$$t_{1pt} = \frac{4,9 D (H - 0,3)}{S_t} + C = 32,04 \text{ mm..} \quad \text{Eq-1.1.2.(b)}$$

t_{1pd} = Espesor preliminar de diseño en la 1^a virola = 35,82 mm.

t_{1pt} = Espesor preliminar de prueba en la 1^a virola = 32,04 mm.

D = Diámetro medio del tanque = 80,536 m

H = Altura desde el fondo a la máxima altura de llenado = 18,3 m.

S_t = Tensión en prueba hidráulica = 210 MPa.

C = Corrosión = 1,5 mm.

El mínimo espesor para las condiciones de diseño y prueba se calcula por las siguientes ecuaciones Eq-1.1.3.

$$t_{1d} = (1,06 - \frac{0,0696 D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_d}}) (\frac{4,9 HDG}{S_d}) + C = 35,33 \text{ mm} \quad \text{Eq-1.1.3. (a).}$$



$$t_{1t} = \left(1,06 - \frac{0,0696 D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_t}}\right) \left(\frac{4,9 HDG}{S_t}\right) + C = 31,68 \text{ mm} \quad \text{Eq-1.1.3. (b).}$$

De los espesores para diseño y prueba se toma el mayor que vale $t_1 = 35,33 \text{ mm}$.

Se adopta un espesor, a requerimientos de refinera, incrementado a $t_1 = 35,6 \text{ mm}$.

Con este espesor adoptado deberán hacerse todos los cálculos siguientes.

2º PASO

Se calcula la relación $\frac{h_1}{(r t_1)^{0,5}}$ Eq-1.1.4.

h_1 = Altura de la 1ª virola en mm.

r = Radio medio del tanque en mm.

h_1 = Espesor mínimo 1ª virola sin corrosión en mm.

$$\text{Si } \frac{h_1}{(r t_1)^{0,5}} \leq 1,375 \quad t_2 = t_1 \quad \text{Eq-1.1.4.(a).}$$

$$\text{Si } \frac{h_1}{(r t_1)^{0,5}} \geq 2,625 \quad t_2 = t_{2a} \quad \text{Eq-1.1.4.(b).}$$

$$\text{Si } 1,375 < \frac{h_1}{(r t_1)^{0,5}} < 2,625 \quad t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25 (r t_1)^{0,5}} \right] \quad \text{Eq-1.1.4. (c).}$$

t_2 = Espesor definitivo de la 2ª virola mm.

t_{2a} = Espesor de la 2ª virola en mm., es calculado como se describe a continuación.

La fórmula para calcular t_2 se basa en la misma tensión admisible, que existe en el diseño de la virola del fondo como en la virola en curso (2ª virola).

El espesor de la virola superior (2ª) se calcula por un valor preliminar t_{1U} para ambas condiciones de operación y prueba por las ecuaciones:



$$t_{1U} = \frac{4,9 D (H - 0,3) G}{S_d} + C \quad \text{Eq-1.1.5. (a).}$$

$$t_{1U} = \frac{4,9 D (H - 0,3)}{S_t} \quad \text{Eq-1.1.5.(b).}$$

H = Altura desde el nivel del liquido al fondo de la virola considerada

A continuación empleando la misma ecuación, se sustituye el valor 0,3 por un valor de altura variable -x- en las ecuaciones de diseño y prueba:

$$t_{dx} = \frac{4,9 D (H - \frac{x}{1000}) G}{S_d} + C \quad \text{Eq-1.1.6.(a).}$$

$$t_{tx} = \frac{4,9 D (H - \frac{x}{1000})}{S_t} \quad \text{Eq-1.1.6. (b).}$$

El valor de -x- es el menor valor de x_1 o x_2 o x_3 en las ecuaciones:

$$K = \frac{t_L}{t_U} \quad \text{Eq-1.1.7.}$$

$$C = [K^{0,5} \frac{(K - 1)}{(1 + K^{1,5})}] \quad \text{Eq-1.1.8.}$$

$$x_1 = 0,61 (r t_u)^{0,5} + 320 C H \quad \text{Eq-1.1.9.(a).}$$

$$x_2 = 1000 C H \quad \text{Eq-1.1..9.(b).}$$

$$x_3 = 1,22 (r t_u)^{0,5} \quad \text{Eq-1.1..9.(c).}$$

t_{1U} = Espesor preliminar en mm. de la virola superior (virola en estudio) en la 1ª prueba.=

$$t_{1U} = \frac{4,9 D (H - 0,3) G}{S_d} + C \quad \text{Eq-1.1..10.}$$

t_L = Espesor de la virola inmediata inferior a la virola en estudio, en mm.



Una vez determinados t_{dx} y t_{tx} , se vuelve a reiniciar el proceso en la misma virola pero tomando como valor de $t_{2u} = t_{1dx}$

t_{2u} = Espesor preliminar en la virola en la 2ª prueba.

t_L = El mismo que en la 1ª prueba.

Se calculan nuevos valores de K, C, x_1, x_2, x_3 con los que se obtienen los valores del espesor t_{2dx} y t_{2tx} , repitiendo el ciclo hasta que coincidan los valores de $t_{iU} = t_{(i+1)dx}$. En el caso de la 2ª virola, $t_{2a} = t_{iU} = t_{(i+1)dx}$.

Con el valor conocido de t_{2a} se determina el valor del espesor t_2 de la 2ª virola.

El procedimiento es el mismo para determinar el espesor de las virolas, 3ª, 4ª, 5ª etc. basta sustituir el número de los subíndices en las ecuaciones expuestas.

A.1.4. Cálculo 2ª virola.

Determinamos los valores de $t_{2(min)}$ en operación t_{2d} y prueba t_{2t} .

$$t_{2d} = \left(1,06 - \frac{0,0696 D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_d}}\right) \left(\frac{4,9 HDG}{S_d}\right) + C = 32,19 \text{ mm.}$$

$$t_{2t} = \left(1,06 - \frac{0,0696 D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_t}}\right) \left(\frac{4,9 HDG}{S_t}\right) + C = 30,53 \text{ mm.}$$

De ambos valores se toma el mayor.

$$t_{2min} = 32,19 \text{ mm.}$$

1ª PRUEBA

$$t_{2u} = \frac{4,9 D (H_2 - 0,3) G}{S_d} + C = 31,2 \text{ mm.}$$

H_2 = Altura al fondo de la 2ª virola desde la superficie = $H - h = 18,3 - 2,44 = 15,86 \text{ m}$.



t_L = Espesor de la virola inferior (1ª) = 35,6 mm.

$$\frac{h_1}{(r t_1)^{0,5}} = 2,082.$$

h_1 = Altura de la 1ª virola = 2440 mm.

r = Radio medio del tanque e. = 40.268 mm.

t_1 = Espesor mínimo 1ª virola sin corrosión = 34,1 mm.

$$\text{Como el valor } 1,375 < \frac{h_1}{(r t_1)^{0,5}} = 2,082 < 2,625$$

El espesor de la 2ª virola $t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25 (r t_1)^{0,5}} \right]$ hay que determinar el valor de t_{2a} .

Se calculan K , C , x_1 , x_2 y x_3 , y se toma el menor valor de $-x$.

$$K = \frac{t_L}{t_U} = 1,142.$$

$$C = \left[K^{0,5} \frac{(K - 1)}{(1 + K^{1,5})} \right] = 0,068.$$

$$x_1 = 0,61 (r t_U)^{0,5} + 320 C H = 1029,46 \text{ mm.}$$

$$x_2 = 1000 C H = 1081,02.$$

$$x_3 = 1,22 (r t_U)^{0,5} = 1367,03.$$

El menor valor de $x = x_1 = 1029,48 \text{ mm.}$

$$x/1000 = 1,029.$$

$$t_{dx} = \frac{4,9 D (H_2 - \frac{x}{1000}) G}{S_d} + C = 29,9 \text{ mm.}$$

2ª PRUEBA



Se toma para t_u el valor obtenido en t_{dx} .

$$t_{2U2} = 29,8 \text{ mm.}$$

$$H_2 = \text{La misma} = H - h = 18,3 - 2,44 = 15,86 \text{ m.}$$

$$t_L = \text{Espesor 1ª virola (el mismo)} = 35,6 \text{ mm.}$$

$$(rt)^{0,5} = (40268 \times 29,9)^{0,5} = 1097,27.$$

$$K = \frac{t_L}{t_U} = 1,195.$$

$$C = \left[K^{0,5} \frac{(K - 1)}{(1 + K^{1,5})} \right] = 0,092.$$

$$x_1 = 0,61 (rt_u)^{0,5} + 320 C H = 1136,39 .$$

$$x_2 = 1000 C H = 1459,12.$$

$$x_3 = 1,22 (rt_u)^{0,5} = 1386,40.$$

El menor valor de $x = x_1 = 1136,39 \text{ mm.}$

$$x/1000 = 1,136.$$

$$t_{2dx} = \frac{4,9 D (H_2 - \frac{x}{1000}) G}{S_d} + C = 29,6 \text{ mm.}$$

La diferencia obtenida con t_{2U2} es pequeña.

