



## DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS EN LA BASE DE UN TANQUE ATMOSFÉRICO DEBIDO A LOS EFECTOS DEL VIENTO

**Juan José Martínez Cosgalla**

*Instituto Politécnico Nacional, ESIME Azcapotzalco  
jmartinezc@ipn.mx*

**J. Santana Villarreal Reyes**

*Instituto Politécnico Nacional, ESIME Azcapotzalco  
svillarreal@ipn.mx*

**Gerardo Irving Arjona Ramírez**

*Instituto Politécnico Nacional, ESIME Azcapotzalco  
garjona@ipn.mx*

### Resumen

*En este trabajo se aplica el procedimiento mecánico para determinar los efectos provocados por viento en un tanque atmosférico de almacenamiento API 650, el cual será empleado para almacenar 25,000 barriles de gasolina y que operará en el municipio de Cadereyta, N. L. Para ello, se utilizó lo establecido en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la C.F.E. en su sección de Diseño por Viento, así como lo establecido al respecto en el estándar API 650.*

*Palabras clave: tanque API, diseño, viento, manual, procedimiento.*

Con el incremento de la demanda de combustibles fósiles en México, ha surgido la necesidad de construir tanques de almacenamiento de gran capacidad, a fin de responder de manera acertada al mercado

nacional. Para ello se han diseñado y construido tanques atmosféricos que cumplan con las medidas de seguridad para que se puedan garantizar las condiciones de operación. Una de estas medidas, es considerar los efectos que se

producen en el fondo de estos tanques por la acción del viento, cuya velocidad depende de la zona donde se vaya a instalar este tipo de tanques. En este trabajo presentamos la metodología utilizada para determinar los efectos provocados por el viento, utilizando las especificaciones del Manual de Diseño de Obras Civiles de la C.F.E. (M.D.O.C.C.F.E), en lo concerniente a sus secciones de Diseño por Sismo y Viento, en tanques atmosféricos construidos de acero dúctil.

### Datos técnicos de entrada

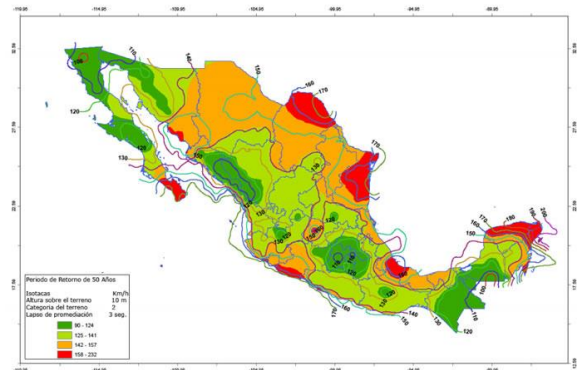
Para dar inicio al análisis de los efectos debidos a las cargas por viento en un tanque atmosférico, en este caso para 25 mil barriles de gasolina, se requiere clasificar el tanque, de acuerdo con su importancia y con la capacidad de respuesta ante la acción del viento, la geometría del tanque y las condiciones ambientales del lugar geográfico donde se instalará. Estos valores de entrada se relacionan en la tabla 1, los cuales se obtuvieron en el M.D.O.C.C.F.E.

**Tabla 1. Consideraciones de diseño y datos de entrada. Fuente: M.D.O.C.C.F.E.**

Consideraciones de diseño:	
Clasificación del equipo según su importancia:	Grupo A
Categoría del terreno según su rugosidad:	Categoría 4
Clasificación del equipo según su respuesta ante el viento:	Tipo 1
Datos de entrada:	
Velocidad regional del viento:	161 km/h
Altura del sitio (MSNM):	16 m
Temperatura del sitio:	26.1°C
Altura total del recipiente:	14.6304 m
Altura de desplante:	0 m
Diámetro del recipiente:	18.5928 m
Techo del tanque:	Domo geodésico.

Cabe mencionar que la velocidad del viento, fue tomada del mapa de isotacas para un

periodo de retorno de 50 años, toda vez que de acuerdo con la normativa, se requiere que estos equipos se diseñen para una vida útil de entre 20 y 30 años. La figura 1 muestra el mapa de isotacas, donde aparece la región de operación del tanque.



