

## DESARROLLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE PETRÓLEO CON TECHO CÓNICO BAJO VIENTO

### DEVELOPMENT OF FRAGILITY CURVES OF OIL STORAGE TANKS WITH CONICAL ROOF UNDER WIND

Aldana M. Muñoz<sup>a</sup>, Rossana C. Jaca<sup>a</sup>, Sergio Bramardi<sup>a</sup> y Luis A. Godoy<sup>b</sup>

<sup>a</sup> FAIN y FAE, UNComahue, 8300 Neuquén, Argentina, [aldanamacarenamunoz@gmail.com](mailto:aldanamacarenamunoz@gmail.com),  
[rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar](mailto:rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar), [sbramardi@gmail.com](mailto:sbramardi@gmail.com)

<sup>b</sup> IDIT, CONICET y FCEFyN, UNCórdoba, 5000 Córdoba, Argentina, [luis.godoy@unc.edu.ar](mailto:luis.godoy@unc.edu.ar)

**Palabras clave:** Fragilidad, tanques, elementos finitos, pandeo, daño, viento.

**Resumen.** Los tanques de almacenamiento de petróleo son parte de la infraestructura de la industria petrolera, en la que se producen accidentes con importantes daños. Una estrategia para valorar el riesgo es mediante estudios de vulnerabilidad ante una cierta amenaza. El objetivo de este trabajo es obtener curvas de fragilidad de tanques de almacenamiento de petróleo con techo cónico calculando la probabilidad de alcanzar o exceder un cierto nivel de daño bajo viento. Se analizan tanques metálicos con relación altura-diámetro varía entre 0.24 y 1.2. Como amenaza se considera el viento y se evalúa la respuesta estructural por simulaciones computacionales con modelos de elementos finitos, desde un nivel sin daño hasta el daño total por plasticidad. Para cada tanque se realiza un análisis de bifurcación lineal (LBA) para evaluar las cargas críticas y modos críticos. Mediante un análisis de rigidez reducida se determinan los niveles inferiores de daño y como estado último, colapso por fluencia mediante un análisis lineal geométrico (LA) incluyendo plasticidad (MNA) calculando las tensiones de von Mises. Las curvas de fragilidad se construyen en base a una distribución log-normal. Los resultados indican que los tanques ubicados en las cuencas petrolíferas del país son sensibles a sufrir daños por pandeo, aunque con baja probabilidad.

**Keywords:** Fragility, tanks, finite element analysis, buckling, damage, wind.

**Abstract.** Oil storage tanks are part of the oil industry infrastructure, which accidents with significant damage occur. One strategy to assess risk is through studies of vulnerability to a certain threat. The objective of this work is to obtain fragility curves for petroleum storage tanks with a conical roof, computing the probability of reaching or exceeding a certain level of damage under wind. Metal tanks with height-diameter ratio between 0.24 and 1.2 are analyzed. Wind is considered as a threat and the structural response is evaluated by computational simulations with finite element models, from a state without damage to total damage for plasticity. For each tank a linear bifurcation analysis (LBA) is performed to evaluate the buckling loads and critical modes. By a reduced stiffness analysis, the lower levels of damage are determined and, as an ultimate state, collapse load based through a geometric linear analysis (LA) including plasticity (MNA) computing von Mises stresses. Fragility curves are constructed based on a log-normal distribution. The results indicate that the tanks located in the country's oil basins are sensitive to buckling damage, although with low probability.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los tanques metálicos de almacenamiento de fluidos son componentes importantes en la industria petroquímica, tanto en refinерías como en zonas de producción. En la región patagónica, se encuentran las cuencas petrolíferas más grandes del país, y donde se suelen registrar las mayores velocidades de viento. Las consecuencias estructurales son de naturaleza súbita, disparadas en general por el pandeo de la cáscara cilíndrica que forma el tanque. También, se han encontrado daños asociados a los componentes del tanque, como el desprendimiento de la capa aislante.

En la actualidad, las metodologías de estimación de riesgos para diferentes estructuras se basan en la construcción de curvas de fragilidad. La vulnerabilidad se define como la probabilidad de pérdidas, ya sean sociales, económicas o ambientales, para un nivel dado de carga; mientras que las funciones de fragilidad proveen información acerca de la probabilidad de exceder distintos estados límites para un determinado nivel de carga. En la bibliografía se pueden encontrar trabajos en los que se han desarrollado curvas de fragilidad considerando la acción sísmica (O'Rourke y So, 2008), basado en observaciones post desastre de más de 400 tanques y 9 terremotos distintos. Razzaghi y Eshghi (2008) desarrollaron curvas de fragilidad para tanques con techo cónico, realizando simulaciones numéricas, y comparando los resultados con los que brinda HAZUS (FEMA,2000) y las curvas obtenidas por O'Rourke y So.

El objetivo de este trabajo es estimar los riesgos asociados a la acción del viento en tanques de almacenamiento con techo cónico mediante la construcción de curvas de fragilidad, para evaluar la probabilidad de alcanzar un determinado nivel de daño considerando el viento como demanda, utilizando la velocidad del viento para cuantificar los daños. La evaluación de los diferentes niveles de daño se desarrolla en forma numérica mediante modelación por elementos finitos y las metodologías disponibles para el estudio de inestabilidad del equilibrio.