3ª PRUEBA

$$t_{3U2} = 29,6 \text{ mm.} = t_{2dx}.$$

$$H_2 = \text{La misma} = H - h = 18,3 - 2,44 = 15,86 \text{ m.}$$

$$t_L = \text{Valor de 1ª virola} = 35,6 \text{ mm.}$$

$$(rt)^{0,5} = (40268 \times 29,6)^{0,5} = 1091,76.$$



$$K = \frac{t_L}{t_U} = 1,204.$$

$$C = \left[K^{0,5} \frac{(K - 1)}{(1 + K^{1,5})} \right] = 0,096 .$$

$$x_1 = 0,61 (r t_u)^{0,5} + 320 C H = 1153,19.$$

$$x_2 = 1000 C H = 1522,56 .$$

$$x_3 = 1,22 (r t_u)^{0,5} = 1406,89 .$$

El menor valor de $x = x_1 = 1153,19$ mm.

$$x/1000 = 1,153.$$

$$t_{3dx} = \frac{4,9 D (H_2 - \frac{x}{1000}) G}{S_d} + C = 29,57 \text{ mm.}$$

$$t_{2a} = 29,57 \text{ mm} \approx t_{3dx}$$

ESPESOR DE 2ª VIOLA

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \left[2,1 - \frac{h_1}{1,25 (r t_1)^{0,5}} \right] = 28,57 + 4,53 [2,1 - 1,66] = 30,50 \text{ mm.}$$

$$\frac{h_1}{(r t_1)^{0,5}} = 2,082 \cdot t_1 = 35,6 - \text{corrosión} = 34,1 \text{ mm.}$$



A.1.5. Resumen de los espesores de las virolas en operación, prueba.

No se expone el cálculo individual de cada virola, todas son calculadas como la virola 2ª, dando el resumen de los espesores obtenidos con este método.

Espesor de las virolas en operación (diseño)

Virolas	Espesor mm.	Corrosión mm.	Espesor total mm.
V-1	33,83	1,5	35,33
V.-2	30,69	1,5	32,19
V-3	23,34	1,5	24,84
V-4	19,23	1,5	20,73
V-5	14,63	1,5	16,13
V-6	10,16	1,5	11,66
V-7	9,55	1,5	11,05
V-8	2,16	1,5	3,66

Espesor de las virolas en prueba hidrostática

Virolas	Espesor mm.	Corrosión mm.	Espesor total mm.
V-1	31,68		31,68
V.-2	30,53		30,53
V-3	21,87		21,87
V-4	17,73		17,73
V-5	13,61		13,61
V-6	19,53		19,53
V-7	7,59		7,59
V-8	2,18		2,18



Espesores de las virolas en operación, prueba y mínimo adoptado.

Virolas	Espesor en Operación mm.	Espesor en Prueba mm.	Espesor Mínimo mm.	Espesor Adoptado mm.
V-1	35,33	31,68	35,33	35,60
V.-2	32,19	30,53	32,19	32,20
V-3	24,84	21,87	24,84	25,10
V-4	20,73	17,73	20,73	21,00
V-5	16,13	13,61	16,13	16,40
V-6	11,66	19,53	11,68	13,10
V-7	11,05	7,59	11,05	13,10
V-8	3,66	2,18	11,00	12,00





A.2. COMPROBACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LA ENVOLVENTE POR VIENTO

El punto 3.9.7.1 del API STANDARD 650 da la ecuación en que se dice cual es la máxima altura de la envolvente de un tanque que puede estar no rigidizada.

$$H_1 = 9,47 t \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} \quad \text{Eq-2.1.}$$

H_1 = Distancia vertical en m. a la viga contraviento en cabeza si el techo no es fijo, que puede estar sin rigidizar.

t = Espesor de la virola de cabeza en mm.

D = Diámetro nominal del tanque en m..

Esta fórmula está basada en una velocidad del viento de $V_r = 160$ km./h

Para otra velocidad V de diseño, en km/h, el resultado de H_1 debe de ser multiplicado por:

$$\left(\frac{V_r}{V}\right)^2$$

A.2.1. Datos de diseño

D = Diámetro nominal del tanque = 80,50 m.

H_{vcw} = Altura desde el fondo hasta la viga contra viento = 18,45 m.

V = Velocidad de diseño del viento = 144 km./h

t_8 = Espesor de la virola de cabeza = 12 mm.

Presión máxima de vacío = 25,00 mm..c.de a.

$$\left(\frac{V_r}{V}\right)^2 = \left(\frac{160}{144}\right)^2 = 1,235.$$

$$H_1 = \left(\frac{V_r}{V}\right)^2 \cdot 9,47 t \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} = 1,235 \times 9,47 \times 12 \left(\frac{12}{80,50}\right)^{1,5} = 8,165\text{m.}$$

Después de calcular la máxima altura de envolvente sin rigidizar, se debe calcular la altura de una envolvente equivalente, en que todas las virolas tengan el mismo espesor uniforme que la de cabeza. Para esto hay que calcular el nuevo valor de las alturas de cada una de las virolas,



con lo que tendremos una envolvente con altura de virolas diferentes pero todas del mismo espesor.

La ecuación de transformación es:

$$h_{tra} = h \left(\frac{t_{uniforme}}{t_{real}} \right)^{2.5} \quad \text{Eq-2.2.}$$

h_{real} = Altura de cada virola en el tanque real en mm.

$h_{transformada}$ = Altura de cada virola en el tanque equivalente en mm.

$t_{uniforme}$ = Espesor de la virola de la cabeza.

t_{real} = Espesor de cada virola en el tanque real en mm.

La suma de todas las alturas de las virolas transformadas es la altura de la envolvente del tanque equivalente:

$$\Sigma W_{trans} = H_E \quad \text{Eq-2.3.}$$

Si la altura equivalente H_E del tanque transformado es menor que la altura requerida H_I no es necesario rigidizar la envolvente real.

$\Sigma W_{trans} = H_E < H_I$ No hace falta rigidizar .



A. 2. 2. Cálculo de la envolvente transformada

Virola	Altura de Virola m	Espesor de Virola mm	Altura Transformada m
V-1 (inferior)	2,44	35,6	$h_{tr1}=2,44\sqrt{\left(\frac{12}{35,6}\right)^5} = 0,161$ $h_{tr1} = 0,161$
V-2	2,44	32,2	$h_{tr2}=2,44\sqrt{\left(\frac{12}{32,2}\right)^5} = 0,207$ $h_{tr2} = 0,207$
V-3	2,44	25,10	$h_{tr3}=2,44\sqrt{\left(\frac{12}{25,10}\right)^5} = 0,386$ $h_{tr3} = 0,386$
V-4	2,44	21,00	$h_{tr4}=2,44\sqrt{\left(\frac{12}{21}\right)^5} = 0,602$ $h_{tr4} = 0,602$
V-5	2,44	116,40	$h_{tr5}=2,44\sqrt{\left(\frac{12}{16,40}\right)^5} = 1,117$ $h_{tr5} = 1,117$
V-6	2,44	13,10	$h_{tr6}=2,44\sqrt{\left(\frac{12}{13,1}\right)^5} = 1,96$ $h_{tr6} = 1,96$
V-7	2,44	13,10	$h_{tr7}=2,44\sqrt{\left(\frac{12}{13,1}\right)^5} = 1,96$ $h_{tr7} = 1,96$
V-8	1,37	12	$h_{tr8}=1,37\sqrt{\left(\frac{12}{12}\right)^5} = 1,37$ $h_{tr8} = 1,37$

Altura equivalente $H_E = 0,161+0,207+0,386+0,602+1,117+1,96+1,96+1,37 = 7,763$ m.