**Fig. 1.- Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 50 años. Fuente: <https://www.google.com>**

### Cálculo de la velocidad de diseño $V_D$ .

Ahora se procede a calcular la velocidad de diseño aplicando la ecuación (1) siguiente:

$$V_D = F_T F_{RZ} V_R \dots \dots (1)$$

donde:

$F_T$  = Factor de topografía

$F_{RZ}$  = Factor de exposición local

$V_R$  = Velocidad regional del viento

### Factor de topografía, $F_T$

La tabla 2 establece los factores de topografía para diferentes tipos de terreno, por lo tanto a partir de esta tabla, se determinó el factor de topografía.



**Tabla 2. Factor de topografía. Fuente: M.D.O.C.C.F.E.**

Tipos de terreno	Ejemplos de topografía local	$F_T$
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano: campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%	1.0
Expuesto	Promontorios: montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas. Terraplenes: peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas.	Vease las ec. (4.2.6) a (4.2.8)

Como el tanque se instalará en el municipio de Cadereyta de Jiménez, Nuevo León, el cual se encuentra localizado sobre terrenos planos, sin cambios topográficos de importancia y con pendientes menores del 5%, podemos considerar un factor de topografía de 1.0.

#### Factor de exposición local, $F_{RZ}$

En la tabla 3 se muestran las categorías del terreno donde se pretende instalar el nuevo proyecto, en función de la rugosidad de éste. Considerando que el tanque será instalado en un complejo industrial totalmente desarrollado, se considero una categoría de 4.

**Tabla 3.- categorías de terreno según su rugosidad. Fuente: M.O.C.C.F.E.**

Categoría	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones	Franjas costeras planas, zonas de pantanos o de lagos,	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del

	y superficies de agua.	campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o baradas alrededor, superficies nevadas planas.	viento debe ser 2000 m ó 10 veces la altura de la construcción a diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones existentes tienen alturas de 1.5 a 10 m, la longitud mínima debe ser mayor entre 1500 m ó 10 veces la altura de la construcción por diseñar.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones existentes presentan alturas de 3 a 5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser 500 m ó 10 veces la altura de la nueva construcción, la que sea mayor.
4	Terrenos con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas.	Ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tiene una altura mayor a 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser mayor



			entre 400 m y 10 veces la altura de la nueva construcción.
--	--	--	--

Como se puede observar, el factor de exposición es lineal hasta una altura de 10 metros sobre el nivel del piso y para una altura mayor, se deben obtener las variables  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $c$ , lo cual se hará considerando los valores establecidos en la tabla 4, donde se enlistan estas variables.

**Tabla 4. Variables  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $c$  de acuerdo con la categoría del terreno. Fuente: M.D.O.C.C.F.E.**

Categoría del terreno	$\alpha$	$\delta$ (m)	$c$
1	0.099	245.000	1.137
2	0.128	315.000	1.000
3	0.156	390.000	0.881
4	0.170	455.000	0.815

Considerando que la altura total del recipiente  $h_e = 14.630\text{ m}$ , como se observa en la tabla 1 y que la altura promedio total  $\bar{h} = 15.850\text{ m}$ , la ecuación para determinar el factor de exposición local es

$$F_{RZ} = c \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad \text{si } 10 < z < \delta \dots \dots (2)$$

Substituyendo los valores ya determinados, en la ecuación (2) quedará:

$$F_{RZ} = 0.815 \left( \frac{15.850}{10} \right)^{0.170} = 0.8814$$

Una vez encontrado el factor de exposición lineal, se determina la velocidad de diseño substituyendo valores en la ecuación (1)

$$V_D = 1.0 \times 0.8814 \times 161 = 141.905 \text{ km/h}$$

### Presión dinámica de base $q_z$

La presión dinámica de base se obtiene multiplicando la velocidad de diseño por el factor de corrección por temperatura y altura, para lo cual se emplea la ecuación (3) siguiente:

$$q_z = 0.047GV_D^2 \text{ (en Pa)}$$

donde:

$G$  = Factor de corrección por temperatura y altura.

Para determinar el factor de corrección por temperatura y altura, se consideran los datos establecidos en la tabla 1, que son:

Temperatura promedio del sitio del desplante del tanque =  $26.1^\circ\text{C}$

Altura sobre el nivel del mar =  $16\text{ m}$

La tabla 5 muestra la relación entre los valores de altitud ( $h$ ) en msnm y la presión barométrica en mm de Hg, como se muestra.