## 2 GEOMETRÍAS DE TANQUES BAJO ESTUDIO

En este trabajo se estudian tanques metálicos de almacenamiento de petróleo de pared delgada con techo cónico fijo, diseñados según la Norma API 650 (2013). Se eligieron 33 (treinta y tres) geometrías distintas, clasificadas según su diámetro en once grupos, y para cada diámetro se consideraron distintas alturas.

En la Tabla 1 se muestran las geometrías seleccionadas para este trabajo. Se eligieron diámetros entre 10m y 40m con alturas entre 5m a 29m, barriendo así un espectro de relaciones altura/diámetro (H/D) desde 0.24 a 1.18. En la tabla se diferencian y agrupan por color de fila los tanques de igual diámetro. La designación de los tanques indica su diámetro y altura, expresados en metros. En la última fila se indica la relación de aspecto de cada tanque.

N°	Designación	N° virolas	Diámetro D [m]	Altura H [m]	Relación H/D	N°	Designación	N° virolas	Diámetro D [m]	Altura H [m]	Relación H/D
1	TK-10/5	2	10.00	5.00	0.50	17	TK-20/17.5	7	20.00	17.50	0.88
2	TK-10/7.5	3	10.00	7.50	0.75	18	TK-24/7.3	3	24.38	7.314	0.30
3	TK-10.3/12.2	5	10.30	12.19	1.18	19	TK-24/9.8	4	24.38	9.752	0.40
4	TK-12.3/8.8	4	12.30	8.80	0.72	20	TK-24/12.2	5	24.38	12.190	0.50
5	TK-14.6/12.2	5	14.60	12.19	0.83	21	TK-24/17.1	7	24.38	17.066	0.70
6	TK-15/5	2	15.00	5.00	0.33	22	TK-24/21.9	9	24.38	21.942	0.90
7	TK-15/7.5	3	15.00	7.50	0.50	23	TK-30/7.3	3	30.48	7.314	0.24
8	TK-15/10	4	15.00	10.00	0.67	24	TK-30/12.2	5	30.48	12.190	0.40
9	TK-15/12.5	5	15.00	12.50	0.83	25	TK-30/17.1	7	30.48	17.066	0.56
10	TK-18/10	4	18.00	10.00	0.56	26	TK-30/24.4	10	30.48	24.380	0.80
11	TK-18/12.5	5	18.00	12.50	0.69	27	TK-30/29.3	12	30.48	29.256	0.96
12	TK-18/15	6	18.00	15.00	0.83	28	TK-35/12.5	5	35.00	12.50	0.36
13	TK-18/17.5	7	18.00	17.50	0.97	29	TK-35/17.5	7	35.00	17.50	0.50
14	TK-20/7.5	3	20.00	7.50	0.38	30	TK-35/22.5	9	35.00	22.50	0.64
15	TK-20/10	4	20.00	10.00	0.50	31	TK-40/10	4	40.00	10.00	0.25
16	TK-20/15	6	20.00	15.00	0.75	32	TK-40/17.5	7	40.00	17.50	0.44
						33	TK-40/20	8	40.00	20.00	0.50

Tabla 1: Geometrías de tanques en estudio.

Los tanques con diámetro de 10.30m, 14.60m, 24.38m y 30.48m se suponen construidos con virolas de 2.438m de alto, mientras que el resto de los tanques se consideran con virolas de 2.50m de altura. La parte cilíndrica de los tanques se considera de espesor variable, con valores escalonados que aumentan gradualmente desde la parte superior a la base. Se adoptan espesores comerciales, una vez calculados los espesores mínimos según el Método de 1 Pie de la Norma [API 650 \(2013\)](#). La Figura 1 muestra algunas de las geometrías de tanques estudiadas.

El material considerado es un acero A36, cuyos parámetros mecánicos son un módulo de elasticidad  $E = 206\text{GPa}$  y módulo de Poisson  $\mu = 0.30$ .

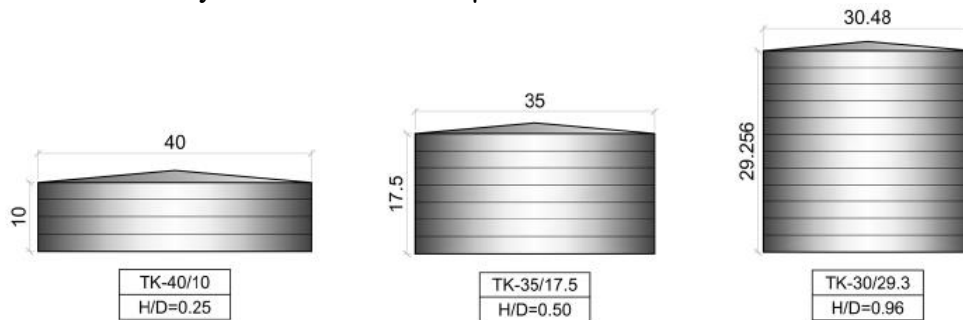


Figura 1: Algunas geometrías de tanques en estudio, nomenclatura de Tabla 1.