$H_E = 7,763$ m < $H_I = 8,165$ m. NO HACE FALTA RIGIDIZAR LA ENVOLVENTE.





A.3. DISEÑO DEL ESPESOR DEL FONDO Y DEL ANILLO PERIMETRAL DEL FONDO

A. 3. 1. Diseño del espesor del fondo

El código API-STANDARD-650 en el punto 3.4.1 expresa que el espesor mínimo del fondo sin corrosión es de 6 mm.

Espesor del fondo sin corrosión = 6, 00 mm.

Espesor por corrosión = 1,50 mm.

Espesor adoptado = 8,00 mm.

A.3.2. Espesor y ancho del anillo perimetral

A.3.2.1. Espesor del anillo perimetral

En el Código API-STANDARD-650 en el punto 3.53 expresa que el espesor de la placa anular del fondo tendrá el espesor mostrado en la Tabla 3.1 en función del espesor de la 1ª virola (fondo) y de la tensión de prueba en la 1ª virola .

Tensión de prueba en la ecuación adjunta:

$$S_t = \frac{4,9D(H + 0,3)}{t} = \frac{4,9 \times 80,5 \times (18,3 + 0,3)}{35,6} = 199,43 \text{ MPa.}$$

D = diámetro del tanque en m= 80,50.

H = Altura desde el fondo de la 1ª virola a la superficie libre de liquido =18,3 m.

T = Espesor de la 1ª virola =35,6 mm.

Espesor del anillo perimetral sin corrosión = 11,00 mm.

Espesor de la corrosión = 1,50 mm.

Espesor adoptado (Requerido por la propiedad) = 16 mm.



A. 3. 2. 2. Ancho del anillo perimetral

En el Código API- STANDARD- 650 en el punto 3.5.2 viene dado en mm. por la ecuación.

$$W_{\min} = \frac{215t_b}{(HG)^{0,5}} = \frac{215 \times 16}{(18,3 \times 0,87)^{0,5}} = 898,8 \text{ mm.}$$

W_{\min} = Ancho requerido en mm.

T_b = Espesor del anillo anular = 16,00 mm.

G = Densidad = 0,87.

H = Máxima altura del nivel del liquido = 18,30 m.

Ancho radial requerido = 898,8 mm.

Ancho radial mínimo = (610 + t_1 + 51) = 695,6 mm.

Ancho total adoptado (mínimo por sismo) = 1300,00 mm.



A.4. DISEÑO DE LA VIGA CONTRAVIENTO

Los tanques sin techo o con techo flotante deben de llevar en la parte superior de la virola más alta, una viga contraviento, para proporcionar la adecuada rigidez a la envolvente, y que ésta no se deforme por la acción que produce el viento.

A. 4. 1. Módulo de sección necesario.

El Código API-STANDARD-650 en su punto 3.9.7.6. da la formula para determinar el Módulo de sección Z , que debe de tener la viga contraviento , para impedir la deformación de la envolvente.

Cuando la velocidad del viento es distinta a 160 km/h la formula para calcular el módulo de sección está multiplicada por la fracción $V/160$, en que V es la velocidad del viento que se considere en el diseño del tanque.

$$Z = \frac{D^2 H_2}{17} \times (V/160) = 5854,75 \text{ cm}^3 \quad \text{Eq- 4.1.}$$

Z = Módulo de sección requerido en cm^3 .

D = Diámetro del tanque en m. = 80,50.

H_2 = Distancia vertical en m. desde la cabeza de la viga contra viento al fondo = 18,45.

t_s = Espesor de la virola superior en mm = 12.

V = Velocidad de diseño para el tanque en km / h. = 144.

En la Fig -4.1 está el dibujo de la viga contraviento

La viga contra viento está formada por una chapa plegada de espesor $t_1 = 10,0$ mm.

La forma de la viga y sus dimensiones están en la Fig-4.1..



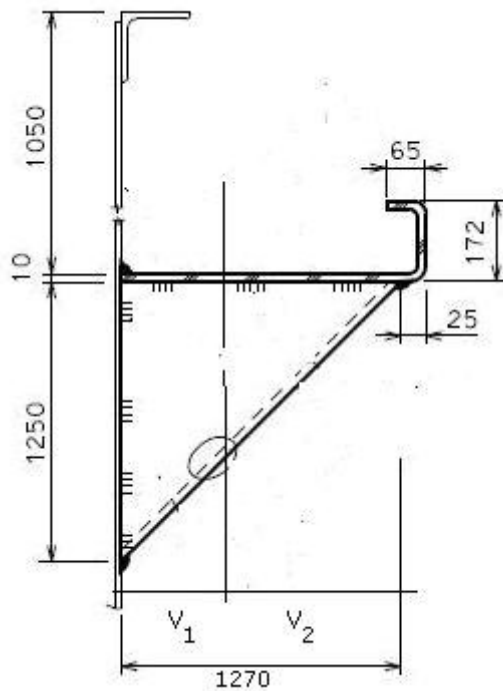


Fig - 4.1 Viga Contra viento

Los valores numéricos de la viga son:

Espesor de la viga $t_1 = 1,0$ cm.

Pestaña de la viga $l_3 = 6,50$ cm.

Altura de la viga $l_2 = 17,20$ cm.

Ancho de la viga $l_1 = 127,00$ cm.

La pared de la virola de cabeza colabora en la unión con la viga, en una longitud de la pared $L = 2 \times 16 t_s + t_1 = 2 \times 16 \times 1,2 + 1,0 = 39,4$ cm.

El momento de inercia del conjunto $i_x = 434.491,28$ cm⁴

Módulo de sección disponible $Z_x = 6027,94$ cm.³

LA VIGA ADOPTADA CUMPLE LO REQUERIDO..



A.5. ACCIONES SOBRE EL FONDO DEL TANQUE**A.5.1. Datos (tanque nuevo)**

Diámetro nominal del tanque	D = 80,50 m.
Altura total de la envolvente	H C =19,50 m.
Altura máxima de llenado	H II =18,30 m.
Sobrecarga en el techo (nieve + otros)	Sn =122,00 kp / m ² .
Presión interna de diseño	P _i = 0,00 kp / m ²
Momento de vuelco por viento	M _v =1.469.063 m x kp.
Momento de vuelco por sismo	M _s =15.2168.654 m x kp.
Peso específico del agua en la prueba hidrostática	ρ _a = 1,00 Tm / m ³ .
Peso específico del producto	P _p = 1,00 Tm / m ³ .
Peso de la envolvente + peso de los accesorios	Pe = 899.185 kp.
Peso del techo + peso de los accesorios	P _t = 417.620 kp.
Peso del fondo + peso de los accesorios	P _f = 356.036 kp.
Peso máximo del contenido	P _{m c} = 18.300 kp / m ²
Peso de la lamina de agua "w l"	W L = 12.959 kp / m.
Peso de un calentador (lleno)	Pc = 265 kp.
Necesidad de anclajes (por sismo o por viento)	NO

A. 5. 2. Acciones sobre el fondo (Tanque nuevo)

Carga uniformemente repartida..... $q_f = P_{mc} + \frac{4P_f}{\pi D^2} + S_n = 18.492 \text{ kp/m}^2$.

Carga puntual por apoyo del sistema de calefacción ,,,,,,,J₁= Pc = 265 k.p.