**Tabla 5. Altitudes ( $h$ ) y presión barométrica (Hg). Fuente: M.D.O.C.C.F.E.**

Altitud msnm	$\Omega$ mm de Hg
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3500	495

Como se puede observar, es necesario interpolar para obtener la presión barométrica a la altura de  $16\text{ msnm}$ , para lo cual emplearemos la ecuación (4) siguiente:

$$Y = Y_a + (X - X_a) \left( \frac{Y_b - Y_a}{X_b - X_a} \right) \dots \dots (4)$$



De esta manera tenemos:

$X_a$	0	$Y_a$	760
X	16	Y	?
$X_b$	500	$Y_b$	720

Substituyendo los valores en la ecuación (4), se obtiene la presión barométrica del lugar de desplante.

$$Y = 760 + (16 - 0) \left( \frac{720 - 760}{500 - 0} \right) = 758.72 \text{ mm Hg.}$$

Una vez que se han determinado los valores de la temperatura y la presión barométrica del sitio de desplante, se obtiene el valor de G, con la ecuación (5) siguiente:

$$G = \frac{(0.392)\Omega}{273 + \tau} \dots\dots (5)$$

$$G = \frac{(0.392)(758.72)}{273 + 26.1} = 0.9944$$

Substituyendo este valor en la ecuación (3) de la presión dinámica de base, se tiene:

$$q_z = 0.047 \times 0.9944 \times 141.905^2 = 941.14 \text{ Pa}$$

Con estos valores, se procederá a calcular las presiones actuantes en el techo (domo geodésico) y paredes (envolvente) del tanque.

### Cálculo de las presiones actuantes en el techo y paredes del tanque.

Las presiones actuantes en el techo y las paredes, se determinan empleando la acuación (6):

$$p_e = C_{pe} K_A K_L q_z \dots\dots (6)$$

donde:

$C_{pe}$  = Coeficiente de presión exterior que se calcula según si se trata de una pared o del techo del silo o tanque cilindrico. Adimensional.

$K_A$  = Factor de reducción de presión por tamaño de área. Adimensional.

$K_L$  = Factor de presión local. Adimensional.

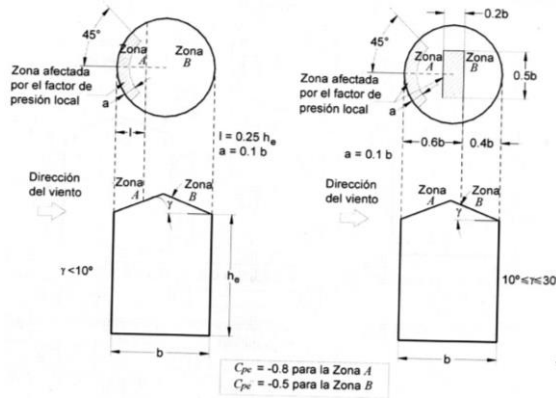
$q_z$  = presión dinámica de base, en Pa.

El valor del factor  $K_A$  para los muros de los silos y tanques cilíndricos será igual a la unidad, 1.0.

El factor  $K_L$  se aplicará a la zona de los bordes de barlovento de los techos cuando la pendiente del techo sea menor o igual a 30°, cuando sea mayor de 15°, este factor se aplicará además sobre una zona cercana a la punta del cono, dicho factor es igual a la unidad. El factor de presión local deberá tomarse igual a 1.0 para las paredes del tanque o silo.

En la figura 2 se muestran los coeficientes de presión exterior  $C_{pe}$ , para techos de silos y tanques cilíndricos  $0.25 \leq \frac{h_e}{b} \leq 4.0$ .





**Fig. 2.- Coeficientes de presión exterior  $C_{pe}$ , para techos de silos y tanques cilíndricos  $0.25 \leq \frac{h_e}{b} \leq 4.0$ . Fuente: M.D.O.C.C.F.E.**

Por lo tanto, la presión exterior en la zona A y zona B es

$$p_e \text{ zona A} = -0.8 \times 1 \times 1 \times 941.14 = -752.9 \text{ Pa}$$

$$p_e \text{ zona B} = -0.5 \times 1 \times 1 \times 941.14 = -470.6 \text{ Pa}$$

El coeficiente de presión exterior  $C_{pe}$ , para las paredes o muros laterales varía de acuerdo al valor del ángulo  $\beta$ , y se calcula con la ecuación (7) siguiente:

$$C_{pe} = K_s C_{pc} \dots \dots \dots (7)$$

donde:

$$K_s = 1.0 \text{ para } C_{pe} \geq -0.15$$

$$K_s = 1.0 - 0.55(C_{pc} + 0.15) \log_{10} \left( \frac{h_e}{b} \right) \text{ para } C_{pc} < -0.15$$

$$C_{pc} = -0.5 + 0.4 \cos \beta + 0.8 \cos 2\beta + 0.3 \cos 3\beta - 0.1 \cos 4\beta - 0.05 \cos 5\beta$$

$\beta$  = Angulo entre la dirección del viento y un punto sobre la pared del silo o tanque circular =  $44^\circ$ .