### 3 CARGAS DE VIENTO

La distribución de presiones de viento sobre la pared cilíndrica del tanque corresponde a la recomendación [ACI-ASCE \(1991\)](#), que expresa la variación circunferencial mediante una serie de Fourier de cosenos (Figura 2a):

$$q = \lambda \sum_n^i C_i \cos(i\theta) \tag{1}$$

donde  $\lambda$  es el factor amplificador,  $\theta$  es el ángulo medido desde la dirección de incidencia del viento y los coeficientes  $C_i$  representan el aporte de cada término de la serie, siendo  $C_0 = 0.2765$ ,  $C_1 = -0.3419$ ,  $C_2 = -0.5418$ ,  $C_3 = -0.3872$ ,  $C_4 = -0.0525$ ,  $C_5 = 0.0771$ ,  $C_6 = 0.0039$  y  $C_7 = -0.0341$ . La distribución en altura se asume constante. Las presiones sobre la cubierta del tanque corresponden a los ensayos de túnel de viento ejecutados por [MacDonald et al. \(1986\)](#). En la Figura 2b se muestra la distribución de presiones adoptada en el techo cónico.

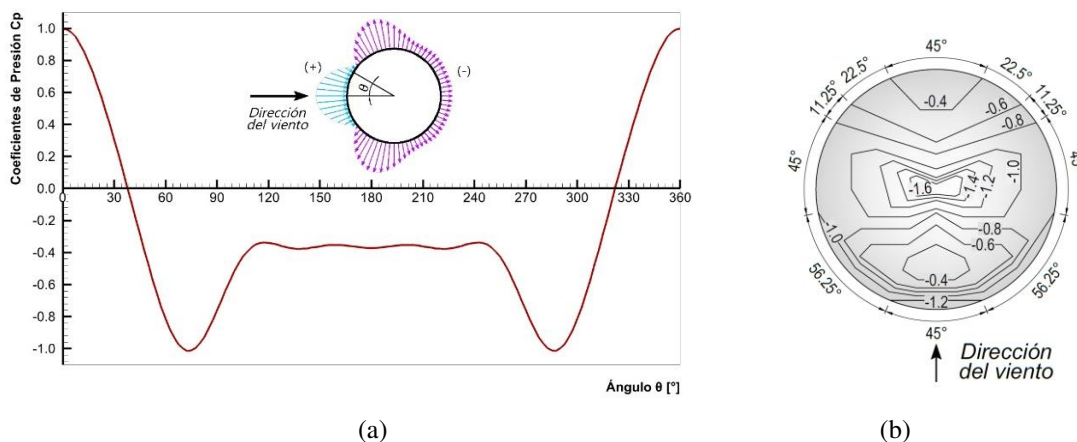


Figura 2: Distribución de coeficientes de presión, (a) pared (b) cubierta.

Para la obtención de las curvas de fragilidad es necesario vincular las presiones de viento, representadas por los autovalores críticos, a la velocidad de viento. Para ello se utiliza la expresión de la presión dinámica que brinda el Reglamento [CIRSOC 102 \(2005\)](#):

$$q_z = 0.613 K_{zt} K_d V^2 I \Rightarrow V = \sqrt{\frac{q_z}{0.613 K_{zt} K_d I}} \quad (2)$$

donde  $I$  es el factor de importancia ( $I = 1.15$ ) para instalaciones petroquímicas);  $K_{zt}$  es el factor topográfico ( $K_{zt} = 1.00$  para terrenos llanos) y  $K_d$  es el factor de direccionalidad ( $K_d = 0.95$  para tanques). El coeficiente de exposición para la presión dinámica  $K_z$  depende de la altura sobre el nivel del terreno, y se obtiene calculando el promedio de los coeficientes en cada virola.

#### 4 CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad son una herramienta estadística que representan la probabilidad de exceder un nivel determinado de daño en función de un parámetro de demanda que caracteriza la amenaza. En [Pitilakis et al. \(2014\)](#) se indica que las curvas de fragilidad se describen usualmente mediante una función de distribución de probabilidad lognormal, aunque no siempre puede ser la que mejor se ajuste.

Según [Devore \(2008\)](#), una variable no negativa  $X$  tiene una distribución lognormal si la variable aleatoria  $Y = \ln(X)$  tiene una distribución normal. La función de densidad de probabilidad resultante de una variable aleatoria lognormal cuando el  $\ln(X)$  está normalmente distribuido con parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  es

$$f_{(x^i)} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{x} e^{\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]} & \text{para } x > 0 \\ 0 & \text{para } x \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

donde la media  $\mu$  y desvío estándar  $\sigma$  corresponden a la variable  $\ln(X)$ .

La función de distribución acumulada de la variable  $X$  se puede expresar en términos de la función de distribución acumulada  $\Phi(z)$  de una variable aleatoria normal estándar  $Z$ :

$$\begin{aligned} F(x; \mu, \sigma) &= P(X \leq x) = P(\ln(X) \leq \ln(x)) \\ &= P\left(Z \leq \frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right), \quad x > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Se realiza una curva para cada nivel de daño definido. La variable en estudio es la velocidad de viento de falla ( $V$ ) asociada a cada nivel de daño.

#### 5 NIVELES DE DAÑO

En el análisis de riesgo se deben definir los niveles de desempeño de la estructura mediante umbrales de daño llamados estados límites. Un estado límite divide dos condiciones de daño diferentes que se suelen llamar niveles de daño. Un daño en la estructura puede manifestarse como ([Godoy, 2020](#)): deformaciones elásticas o plásticas que producen desviaciones con respecto a la geometría de diseño; aparición o extensión de fisuras; generación de plasticidad localizada o extendida en el material; colapso de una estructura como caso extremo de daño.