A. 5. 3. Acciones periféricas (tanque nuevo)

Carga Permanente:..... $Q_1 = Pe + \frac{2Pt}{\pi D} = 3556 \text{ kp/m.}$

Sobrecarga (nieve+otras):..... $Q_2 = \frac{2Pt}{\pi D} = 0 \text{ kp/m.}$

Viento máximo:..... $Q_3 = \frac{4M_v}{\pi D^2} = 289 \text{ kp/m.}$

Sismo:..... $Q_4 = \frac{4M_s}{\pi D^2} = 2990 \text{ kp/m.}$

A.5.4. Datos. (Condición tanque corroído)

Diámetro nominal del tanque	D = 80,50 m.
Altura total de la envolvente	HC = 19,50 m.
Altura máxima de llenado	Hll = 18,30 m.
Sobrecarga en techo (nieve + otros)	Sn = 122,00 kp / m ² .
Presión de diseño interna	P _i = 0,00 kp / m ²
Momento de vuelco por viento	M _v = 1.469.063 m x kp.
Momento de vuelco por sismo	M _s = 15.2168.654 m x kp.
Peso específico del agua en la prueba	ρ _a = 1,00 Tm / m ³
Peso específico del producto	P _p = 1,00 Tm / m ³ .
Peso de la envolvente + peso de los accesorios	Pe = 840.015 kp.
Peso del techo + peso de los accesorios	P _t = 336.185 kp.
Peso del fondo + peso de los accesorios	P _f = 290.800 kp.
Peso máximo del contenido	P _{m c} = 18.300 kp / m ²
Peso de la lamina de agua "w l"	W L = 11.744 kp / m
Peso de un calentador (lleno)	P _c = 265 kp.
Necesidad de anclajes (por sismo o por viento)	NO



A.5.5. Acciones sobre el fondo (tanque corroído)

Carga uniformemente repartida..... $q_f = P_{mc} + \frac{4P_f}{\pi D^2} + S_n = 18.479 \text{ kp/m}^2$.

Carga puntual por apoyo del Sistema de Calefacción ,,,,,,,,,,,,,, $J_1 = P_c = 265 \text{ kp}$

A.5.6. Acciones periféricas (tanque corroído)

Permanente:..... $Q_1 = P_e + \frac{2P_t}{\pi D} = 3322 \text{ kp/m}$

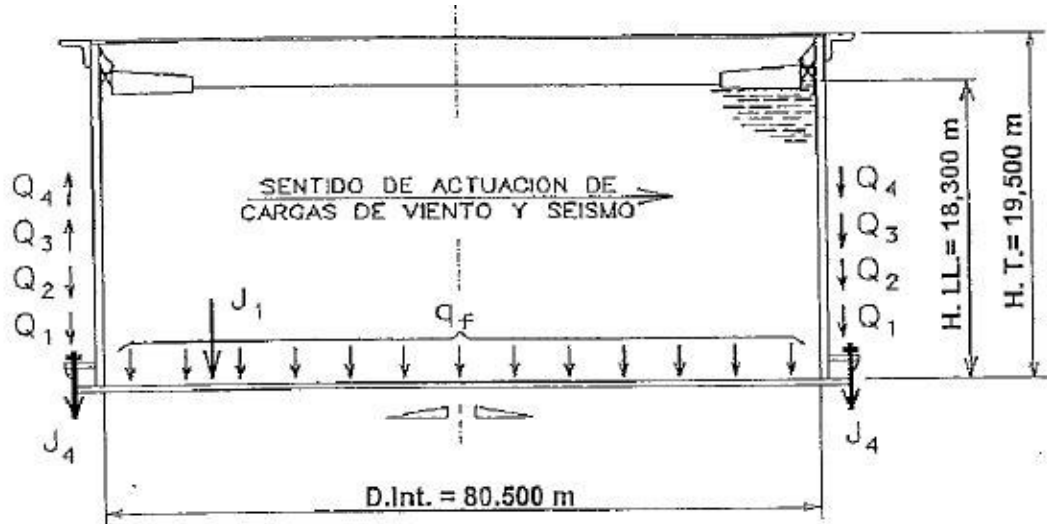
Sobrecarga (nieve+otras):..... $Q_2 = \frac{2P_t}{\pi D} = 0 \text{ kp/m}$

Viento máximo:..... $Q_3 = \frac{4M_v}{\pi D^2} = 289 \text{ kp/m}$

Sismo:..... $Q_4 = \frac{4M_s}{\pi D^2} = 2982 \text{ kp/m}$



A.5.7. Calculo de cargas sobre la infraestructura de apoyo.



DATOS DE CARGAS VERTICALES SOBRE FUNDACIONES

CARGAS UNIFORMES

Q_f = Acción máxima sobre el fondo (producto + presión)

Q_1 = Acción periférica permanente

Q_2 = Acción periférica por sobrecarga exterior del techo

Q_3 = Acción periférica máxima debida al viento máximo

Q_4 = Acción periférica máxima debida al sismo máximo

Q_5 = Acción periférica debida a la presión interior

CARGAS PUNTUALES

J_1 = Acción puntual máxima debida a los apoyos de los calentadores

J_2 = Acción puntual transmitida por las columnas (permanente)

J_3 = Acción puntual transmitida por las columnas (sobrecarga)

J_4 = Acción puntual máxima por los anclajes (por unidad)



A.5.8. Cuadro de cargas uniformes sobre la base

Acción	Q_f	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
Unidades	Kp/m ²	Kp/m	Kp/m	Kp/m	Kp/m	Kp/m
Tanque - nuevo	18.492	3.556	0	289	2.990	0
Tanque - corroído	18.479	3.222	0	289	2.982	0

A.5.9. Cuadro de cargas puntuales sobre la base

Acción	J_1	J_2	J_3	J_4
Unidades	Kp	Kp	Kp	Kp
Tanque - nuevo	265	0	0	0
Tanque - corroído	265	0	0	0





A.6. CÁLCULO DEL TECHO FLOTANTE

A.6.1. Bases generales

El techo flotante se caracteriza por ser una estructura proyectada para flotar sobre la superficie del líquido en un tanque abierto por su parte superior, estando en contacto permanente con el líquido interior del tanque.

El fin del techo flotante es el impedir que el vapor del líquido entre en contacto con la atmósfera, con lo que se reduce la posibilidad de que el vapor pueda explosionar.

Generalmente los vapores suelen ser volátiles y altamente explosivos en contacto con el aire, con lo que al estar el techo en contacto permanente con el líquido no permite que se forme una capa de vapor y que este entre en contacto con la atmósfera.

Los dos tipos de techo flotante, son de simple pontón y de doble cubierta.

El techo del tipo “simple pontón” es aquel en que el techo posee un pontón anular dividido en compartimentos estancos y con el área central, cubierta con un diafragma de una sola capa.

El techo y sus accesorios se proyectarán de tal forma que permitan al tanque rebosar y retornar a un nivel de líquido que haga flotar al techo bastante por debajo de la parte superior de la envolvente del tanque, sin daño para ninguna parte del techo, envolvente o accesorios.

Las condiciones exigibles a un techo flotante tipo simple pontón son.

- a) El volumen mínimo del pontón será suficiente para mantener el techo en flotación sobre un líquido cuya densidad relativa no exceda de 0,7 kg/l, cuando la cubierta y dos compartimentos estancos cualesquiera se encuentran perforados y el drenaje primario del techo se encuentra fuera de funcionamiento.
- b) El volumen mínimo de pontón de un techo de cubierta única, será suficiente para mantener el techo a flote sobre un líquido cuya densidad relativa sea 0,7, mientras soporta una altura equivalente a 254 mm de precipitación de lluvia sobre la totalidad del área del techo, concentrada en la cubierta central, considerando el drenaje primario del techo fuera de funcionamiento. En estas condiciones no se consideran perforados los compartimentos del pontón ni la cubierta.