Por lo tanto,

$$C_{pc} = -0.5 + 0.4 \cos 44^\circ + 0.8 \cos(2 \times 44^\circ) + 0.3 \cos(3 \times 44^\circ) - 0.1 \cos(4 \times 44^\circ) - 0.05 \cos(5 \times 44^\circ) = -0.247$$

$$K_s = 1.0 - 0.55(C_{pc} + 0.15) \log_{10} \left( \frac{h_e}{b} \right)$$

$$h_e = 14.6304 \text{ m}$$

$$b = 18.5928 \text{ m}$$

$$K_s = 1.0 - 0.55(-0.247 + 0.15) \log_{10} \left( \frac{14.6304}{18.5928} \right) = 0.977$$

Substituyendo valores en la ecuación (7), el coeficiente de presión para las paredes del tanque es:

$$C_{pe} = K_s C_{pc}$$

$$C_{pe} = 0.977(-0.247) = -0.241$$

Por lo tanto, la sustituyendo en la ecuación (6), la presión exterior en las paredes del tanque es:

$$p_e = -0.247 \times 1 \times 1 \times 941.14 = -232.46 \text{ Pa}$$

Que como se puede observar es menor a -752.9 Pa, que es la presión exterior permisible en la zona A.

**Cálculo de la fuerza de arrastre para el diseño global del tanque atmosférico.**

La fuerza de arrastre para el diseño de un tanque atmosférico se determina con la ecuación (8):



$$F_a = 0.63q_zbh_e \dots\dots (8)$$

$$F_a = 0.63 \times 941.14 \times 18.5928 \times 14.6304$$

$$= 161.28 \text{ kN}$$

**Determinación de la estabilidad del tanque.**

A fin de verificar la necesidad de anclaje del tanque, para contrarrestar los efectos producidos por el momento de volteo en la base y así mantener el equilibrio en el mismo, se recurrió estándar API 650, cuyo procedimiento está basado en los esfuerzos admisibles.

Los datos necesarios para realizar el cálculo de la estabilidad del tanque se muestran en la tabla 6, considerando que se usará acero al carbón A285MC, de acuerdo a lo señalado en el estándar API 650.

**Tabla 6. Datos de entrada para el cálculo de estabilidad. Fuente: Esquivel, García Victor. Tesis de licenciatura.**

Datos de entrada		
	Unidades en USC	Unidades en SI
Producto almacenado	Gasolina	
Densidad y/o gravedad específica	48 lb/pie <sup>3</sup>	770 kg/m <sup>3</sup>
Gravedad específica	0.77	0.77
Altura total del tanque (H)	48 pies	14.6304 m
Altura del líquido almacenado (H <sub>L</sub> )	46.5 pies	14.1732 m

Diámetro del tanque (D)	61 pies	18.5928 m
Espesor promedio del tanque (t)	0.325 pulgadas	0.0082 m
Espesor del anillo del fondo (t <sub>f</sub> )	0.438 pulgadas	11.1252 mm
Espesor de la placa base (t <sub>a</sub> )	0.475 pulgadas	12.065 mm
Límite elástico del material (F <sub>y</sub> )	30,000 psi	21,092,090 kg/m <sup>2</sup>
Masa total del tanque (M <sub>TANQUE</sub> )	90,032 lb	40,837.83 kg

**Relación de anclaje.**

De acuerdo con lo que se establece en el inciso E.6.2.1.1.1. (Anchorage ratio) del estándar API 650, la relación de anclaje se determina aplicando la ecuación (9), siguiente:

$$J = \frac{M_{TOTAL}}{D^2(W_{TOTAL} + W_L)} \dots\dots (9)$$

donde:

J = Relación de anclaje [adimensional]

M<sub>TOTAL</sub> = Momento de volteo total [N-m]

D = Diámetro nominal del tanque [m]

W<sub>TOTAL</sub> = Peso total del tanque actuando en la base [N]