Para este trabajo se definen cuatro niveles de daño, tres de ellos corresponden a los Estados Límites Últimos propuestos por el [Eurocódigo 3-1-6 \(2007\)](#). Estos estados son Pandeo y Límite Plástico, y para el primero de ellos se consideraron dos estados de daño: uno correspondiente a un pandeo global de la pared del tanque a barlovento (DS1); y otro nivel de pandeo localizado en la unión entre la pared del tanque y la cubierta (DS2). El nivel de daño DS3 se define en función de la tensión de von Mises para evaluar el estado límite plástico. Adicionalmente, se considera un estado límite sin daño, teniendo en cuenta la Teoría de Límites Inferiores para

pandeo (DS0). La Tabla 2 muestra los niveles de daño que se estudiarán para construir las curvas de fragilidad para tanques de almacenamiento con techo cónico.

Estados de daño	Descripción
DS0	Sin Daño
DS1	Pandeo en la pared del tanque
DS2	Pandeo en la unión pared-cubierta del tanque
DS4	Fluencia en la pared o cubierta del tanque

Tabla 2: Estados de daño bajo viento para tanques con techo cónico.

## 6 EVALUACIÓN NUMÉRICA

Cada geometría de tanque se analiza numéricamente mediante un modelo de elementos finitos con el código de propósitos generales [ABAQUS \(2013\)](#). El mallado se realiza con elementos rectangulares (S8R5) para la pared cilíndrica del tanque, y con elementos triangulares (STR165) para la cubierta, ambos de orden cuadrático con integración reducida. El tamaño de los elementos sobre la pared cilíndrica varía de 15cm a 25cm según el diámetro del tanque.

Las condiciones de borde aplicadas son apoyos fijos (desplazamientos nulos:  $U_1=U_2=U_3=0$ ) en los nodos inferiores de la pared. Los tanques se consideran sin líquido en su interior por tratarse de la condición más desfavorable.

Se realizan dos tipos diferentes de análisis: para los niveles de daño de pandeo, se realiza un Análisis de Bifurcación Lineal (LBA) para obtener los autovalores y autovectores críticos; y para el nivel de daño plástico, se realiza un Análisis Lineal Elástico (LA). En la Figura 3a se muestra la deformada del primer modo de pandeo, asociado al nivel de daño DS1, y la Figura 3b corresponde al pandeo localizado en la unión pared-cubierta (DS2). Las cargas críticas  $\lambda_c$  obtenidas por LBA se traducen a las velocidades de viento de falla a partir de la Ec.(2).

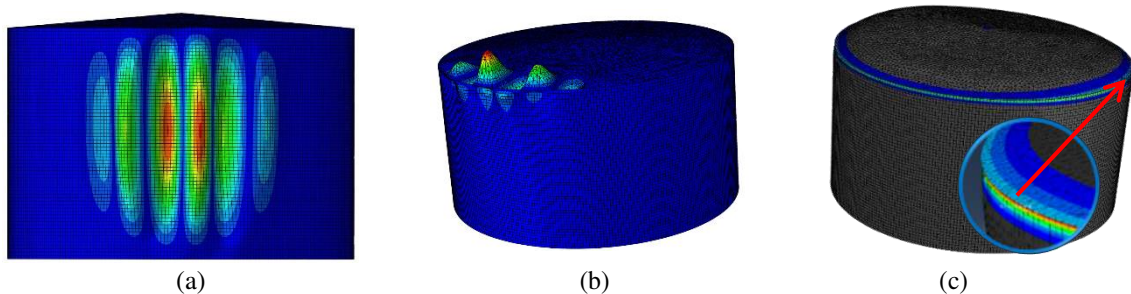


Figura 3: Estados de daño, (a) DS1 para el tanque TK-15/10 (b) DS2 para el tanque TK-10/5, (c) DS3 para el tanque TK-15/7.5.

El análisis LBA no tiene en cuenta la sensibilidad del pandeo elástico ante imperfecciones geométricas iniciales. El estado límite DS0 se obtiene de forma indirecta en base a investigaciones previas, como el 50 % del valor obtenido por LBA,  $\lambda_{DS0} = 0.50 \lambda_{DS1}$ , que resulta el límite inferior de cargas de pandeo si se desprecia la resistencia membranal en el estado crítico en base al Método de Rigidez Reducida (Jaca, 2008).

El nivel de daño DS3 se define como aquel que produce tensiones superiores al límite de fluencia. Las deformaciones plásticas, a diferencia de aquellas que se producen en el rango elástico, son permanentes y pueden traer asociadas problemas funcionales en los tanques. Para calcular las cargas de falla, en base al método MNA/LBA se obtienen las tensiones de Von Mises. Se calcula el factor de amplificación de carga plástica  $\lambda_{plast} = F_y / \sigma_{V, M}$ , siendo  $F_y$  la tensión de fluencia ( $F_y = 235$  MPa) y  $\sigma_{V, M}$  la tensión de Von Mises que indica fluencia en al

menos dos de los elementos superiores del modelo de cada tanque (Figura 3c).

La Tabla 3 muestra las velocidades correspondientes a cada nivel de daño.