A.6.2. Calculo de la flotabilidad del techo “Tipo Simple Pontón”

A.6.2.1. Esquema

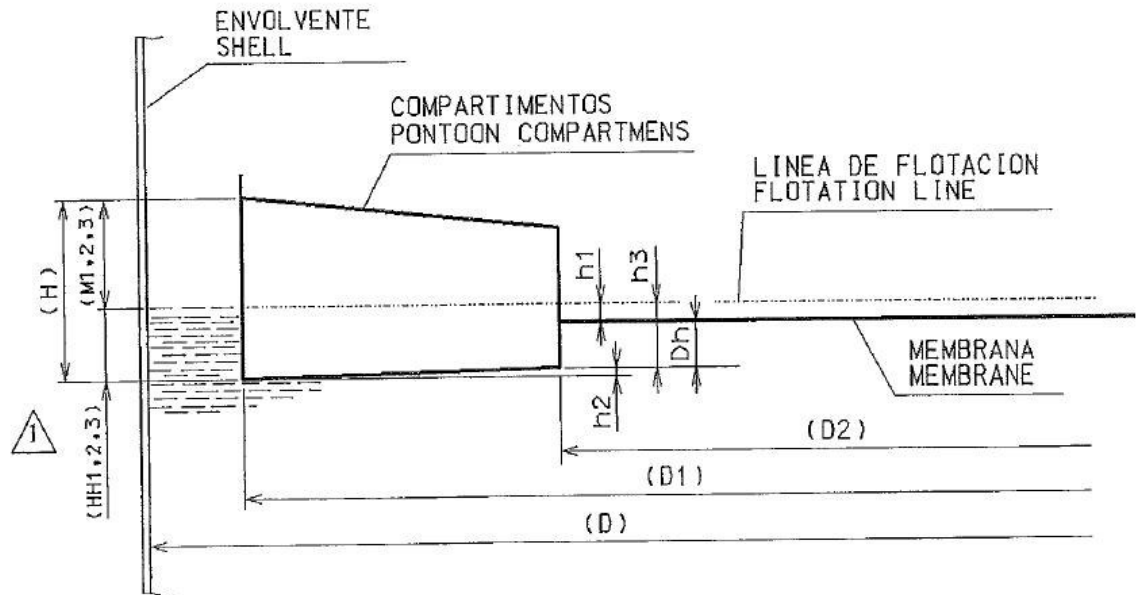


Fig-5.1

A.6.3. Datos

Diámetro nominal del tanque	D= 80,500 m.
Diámetro exterior del techo	D ₁ = 80,094 m..
Diámetro exterior de la membrana	D ₂ =69,894 m.
Peso específico del producto	G= 0,87 Tn/m ³
Peso estimado del techo sin accesorios	P ₁ =387,05 Tn.
Peso estimado de los accesorios del techo	P ₂ =30,570 Tn.
Peso estimado del pontón con los accesorios	W = 185,740 Tn.
Espesor de las chapas de la membrana	T =6,50 mm.
Número de compartimentos del pontón	N= 48.
Altura del pontón, por el lado en contacto con la junta	H= 0,800 m.



A.6.4. Cálculos previos

a) Distancias

Distancias	Medida
h_1	0,06240 m.
h_2	0,04250 m.
h_3	0,1560 m
$\Delta h = h_3 - h_1$	0,0935 m.

b) Volumen desplazado con producto de peso específico 0,7: $V = 596,5 \text{ m}^3$ **A.6.5. Cálculo del hundimiento del techo**

Se consideran tres hipótesis:

- En servicio normal, (considerando solo el peso propio)
- Con lluvia caída de 250mm de columna de agua y desagües inutilizados.
- Perforación de la membrana y de dos compartimentos

Hipótesis	Hundimiento
a	$H H_1 = 0,227 \text{ m.}$
b	$H H_2 = 0,594 \text{ m.}$
c	$H H_3 = 0,539 \text{ m.}$

A.6.6. Cálculo del margen de seguridad

Hipótesis	Margen de seguridad – M -
a	$M_1 = H - H_1 = 0,573 \text{ m.}$
b	$M_2 = H - H_2 = 0,206 \text{ m.}$
c	$M_3 = H - H_3 = 0,261 \text{ m.}$

“En las tres hipótesis consideradas, el margen de seguridad es superior al admisible, por ello, se puede asegurar la flotabilidad del techo”.



A.6.7. Determinación de la rigidez del pontón

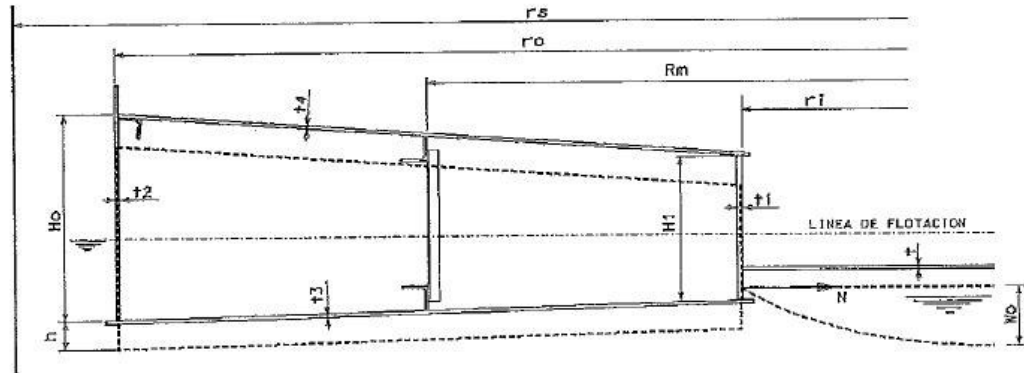


Fig-5.2

A. 6. 8. Datos de partida

Designación	INICIAL	DIMENSION
Radio del tanque	r_s	4025,00 cm.
Radio exterior del techo flotante	r_o	4004,70 cm.
Radio interior del techo flotante	r_i	3497,70 cm.
Radio medio del pontón	$R_m = 0,5(r_o-r_i)$	3749,70 cm.
Altura de la pared exterior del pontón	H_o	80 cm.
Altura de la pared interior del pontón	H_i	45 cm.
Espesor de la membrana central	t	0,60 cm.
Espesor de la chapa superior del pontón	t_4	0,50 cm.
Espesor de la chapa inferior del pontón	t_3	0,65 cm.
Peso específico del producto	γ	$7 \times 10^{-4} \text{ kp / cm}^3$
Módulo de Young	E	$2,1 \times 10^6 \text{ kp / cm}^2$



A.6.9. Tamaño de las paredes del pontón

Paredes		Denominación	Dimensión
interior	Espesor	t_1	1,9 cm.
	Longitud	l_1	45 cm.
exterior	Espesor	t_2	0,65 cm.
	Longitud	l_2	80 cm.

A.6.10. Número y tamaño de los angulares transversales rigidizares

Nº y tamaño	2 L.-70 x 70 x 7
Sección unitaria	9,4 cm ² . Unidad
Momento de inercia	42,3 cm ⁴ Unidad

A.6.11. Área mínima necesaria en el pontón

$$A_o = \frac{6}{100} r_i - 36 = 173,68 \text{ cm}^3.$$

A.6.12. Área del pontón

Elemento	Área
Pared interior	85,50 cm ² .
Pared exterior	21,03 cm ² .
Membrana superior e inferior	48,89 cm ² .
Angulares	23,60 cm ² .
Área real efectiva	179,02 cm ² .

Área real efectiva $A = 179,02 \text{ cm}^2 > A_o = 173,68 \text{ cm}^2$.

Área total de la sección del pontón $A_t = 747,60 \text{ cm}^2$

Carga de agua: $W = \pi r_s^2 \times 25,4 \times 10^{-3} = 1.292.752,42 \text{ kp}$



A.6.13. Flecha en la membrana del techo por carga de agua:

$$\frac{8\pi e}{3r_i^2} A \omega_o^2 + \left\{ 1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right\} \frac{\pi r_i^2 \gamma}{2} \omega_o^2 - \left[1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right] W = 0$$

De donde el valor de $\omega_o = 83,06$ cm

$\omega_o =$ Flecha de la parábola deformada (ver Fig-6.2)

A.6.14. Volumen desplazado por la deformación de la membrana del techo:

$$V = 0,5 (\pi \omega_o r_i^2) = 159.347.165 \text{ cm}^3.$$

A.6.15. Incremento de hundimiento por la carga de agua:

$$\Delta h = \frac{\frac{W}{Y} - v}{\pi r_o^2} = 5,03 \text{ cm.}$$

A.6.16. Tensiones en el borde interior del pontón:

Cortadura: $P = \pi (r_o^2 - r_i^2) h \gamma = 42.288,52 \text{ kp.}$

Fuerza Radial: $N = \frac{P}{4\pi\omega_o} = 40,514 \text{ kp/cm.}$

Momento de Inercia de la sección del pontón:

$$I_x = 637.660,16 \text{ cm}^4.$$

Según IP 9-4-1 10.2 c de EXXON

Como $N = 40,15 \text{ kp/cm.} < 7,5 \times E \times I_x / Rm^3 = 2190,66 \text{ kp/cm}$