W<sub>L</sub> = Peso máximo contenido del tanque, que se puede utilizar para resistir el momento de volteo [N]

M<sub>TOTAL</sub> = Momento de volteo total [N-m]



### Cálculo del momento de volteo

El momento de volteo se determina aplicando la ecuación 10:

$$M_{TOTAL} = \sqrt{M_{OI}^2 + M_{OC}^2} \dots\dots (10)$$

$$M_O = VH$$

$$M_{OI} = V_I H_I = 741,003.04 \times 8.1238 \\ = 6.02 \times 10^3 \text{ N} - m$$

$$M_{OC} = V_C H_C = 54,552.52 \times 10.3168 \times 10^3 \\ = 562.81 \times 10^3 \text{ N} - m$$

Substituyendo valores en la ecuación (10), se tiene:

$$M_{TOTAL} = \sqrt{(6.02 \times 10^6)^2 + (562.81 \times 10^3)^2} \\ = 6.05 \times 10^6 \text{ N} - m$$

$$D^2 = (18.5928)^2 = 345.7 \text{ m}^2$$

$$W_{TOTAL} = \frac{(M_{TANQUE} + M_{TECHO})g}{\pi D}$$

donde:

$M_{TANQUE}$  = Masa del tanque [kg]

$M_{TECHO}$  = Masa del techo, en este caso domogodésico, el cual puede representar un peso mínimo; se considera el 20% de la masa del tanque [kg]

$g$  = Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

$D$  = Diámetro nominal del tanque [m]

$$W_{TOTAL} = \frac{[40,837.83 + (2 \times 40,837.83)]9.81}{\pi \times 18.5928} \\ = 8.23 \text{ kN}$$

$$W_L = 99t_a \sqrt{F_Y H_L G}$$

donde:

$t_a$  = espesor de la placa del tanque, en la base [m]

$F_Y$  = límite elástico del material [ $kg/m^2$ ]

$H_L$  = altura máxima del líquido [m]

$G$  = gravedad específica del líquido almacenado [adimensional]

$W_L$

$$= 99 \times 0.12 \sqrt{21,092,090 \times 14.1732 \times 0.77} \\ = 180.24 \text{ kN}$$

Substituyendo valores en la ecuación (9), finalmente se tiene:

$$J = \frac{6.05 \times 10^6}{(18.5928)^2 (8.23 \times 10^3 + 180.24 \times 10^3)} \\ = 0.0928$$

La tabla 7 contiene los criterios necesarios, de acuerdo al estándar API 650, para determinar si el tanque analizado requiere ser anclado en su base.

**Tabla 7.- Criterios de relación de anclaje.**

**Fuente: Estándar API 650.**

Relación de anclaje J	Criterio
$J \leq 0.785$	No existe levantamiento calculado bajo el momento de volteo de diseño sísmico o por viento. El tanque es autoanclado.
$0.785 < J \leq 1.54$	Existe levantamiento, pero el tanque está estable para las cargas de diseño, siempre y cuando los requerimientos de compresión en el cuerpo sean cubiertos.





	El tanque es autoanclado.
$J > 1.54$	El tanque no está estable y no debe ser autoanclado para la carga de diseño. Modificar el anillo base si $L < 0.035D$ no es controlada o agregar anclaje mecánico.

### Conclusiones

El cálculo de los efectos producidos por viento en la base y las paredes de un tanque atmosférico para almacenamiento de gasolina magna, basándose en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE 2008, son confiables siempre y cuando los conceptos revisados en la memoria de cálculo sean aplicados de forma correcta. Como se sabe, existen otros códigos internacionales que también sirven para calcular los efectos provocados por los

fenómenos de viento, los cuales pueden aplicarse para comparar los resultados, pero se recomienda que nunca se trate de homologar un código con otro.

### Referencias

American Petroleum Institute (API). Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage, USA, 2013

Bednar, Henry H. Pressure Vessel Design Handbook, USA, Krieger Publishing Company, 1986

Comisión Federal de Electricidad. Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Viento, México, 2015

Esquivel, Victor G. 2016. Cálculo de los efectos provocados por sismo y viento a un tanque atmosférico para almacenar 25,000 barriles de gasolina a ser instalado en Cadereyta de Jimenez, N.L. Tesis para obtener la licenciatura en Ingeniería Mecánica, ESIME, IPN

Moss, Dennis R. Pressure Vessel Design Manual. USA, Gulf Professional Publishing, 2013