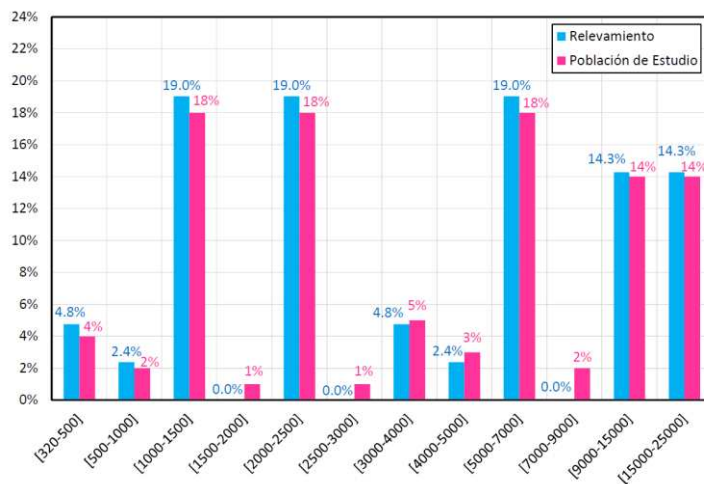
N°	Designación	$V_{DS0}$ [km/h]	$V_{DS1}$ [km/h]	$V_{DS2}$ [km/h]	$V_{DS3}$ [km/h]
1	TK-10/5	450	636	661	721
2	TK-10/7.5	368	521	630	842
3	TK-10.3/12.2	282	399	684	777
4	TK-12.3/8.8	287	406	566	725
5	TK-14.6/12.2	213	302	431	596
6	TK-15/5	324	458	462	636
7	TK-15/7.5	264	374	443	615
8	TK-15/10	228	322	426	599
9	TK-15/12.5	206	291	414	584
10	TK-18/10	201	284	336	523
11	TK-18/12.5	177	251	325	510
12	TK-18/15	179	253	318	500
13	TK-18/17.5	175	247	325	434
14	TK-20/7.5	209	296	302	509
15	TK-20/10	184	261	292	496
16	TK-20/15	164	232	277	472
17	TK-20/17.5	159	225	271	464

N°	Designación	$V_{DS0}$ [km/h]	$V_{DS1}$ [km/h]	$V_{DS2}$ [km/h]	$V_{DS3}$ [km/h]
18	TK-24/7.3	190	268	349	616
19	TK-24/9.8	175	248	350	596
20	TK-24/12.2	168	237	348	581
21	TK-24/17.1	160	226	330	521
22	TK-24/21.9	154	218	315	499
23	TK-30/7.3	159	225	261	488
24	TK-30/12.2	144	203	259	464
25	TK-30/17.1	139	196	254	436
26	TK-30/24.4	133	189	240	421
27	TK-30/29.3	130	184	232	409
28	TK-35/12.5	156	220	238	457
29	TK-35/17.5	150	212	242	460
30	TK-35/22.5	146	206	236	448
31	TK-40/10	191	270	301	474
32	TK-40/17.5	174	246	288	451
33	TK-40/20	171	242	284	442

Tabla 3 Velocidades de viento en [km/h] para estados de daño DS0, DS1, DS2 y DS3.

### 7 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA DAÑOS DS0, DS1, DS2 Y DS3

Observando alguna de las baterías o refinерías del país se puede concluir que una misma geometría de tanque se puede repetir dentro de una misma instalación. Con el fin de contar con un mayor número de tanques para la construcción de las curvas de fragilidad, se simula una población de 100 tanques, tomando como referencia la distribución de los volúmenes nominales de un relevamiento de Rincón de los Sauces (RDLS) mostrado en [Jaca \(2008\)](#).



N°	Tanque	Cantidad	N°	Tanque	Cantidad
1	TK-10/5	4	18	TK-24/7.3	1
2	TK-10/7.5	1	19	TK-24/9.8	1
3	TK-10.3/12.2	4	20	TK-24/12.2	7
4	TK-12.3/8.8	12	21	TK-24/17.1	1
5	TK-14.6/12.2	4	22	TK-24/21.9	5
6	TK-15/5	1	23	TK-30/7.3	4
7	TK-15/7.5	2	24	TK-30/12.2	1
8	TK-15/10	1	25	TK-30/17.1	5
9	TK-15/12.5	11	26	TK-30/24.4	1
10	TK-18/10	1	27	TK-30/29.3	3
11	TK-18/12.5	2	28	TK-35/12.5	3
12	TK-18/15	1	29	TK-35/17.5	2
13	TK-18/17.5	1	30	TK-35/22.5	2
14	TK-20/7.5	3	31	TK-40/10	1
15	TK-20/10	1	32	TK-40/17.5	3
16	TK-20/15	1	33	TK-40/20	3
17	TK-20/17.5	7			

(a)

(b)

Figura 4: (a) Comparación entre la distribución de los tanques del relevamiento (RDLS) y la población de estudio, en función del volumen de almacenamiento en m³, (b) Población de tanques simulada.

Para determinar las cantidades en que se repiten las 33 tipologías de tanques presentadas en el punto 2 en la población de estudio, se consideraron dos objetivos: por un lado, tratar de igualar las distribuciones de tanques en función al volumen geométrico entre la población de estudio (N=100) y la población de tanques del relevamiento (N=42); y en segundo lugar, darle mayor participación a aquellos tanques que fueron tomados del relevamiento y también a los

modelos que guardan mayor similitud geométrica con los tanques presentes en RDLS. En la Figura 4(a) se muestra una comparación entre ambas poblaciones de tanques y en Figura 4(b) se indica la cantidad de veces que es considerada cada geometría de tanque. Para la construcción de las curvas de fragilidad, se numera del 1 al 100, identificándose este valor como ID, cada tanque de la población.