” Se cumple la condición requerida: y el techo esta totalmente rigidizado “



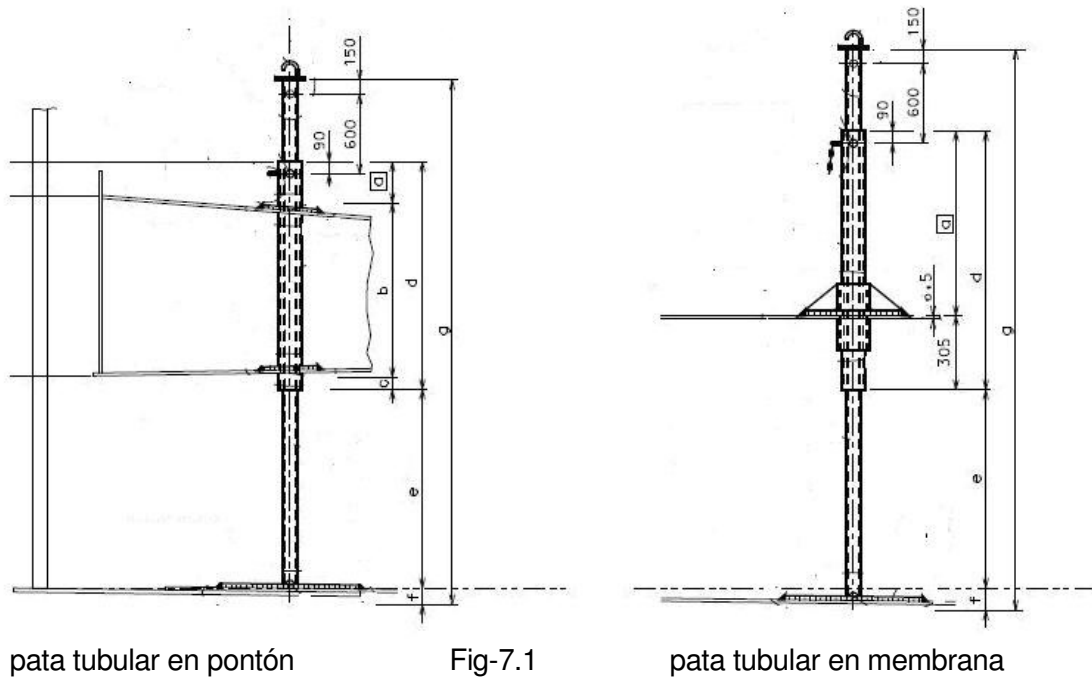
A.7. CÁLCULO DE LOS SOPORTES TUBULARES DEL TECHO FLOTANTE “SIMPLE PONTÓN”

En el techo se colocan patas tubulares en círculos concéntricos en la membrana y en el pontón. Estas patas tienen por objeto mantener el techo flotante cuando el líquido desciende a su cota más baja, pues entonces las patas se apoyan sobre el fondo y sostienen a la membrana y al pontón.

Las patas están formadas por dos tubos concéntricos, uno exterior al cual va soldada la membrana o el pontón, según sea tubo situado en la membrana o situado bajo el pontón.

En la posición más baja del techo, al disminuir la altura del líquido, el tubo exterior solidario al techo, desliza sobre el tubo interior, hasta que hace tope, y es entonces cuando los tubos interiores apoyados en el fondo se comportan como patas, y sobre ellas descansa todo el techo más la sobrecarga de diseño que actúa sobre él.

Los tubos están colocados a distancias máximas de 6,00 m., unos de otros, y la forma de distribución es colocándolos en círculos concéntricos alrededor del centro del techo, siendo la diferencia radial entre los círculos de 6,00 m.



En la zona del pontón se colocan dos círculos concéntricos entre si y concéntricos a los de las patas de la membrana, En cada uno de los 2 círculos del pontón se coloca 1 pata por compartimento estanco del pontón.

EL número de tubos en un círculo de la membrana es:

$$N = \frac{2\pi R}{6}$$

R = radio del círculo en m.

Las dimensiones de los tubos y su distribución en cada círculo concéntrico en la membrana son:

a) Disposición de los tubos en la membrana

Ø de tubos ext. pulgadas	Ø de tubos int.. pulgadas	Radio del Círculo m.	Nº de tubos por cada circulo en membrana
3	2 1/2	2,00	3
3	2 1/2	6,00	7
3	2 1/2	12,00	13
3	2 1/2	18,00	19
3	2 1/2	24,00	26
3	2 1/2	30,00	32

El Numero total de patas tubulares en la membrana es de N =100 en 6 circulo separados a intervalos de 6,00 m.

En la zona del pontón se distribuyen l 2 círculos a distancias menores de 6,00, y se colocan en cada círculo tantas patas como compartimentos existan, en nuestro caso 48



b) Disposición de los tubos en el pontón

Ø de tubos externos pulgadas	Ø de tubos internos pulgadas	Radio del círculo m.	Nº de tubos por cada círculo en membrana
4	3	35,647	48
4	3	39,347	48

El número de patas tubulares colocados en el pontón es de $N = 96$

Todos los tubos son de material en Acero al Carbono A-106 Gr b Sch 80

A.7.1. Datos Techo

Diámetro del tanque	$D = 80,50 \text{ m.}$
Radio exterior del pontón	$R_{EP} = 40,047 \text{ m.}$
Área de la superficie del pontón	$A_P = 1207,35 \text{ cm}^2$
Radio externo membrana (interno pontón)	$R_{EM} = 34,947 \text{ m.}$
Área de la superficie de la membrana	$A_M = 3836,80 \text{ cm}^2$
Peso total de la membrana	$P_M = 417.620 \text{ kp}$
Peso total del pontón	$P_P = 185.740 \text{ kp}$
Nº compartimentos en pontón	48
Nº total soportes en pontón	$N_{PP} = 96$
Nº total soportes en membrana	$N_{PM} = 100$
Carga viva sobre el techo	$q = 122 \text{ kp/m}^2$



A.7.2. Datos de las patas

a) Membrana: tubos de 2 1/2" A-106 Gr B Sch 80

Diámetro exterior de las patas de la de membrana	$d_{em} = 6,03 \text{ cm.}$
Diámetro interior de las patas de la membrana	$d_{im} = 5,90 \text{ cm.}$
Espesor	$t_m = 0,701 \text{ cm.}$
Área de la sección del tubo (pata)	$A_{pm} = 14,54 \text{ cm.}^2$
Momento de inercia del tubo (pata)	$I_{pm} = 80,00 \text{ cm.}^4$
Radio de giro del tubo (pata)	$r_{pm} = 2,35 \text{ cm.}$
Longitud del tubo (pata) en trabajo	$L_{pm} = 396,7 - 123,6 = 273,1 \text{ cm.}$
Esbeltez del tubo (pata)	$\lambda_{pm} = L_{pm} / r_{pm} = 116,21.$
Límite Elástico del material del tubo	$F_y = 2461 \text{ kp / cm.}^2$
Módulo de elasticidad del material del tubo	$E = 2.100.000 \text{ kp / cm.}^2$

b) Pontón : tubos de 3" A-106 Gr B Sch 80

Diámetro exterior de las patas de la membrana	$d_{ep} = 8,89 \text{ cm.}$
Diámetro interior de las patas de la membrana	$d_{ip} = 7,37 \text{ cm.}$
Espesor de los tubos (patas)	$t_p = 0,762 \text{ cm.}$
Área de la sección del tubo (pata)	$A_{pp} = 19,46 \text{ cm.}^2$
Momento de inercia del tubo (pata)	$I_{pp} = 162,09 \text{ cm.}^4$
Radio de giro del tubo	$r_{pp} = 2,35 \text{ cm.}$
Longitud del tubo en trabajo	$L_{pp} = 308,5 - 125,0 = 183,5 \text{ cm.}$
Esbeltez del tubo	$\lambda_{pp} = L_{pp} / r_{pp} = 78,08.$
Límite Elástico del material del tubo (pata)	$F_y = 2461 \text{ kp / c m.}^2$
Modulo de Elasticidad del material del tubo (pata)	$E = 2.100.000 \text{ kp / cm.}^2$



A.7.3. Cálculo del coeficiente de compresión C_c

Para columnas en API -650 punto 3.10.3.4

$$C_c = \sqrt{\frac{2 \pi^2 E}{F_y}} = 129,79.$$

A.7.4. Cálculo de las tensiones admisibles de Compresión en las patas

a) Para patas tubulares en Pontón.