Para obtener las curvas de fragilidad asociadas a cada nivel de daño, se tomaron muestras aleatorias con reposición de tamaño  $n = 30$ . Se elige este número por tratarse del mínimo valor utilizado normalmente en el campo de la estadística para describir una población mediante una muestra representativa. Como la muestra aleatoria se realiza con reposición, pueden aparecer tanques repetidos dentro de una misma muestra. Se consideraron cinco muestras aleatorias diferentes y para cada tanque de la muestra se registraron las velocidades de viento para cada nivel de daño asociadas, expresadas en km/h.

El próximo paso fue, para una determinada muestra y nivel de daño  $DS_i$  construir la tabla de frecuencias donde se indican las velocidades de viento observadas  $x_i$ , su logaritmo natural  $\ln(x_i)$ , frecuencias observadas  $f_i$ , frecuencias acumuladas  $F_i$ , frecuencias relativas observadas  $h_i$  y frecuencias relativas acumuladas  $H_i$ . Se adicionan dos columnas auxiliares para el cálculo de la media aritmética de  $\ln(x_i)$  y su desvío estándar muestral.

<i>n</i>	ID	DS0	DS1	DS2	DS3	<i>n</i>	ID	DS0	DS1	DS2	DS3
1	6	282	399	684	777	17	82	139	196	254	436
2	47	209	296	302	509	18	29	228	322	426	599
3	19	287	406	566	725	19	51	159	225	271	464
4	67	160	226	330	521	20	58	190	268	349	616
5	23	213	302	431	596	21	18	287	406	566	725
6	59	175	248	350	596	22	74	159	225	261	488
7	67	160	226	330	521	23	92	146	206	236	448
8	100	171	242	284	442	24	40	206	291	414	584
9	36	206	291	414	584	25	91	150	212	242	460
10	93	146	206	236	448	26	65	168	237	348	581
11	12	287	406	566	725	27	20	287	406	566	725
12	31	206	291	414	584	28	56	159	225	271	464
13	85	130	184	232	409	29	5	368	521	630	842
14	22	213	302	431	596	30	83	133	189	240	421
15	39	206	291	414	584						
16	93	146	206	236	448						

Tabla 4: Muestra 1 con velocidades de viento en [km/h] para DS0, DS1, DS2 y DS3.

$x_i$	$\ln(x_i)$	$f_i$	$F_i$	$h_i$	$H_i$	$\ln(x_i) \cdot f_i$	$\ln(x_i)^2 \cdot f_i$
130	4.87	1	1	0.03	0.03	4.87	23.69
133	4.89	1	2	0.03	0.07	4.89	23.92
139	4.93	1	3	0.03	0.10	4.93	24.35
146	4.98	3	6	0.10	0.20	14.95	74.51
150	5.01	1	7	0.03	0.23	5.01	25.11
159	5.07	3	10	0.10	0.33	15.21	77.08
160	5.08	2	12	0.07	0.40	10.15	51.51
168	5.12	1	13	0.03	0.43	5.12	26.26
171	5.14	1	14	0.03	0.47	5.14	26.44
175	5.16	1	15	0.03	0.50	5.16	26.68
190	5.25	1	16	0.03	0.53	5.25	27.53
206	5.33	4	20	0.13	0.67	21.31	113.55
209	5.34	1	21	0.03	0.70	5.34	28.54
213	5.36	2	23	0.07	0.77	10.72	57.49
228	5.43	1	24	0.03	0.80	5.43	29.48
282	5.64	1	25	0.03	0.83	5.64	31.83
287	5.66	4	29	0.13	0.97	22.64	128.12
368	5.91	1	30	0.03	1.00	5.91	34.91
	$\Sigma$					157.68	830.97

Tabla 5: Tabla de Frecuencias de la Muestra 1 para el Nivel de Daño DS0.

A modo de ejemplo se presenta en la Tabla 4 la Muestra 1 y las velocidades halladas para sus correspondientes niveles de daño DSi. En la Tabla 5, se muestra la tabla de frecuencias para el nivel de daño DS0. Por último, se encuentra la curva de fragilidad calculando la probabilidad acumulada en base a la Ec. (4) para la función de distribución log-normal ( $\Phi$ ), con la media y desvío estándar de  $\ln(x_i)$  de la muestra como estimadores de sus dos parámetros:  $\mu$  y  $\sigma$ .

En la Figura 5a se muestra el gráfico de barras de la frecuencia relativa acumulada, que representa los datos observados, y la curva lognormal esperada para el daño DS0 en base a la Muestra 1, evaluados con el Software *Statistica* junto los parámetros media y desvío. Repitiendo este procedimiento para cada nivel de daño DSi se obtienen curvas representativas para la Muestra 1. La Figura 5b presenta la curva correspondiente a DS1.