Cuando $\lambda = 78,08 \leq C_c = 129,79$.

$$F_{aP} = \frac{\left[\frac{\left[1 - \frac{(L/r)^2}{2 C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(L/r)}{8 C_c} - \frac{(L/r)^3}{8 C_c^3}} \right]}{\left[1,6 - \frac{L}{200 r} \right]} = 994,40 \text{ kp / cm}^2.$$

b) Para patas tubulares en Membrana

Cuando $\lambda = 116,21 \leq C_c = 129,79$.

$$F_{aM} = \frac{\left[\frac{\left[1 - \frac{(L/r)^2}{2 C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(L/r)}{8 C_c} - \frac{(L/r)^3}{8 C_c^3}} \right]}{\left[1,6 - \frac{L}{200 r} \right]} = 751 \text{ kp / cm}^2.$$



A.7.5. Cálculo de las tensiones de trabajo a Compresión en las patas

a) Membrana

Superficie total de la membrana: $A_M = 3836,80 \text{ cm}^2$

Número de patas en la Membrana: $N_{PM} = 100$

Superficie de un soporte: $A_{PM} = \frac{A_M}{N_{PM}} = 38,37 \text{ m}^2$

Peso de la Membrana: $P_M = 417.620 \text{ kp}$

Carga en cada soporte por peso membrana: $q_{PM} = \frac{P_M}{N_{PM}} = 4.176,20 \text{ kp}$

Carga en cada soporte por sobrecarga: $q_{SoM} = 122 \text{ kp/m}^2 \times A_{PM} = 4681,14 \text{ kp}$

Carga total en un soporte de la Membrana: $Q_{TPM} = 4176,20 + 4681,14 = 8857,34 \text{ Kp}$.

Tensión de trabajo en una pata : $S = \frac{Q_{TPM}}{A_{PM}} = 609,58 \text{ kp / cm}^2$

$S = 609,58 \text{ kp / cm}^2 < \text{Tensión admisible } F_{aM} = 751 \text{ kp / cm}^2$

“La soportes de membrana son válidos “

b) Pontón

Superficie total del Pontón: $A_P = 1207,35 \text{ cm}^2$

Número de patas en el Pontón: $N_{PP} = 96$

Superficie correspondiente a un soporte: $A_{PP} = \frac{A_P}{N_{PP}} = 12,57 \text{ m}^2$

Peso de la Membrana: $P_P = 187.740 \text{ kp}$

Carga en cada soporte por peso de membrana: $q_{PP} = \frac{P_P}{N_{PP}} = 1955,63 \text{ kp}$.

Carga en cada soporte por sobrecarga: $q_{SoP} = 122 \text{ kp/m}^2 \times A_{PP} = 1533,54 \text{ kp}$.

Carga total en un soporte de la Membrana: $Q_{TPM} = 1955,63 + 1533,54 = 3489,17 \text{ Kp}$.

Tensión de trabajo en una pata: $S = \frac{Q_{TPM}}{A_{PM}} = 179,3 \text{ kp / cm}^2$

$S = 179,3 \text{ kp/cm}^2 < \text{Tensión admisible } F_{aM} = 994,4 \text{ kp / cm}^2$

“Los soportes del pontón son válidos.”



A.8. EVALUACION DEL CAUDAL PARA EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL TANQUE

A.8.1. Datos

Elemento		Medición
Radio del tanque	R	40,268 m.
Altura del tanque	H	19,500 m.

A.8.2. Evaluación del caudal de agua necesario para el sistema

Esta evaluación sólo es aplicable a tanques que almacenan hidrocarburos líquidos de las Clases “B” y “C”

Clase “B”: Gasolina, Nafta; Petróleo, Disolventes y Crudo

Clase “C”: Gas-Oil; Fuel-Oil, Diesel-Oil y Mezclas

Según el Reglamento de Instalaciones Petrolíferas y las Instrucciones ITC. MIE-IP 01 e ITC. MIE –IP02, el Caudal Mínimo Reglamentario será:

- a) Como “TANQUE SUPUESTAMENTE INCENDIADO DE RADIO R”

$Q_{m1R} = 15$ litros/ minuto por metro de circunferencia

Perímetro del tanque: $P_m = 2 \pi R = 253,01$ m.

CAUDAL MÍNIMO: $Q_{M\text{ini}} = 3795,17$ l/min = 227,71 m³/h.

- b) Como “TANQUE AFECTADO” ESTANDO COMPRENDIDO total o parcialmente en un radio de “2,5 R” del tanque supuestamente incendiado.

El tanque se encuentra en esta situación por estar en el mismo cubeto que el tanque gemelo.

El Caudal Reglamentario será:

$Q_{m2R} = 2,00$ litros por minuto por metro cuadrado sobre $\frac{1}{4}$ de la superficie lateral del tanque.

Superficie lateral requerida = $0,25 \times P_m \times H = 1233,43$ m²

Caudal mínimo $Q_{m2} = 2466,86$ l/min = 148,01 m³/h.



A.8.3. Caudal total de agua para el sistema de enfriamiento

En el cubeto en que se encuentra el tanque solo se influencia con su tanque gemelo.

La Norma exige mojar $\frac{1}{4}$ de la superficie lateral como “tanque afectado” y por tanto, es suficiente colocar un tramo de anillo con una longitud de $\frac{1}{4}$ del perímetro en la orientación del tanque gemelo que le afecta.

Como ambos tanques están dentro de una Refinería, el Reglamento exige como protección contra incendios, un sistema fijo de distribución de espuma. No obstante se opta por añadir al conjunto de los dos tanques un sistema fijo de agua para su protección como “tanques afectados”

Por tanto el caudal total de agua para el sistema de enfriamiento de cada tanque será:

“El correspondiente a un sector de $\frac{1}{4}$ de superficie lateral”

$$Q_T = Q_{m2} = 2466,86 \text{ l / min} = 148,01 \text{ m}^3 / \text{h}$$



A.9. ESTABILIDAD DEL TANQUE DEBIDO A LA ACCIÓN DEL VIENTO

Las bases de cálculo son las de API-650 y NBE-88.

Las condiciones mas desfavorables corresponde al tanque corroído y estando vacío, con viento al 100% de su velocidad de diseño.

A.9.1. Datos

Concepto		Dimensión
Diámetro nominal del tanque	D	80,50 m.
Altura total de la envolvente	H _T	19,50 m.
Peso de la envolvente	W _S	840.015 kp.
Velocidad del viento	V	144 km/h = 40 m/seg.
Coeficiente eólico de forma	C _w	0,8
Coeficiente eólico de esbeltez	C _e	1.0
Coeficiente eólico de contorno	C _c	1,2
Situación	Grao de Castellón	

A.9.2. Cálculos

a) Presión dinámica del viento

$$F_d = \frac{V^2}{16} = 100 \text{ kp.}$$

V = Velocidad viento en m/seg = 40 m / seg.

b) Sobrecarga unitaria de viento

$$F_u = F_d \times C_w \times C_e \times C_c = 96 \text{ k/p / m.}^2$$

c) Área expuesta al viento

$$A_v = D \times H = 1569,75 \text{ m.}^2$$



d) Momento de vuelco por el viento

$$M_V = F_U \times A_v \times 0,5 H = 1.469.286 \text{ m x kp.}$$

e) Momento estabilizante

$$M_E = 0,5 \times W_S \times D = 33.810.604 \text{ m x kp.}$$

f) Comprobación

En API-650 punto 3.11.2 para que el tanque sea estable al viento en las condiciones más desfavorables se tiene que cumplir:

$$M_V \leq 2/3 M_E$$

$$M_V = 1.469.286 \text{ mxkp} < 2/3 \times 33.810.604 = 22.540.402 \text{ m x kp.}$$

“El tanque es estable a la acción del viento y no hace falta anclarlo por este concepto “



A.10. ESTABILIDAD DEL TANQUE DEBIDO A LA ACCIÓN DEL SÍSMO

Las bases de diseño para este cálculo son: API-650 Apéndice E y La Norma Sísmica NCSE-02, considerando el tanque en operación y sismo total (tanque sin corroer).