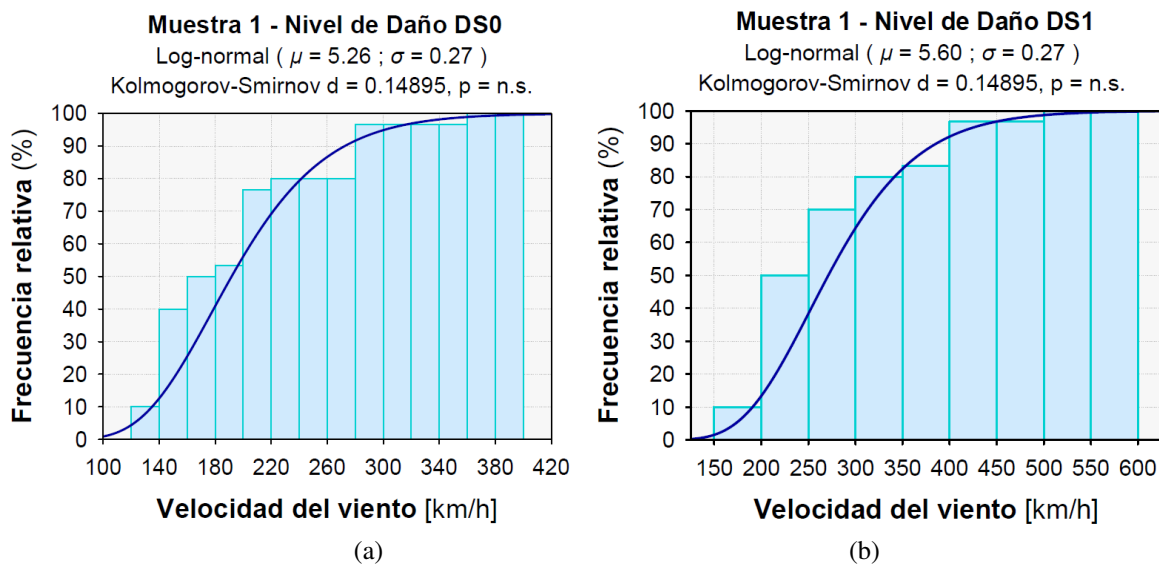


Figura 5: Frecuencia relativa acumulada (Muestra 1) y distribución lognormal, (a) DS0, (b) DS1.

A partir de las 5 muestras analizadas de tanques se obtienen, para cada nivel de daño, las estimaciones de  $\mu$  y  $\sigma$ , que definen la función lognormal que representa las curvas de cada nivel. Estas 5 estimaciones fueron promediadas construyéndose las curvas de fragilidad DSi medias que se muestran en la Figura 6.

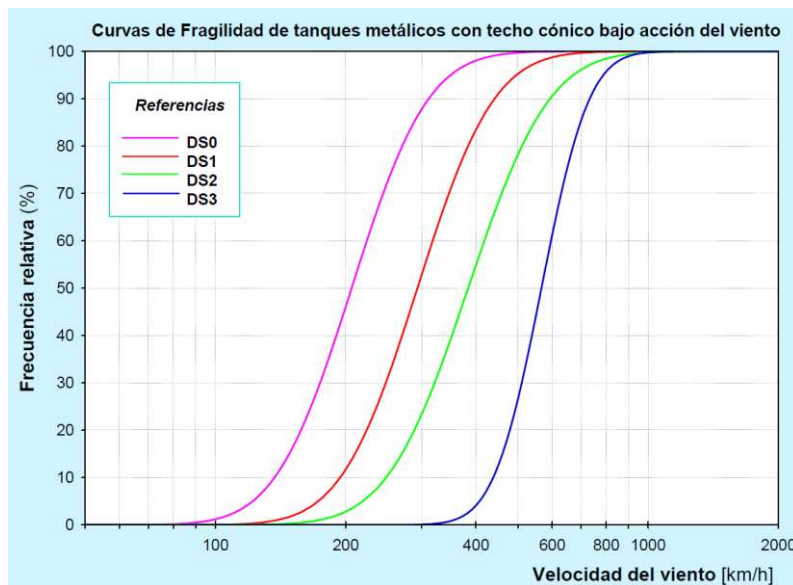


Figura 6: Curvas de fragilidad de tanques metálicos con techo cónico bajo acción del viento



La justificación del uso de un comportamiento medio se hizo mediante un análisis de varianza (ANOVA), donde se probó que las estimaciones de ambos parámetros en las distintas muestras no presentaban diferencias significativas. Por otro lado, se verificó mediante una prueba de bondad de ajuste, de Kolmogorov, para evaluar si las distribuciones analizadas realmente corresponden a una distribución lognormal. En la Figura 5 se muestra el p-valor indicando que no existe evidencia suficiente (n.s.) para afirmar que las frecuencias acumuladas de la velocidad de viento de falla para cada nivel de daño no se distribuye log-normal, pudiéndose asumir por lo tanto que la variable aleatoria bajo estudio es lognormal.

## 7.1 Discusión de resultados

Considerando las curvas de fragilidad para los niveles de daño halladas, es posible hacer una evaluación en función de las velocidades de viento que se presentan en el mapa de velocidad básica de viento disponible en CIRSOC 102 (2005) para las cuencas petrolíferas Neuquina (151.2 a 172.8 km/h) y del Golfo San Jorge (187.2 a 237.6 km/h) (Figura 7). Se puede apreciar que:

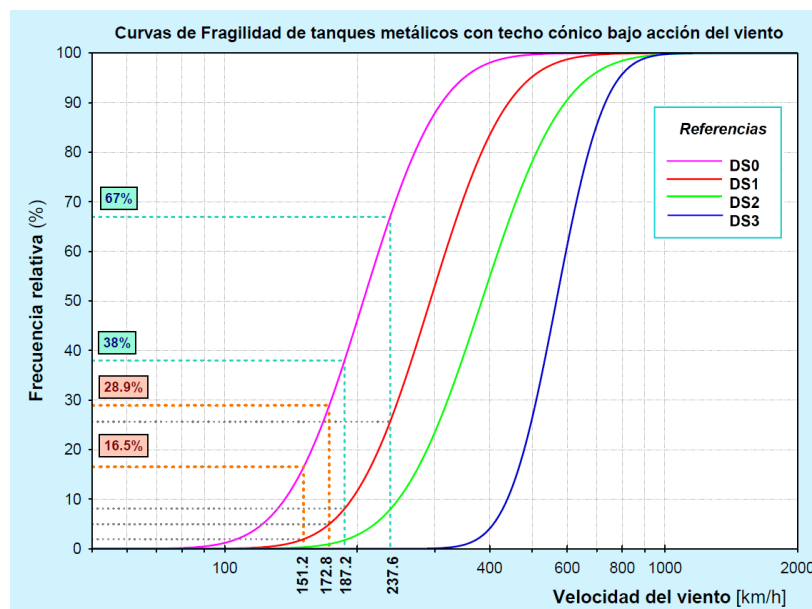


Figura 7: Aplicación de curvas de fragilidad para tanques de techo cónico bajo viento a regiones productivas de petróleo en Argentina

- Hay posibilidad de daño en estos tipos de tanques para velocidades de viento mayores a 80km/h y dado que el mapa de velocidades indica valores mayores a 130km/h se concluye que es esperable algún tipo de daño en esta tipología de tanques.
- Para la cuenca Neuquina con velocidades entre 151.2km/h y 172.80km/h, existe una probabilidad entre 16.5% y 28.9% que se produzcan daños de tipo DS0. Para el nivel de daño DS1, la probabilidad acumulada es del 5% y para DS2 es muy baja, inferior al 1%.
- Para la cuenca del Golfo San Jorge, existe una probabilidad acumulada de daño DS0 que varía entre el 38% y el 67%. El daño DS1 podría presentarse con una probabilidad de hasta un 25.6%. y podrían esperarse daños DS2 con una probabilidad de hasta un 7.9 %.
- El daño DS3 requiere velocidades muy altas que podrían asociarse a huracanes o imposibles de producirse.

## 8 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se plantea un análisis numérico de niveles de riesgo asociados a

daños y fallas en tanques cilíndricos de acero con techo cónico, destinados al almacenamiento y producción de petróleo, frente a la acción de cargas de viento. Se analizan en forma aislada 33 geometrías de tanques y posteriormente se simula una población de 100 tanques a partir de estas geometrías. Los daños se obtienen por simulación numérica mediante LBA y MNA/LA. Para las curvas de fragilidad se usa una distribución acumulada lognormal.

Estas funciones permiten evaluar la probabilidad de falla para rangos de velocidades en la región patagónica, donde están las cuencas sedimentarias productivas de mayores reservas.

Los resultados indican que para velocidades de viento mayores a 80km/h podrían presentarse daños, que son valores esperables en nuestro país. Los daños asociados por pandeo son los que pueden producirse con mayor frecuencia, para velocidades de hasta 240km/h considerando el límite de las máximas ráfagas de viento de diseño para la región patagónica. Al tener en cuenta la geometría de la cáscara sin imperfecciones, los daños por pandeo en la cáscara cilíndrica aparecen para velocidades mayores a 130 km/h, y los daños de pandeo localizado pueden presentarse para velocidades de viento mayores a 160 km/h. La probabilidad de que ocurran daños por plasticidad para los tanques analizados es nula para las velocidades de viento máximas del país. Tendrían que producirse ráfagas de viento de velocidades mayores a 410km/h para alcanzar un 5 % de probabilidad de que se presente este tipo de daño.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen el financiamiento de PICTO Fundación YPF 2022.

## REFERENCIAS

- ABAQUS, Abaqus/CAE User's Manual, Versión 6.13-1, 2013.
- ACI-ASCE Committee 334 2R-91, Reinforced Concrete Cooling Tower Shells -Practice and Commentary, American Concrete Institute, New York, 1991.
- API Standard 650, Welded Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute, Washington, D.C., Twelfth Edition, 2013.
- CIRSOC 102, Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones, CIRSOC, Buenos Aires, 2005.
- Devore, J.L., *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*, Editorial CENGAGE Learning, Séptima Edición, México, 2008.
- EN 1993-1-6, Eurocode 3- Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, European Committee for Standardization, 2007.
- FEMA-NIBS, Earthquake Loss Estimation Methodology, Federal Emergency Management (FEMA) & National Institute of Building Sciences (NIBS), Washington D.C., USA, 1999.
- Godoy, L.A., Fragilidad de la infraestructura para el almacenamiento de petróleo y sus derivados, Informe Técnico, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba, 2020.
- Jaca, R.C., Límites Inferiores en Inestabilidad de Láminas de Tanques de Pared Delgada, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Nacional de Córdoba, 2008.
- MacDonald, P.A., Kwok, K.C.S., y Holmes, J.H., Wind loads on circular storage bins, silos and tanks. Point pressure measurements on isolated structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31:165-188, 1988.
- O'Rourke, M.J. y So, P., Seismic Fragility Curves for On-Grade Steel tanks. *Earthquake Spectra*, 16(4): 801-815, 2000.
- Pitilakis, K., Crowley, H. and Kaynia, A.M., *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*, Ed. Springer, 2014.
- Razzaghi, M.S. and Eshghi, S., Development of Analytical Fragility Curves for Cylindrical Steel Oil Tanks, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.