A.10.1. Datos

Diámetro nominal	$D_N=80,50$ m.
Altura total de la envolvente	$H_T = 19,50$ m.
Altura de calculo de la envolvente	$H = 18,30$ m.
Altura del c. de g. de la envolvente	$X_S = 7,5715$ m.
Espesor de la 1ª virola (virola del fondo)	$t_1 = 35,60$ mm
Limite Elástico de la 1ª virola	$F_Y = 358,9$ Mpa
Espesor de la chapa del fondo debajo de la 1ª virola	$t_b = 16,0$ mm.
Ancho de la chapa del fondo debajo de la 1ª virola	$A_b = 1300$ mm
Limite Elástico de la chapa del fondo debajo de la 1ª virola	$F_{bY} = 358,9$ MPa
Peso especifico del producto	$G = 1,0$
Peso total actuando sobre la envolvente	$W_S = 840.015$ kp
Peso del contenido	$W_T = 93.139.250$ kp
Aceleración sísmica básica	$a_b = 0,04$.
Coefficiente de riesgo	$P = 1,3$.
Coefficiente de suelo	$C = 1,4$.
Coefficiente de amplificación del terreno	$S = 1,12$.

A.10.2. Cálculo del periodo de oscilación y de los coeficientes laterales de fuerza.

Relación D/H = 4,399.

Factor obtenido en la Fig E'4 del Apéndice E del API-650 en función de D / H.

$K=0,696$

El Periodo Natural se obtiene por la formula del punto E.3.3.2 del Apéndice E de API-650-

$T = 1,81 \times k \times (D)^{0,5} = 11,31$ seg.

Coefficiente de fuerza lateral $C_1 = 0,60$ en punto E.3.3.1 Apéndice E de API-650

Coefficiente lateral de fuerza $C_2 = \frac{3,375S}{T^2} = 0,0296$ en punto E.3.3.2 de API-650



A.10.3. Determinación de las fuerzas sísmicas y de los brazos de los momentos

En función D/H se determina W_1 / W_T y W_2 / W_T en la Fig-E.2 del Apéndice E de API-650 y de estas relaciones en función de W_T se obtienen las masas sísmicas W_1 y W_2 .

W_1 = Peso de la masa efectiva de los contenidos del tanque que se mueven al unísono con la envolvente = 23.59.0187 kp

W_2 = Peso de la masa efectiva de los contenidos del tanque que se mueve en el primer desplazamiento = 62.620.113 kp.

En función D/H se determina X_1 / H y X_2 / H en la Fig-E.2 del Apéndice E de API-650 y de estas relaciones en función de H se obtienen los brazos X_1 y X_2 .

A.10.4. Determinación del momento sísmico de vuelco

$$M_V = Z I (C_1 W_S X_S + C_1 W_T X_T + C_1 W_1 X_1 + C_2 W_2 X_2) = 15.218.654 \text{ m x kp}$$

Z = Factor sísmico = 0,4 $g = 0,4$

I = Factor = 1

A.10.5. Cálculo del peso de la porción de líquido considerada para oponerse al vuelco.

$w_L = 99 t_b \sqrt{F_{by} G H}$ esta formula es del punto E.4.1 Apéndice E de API-650

w_L = Máximo peso de los contenidos del tanque que se oponen al vuelco en N/m. de circunferencia de envolvente.

F_{by} = Límite Elástico de la placa anular del fondo en MPa = 358,9

G = Peso específico del líquido = 1,0

H = Máxima altura del nivel del líquido = 18,3 m.

t_b = Espesor de la placa del fondo debajo la 1ª virola = 16 mm.

D = Diámetro nominal del tanque en m = 80,50 m.

$$w_L = 99 t_b \sqrt{F_{by} G H} = 128.371,15 \text{ N / m} = 12.837,72 \text{ kp / m.}$$

El máximo valor permitido de $w_{LMax} = 196 G D H = 288.737,4 \text{ N/m} = 28.872,7 \text{ kp / m.}$

Por consiguiente el peso de la lámina adyacente a la envolvente que se opone al vuelco es:

$$W_L = 12.837,72 \text{ kp / m} = 128.377,2 \text{ N / m.}$$



A.10.6. Compresión en las paredes de la envolvente

Punto E.5.1 del Apéndice E API-650

Para tanques sin anclajes, la máxima fuerza de compresión longitudinal en el fondo de la envolvente viene dado por:

$$B = w_t + \frac{1,273 M_V}{D^2} \quad \text{si} \quad \frac{M_V}{D^2(w_t + w_L)} \leq 0,785.$$

B= Fuerza máxima de Compresión longitudinal en el fondo de la envolvente en kp / m.

w_t = Peso de la envolvente del tanque y de la porción del techo fijo soportado por la envolvente

$$= \frac{W_S}{\pi D} = 3.321,55 \text{ Kp / m.}$$

M_V = Momento de vuelco debido al sismo = 15.218.654 m x kp.

D = Diámetro del tanque =80,5 m.

w_L = Peso de lamina adyacente a la envolvente que se opone al vuelco= 12.837,72 kp / m.

$$\frac{M_V}{D^2(w_t + w_L)} = 014 < 0,785$$

$$B = w_t + \frac{1,273 M_V}{D^2} = 3321,55 + 2989,6 = 6311,15 \text{ kp / m.}$$

A.10.7. Máxima fuerza de compresión admisible

$$\text{Si } G H D^2 / t_{1V}^2 \geq 44 \quad F_a = \frac{83t_{1V}}{D}.$$

$$\text{Si } G H D^2 / t_{1V}^2 < 44 \quad F_a = \frac{83t_{1V}}{2,5 D} + 7,3 \sqrt{GH}$$

F_a = Máxima fuerza de Compresión Admisible en MPa.

D = Diámetro nominal del tanque en m. =80,50 m.

H = Altura total del tanque en m: =19,50 m.

G = Peso especifico =1,00.



F_{bY} = Límite Elástico del material de la ^a virola en el fondo de la envolvente = 358,9 MPa.

t_{1V} = Espesor de la ^a virola en el fondo de la envolvente = 35,6 mm.

Se debe de cumplir que $B/100 t < F_a$ pero en cualquier caso:

$F_a \leq 0,5 F_{bY} = 0,5 \times 358,9 \text{ MPa}$.

Si $GHD^2 / t_{1V}^2 = 1 \times 19,5 \times 80,5^2 = 99 \geq 44$ $F_a = \frac{83 t_{1V}}{D} = 36,74 \text{ MPa} = 387,4 \text{ Kp / cm.}^2$

$F_a = 38,74 \text{ MPa} < 0,5 F_{bY} = 179,45 \text{ M PA}$ Cumple.

Además $B / 1000 t_{1V} = 1,72 \text{ MPa} < F_a = 38,74 \text{ MPa}$ Cumple.

“El tanque es estable a sismo y no son necesarios anclajes.”



A.11. PRESUPUESTO**A.11.1. Descripción del presupuesto.**

Construcción del tanque.....	1.375.740,00 €
Tuberías, accesorios y válvulas manuales.....	84.303,22 €
Sistema contra incendios.....	40.574,90 €
Electricidad.....	19.389,52 €
Instrumentación.....	25.869,60 €

TOTAL CONSTRUCCIÓN TANQUE **1.545.877,24 €**





A.12. PLANOS DEL TANQUE

A.12.1. Conjunto Esquemático





A.12.2. Distribución de chapas en la envolvente y fondo





A.12.3. Techo flotante simple pontón





A.12.4. Soportes tubulares





A.12.5. Viga contra viento





A.12.6. Barandilla en la viga contra viento





A.12.7. Drenaje de fondo





A.12.8. Conexiones y drenaje de emergencia en techo





A.12.9. Tubos guía





A.12.10. Pantalla de contención de espuma y conexión eléctrica





