

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería - 2021

Tomo I. Compilación.

- | Agrimensura, geodesia y ciencias de la tierra y el mar
- | Desarrollo tecnológico social. Vinculación universidad, empresa y estado
- | Ejercicio profesional de la ingeniería
- | Innovación y emprendedorismo en ingeniería
- | Empresas y servicios de ingeniería
- | Ingeniería forense
- | Forestal, agronomía y alimentos
- | La ingeniería y el COVID-19
- | Obras y proyectos de ingeniería
- | Tecnología de la información y comunicación
- | Ferroviaria, automotriz, naval y transporte



Editores: Luis Fernández Luco | Cristina Vázquez | Alejandra Acuña Villalobos | Guillermo Lombera | Roberto Giordano Lerena

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería: 2021 : tomo I / compilación de Luis Fernandez Luco ... [et al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Luis Fernandez Luco, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga.

ISBN 978-987-88-7243-8

Obra Completa 978-987-88-7180-6

1. Ingeniería. I. Fernandez Luco, Luis, comp. II. Título.

CDD 620.00982

ISBN 978-987-88-7243-8



9 789878 872438

Criterios para el análisis de cargas aerodinámicas en el caso de un tanque de agua cilíndrico

Alvarez y Alvarez, G. M. ^a; Díaz, J. A. ^a; Simon, L. ^a; Wittwer, A. R ^a; Adotti M. I. ^a; Tononi, O. E. ^a;

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste.
giselaalvarezyalvarez@yahoo.com.ar

Resumen

El Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones CIRSOC 102, por un lado, indica la distribución de coeficientes de carga en torno a cuerpos de forma cilíndrica en general y, por otro lado, establece la metodología y condiciones para utilizar coeficientes obtenidos experimentalmente en túnel de viento.

El caso particular de un tanque de agua cilíndrico con secciones variables no está específicamente contemplado en el Reglamento. En el Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad Nacional del Nordeste se realizaron ensayos en el túnel de viento para establecer los coeficientes locales de carga aerodinámica sobre cilindros cortos verticales contemplando las condiciones establecidas por el Reglamento para modelos de estructuras civiles.

En este trabajo, a partir de estos resultados, se establecen criterios para la aplicación de los coeficientes medidos al cálculo de las fuerzas aerodinámicas provocadas por el viento sobre un tanque de agua que está siendo construido en la localidad de Las Breñas, al suroeste de la Provincia del Chaco. Finalmente, se realiza una comparación de los resultados que se obtienen usando los valores experimentales y los valores establecidos por el Reglamento CIRSOC 102 y la Norma Brasileña NBR 6123.

Abstract

The Argentine Wind Code on Constructions CIRSOC 102 indicates the distribution of load coefficients around cylindrical bodies in general, and also, establishes the methodology and conditions to use coefficients obtained experimentally in a wind tunnel.

The particular case of a cylindrical water tank with variable sections is not specifically considered in the Code. In the Universidad Nacional del Nordeste Aerodynamics Laboratory tests were made to establish the aerodynamic local load coefficients on short cylinders considering the conditions established by the Argentinian Wind Code.

Based on these results, in this work, criteria for the application of this measured coefficients to the calculation of aerodynamic forces caused by the wind on a water tank, which is being built in the city of Las Breñas, in the southwest of the Province of Chaco are established. Finally, a comparison of the results obtained using the experimental values and the ones established by the CIRSOC 102 Code and the Brazilian NBR 6123 Code is made.

Palabras clave: túnel de viento, coeficientes aerodinámicos, estructuras cilíndricas.

INTRODUCCIÓN

Los tanques elevados de agua se emplean para garantizar una presión determinada en una red de distribución en ciudades o en instalaciones industriales, por ello requieren de una altura apropiada para proporcionar un servicio adecuado.

Los tanques están formados por dos partes; la cuba y la estructura soporte. Para la estructura soporte suelen emplearse; columnas reticuladas, para reservorios pequeños o medianos, y fustes

cilíndricos en reservorios de mayor capacidad de almacenamiento.

Dependiendo de su necesidad operativa los techos de los tanques pueden ser planos, cónicos o abovedados, y pueden disponerse de manera aislada o en grupo.

Los tanques pueden tener variadas dimensiones, los más pequeños por lo general, no presentan problemas estructurales significativos lo cuales aumentan con las dimensiones del tanque.

La forma del fuste y de la cuba, también es variable, con un predominio por las formas cilíndricas.

Existen dos fallas que son comunes en estructuras cilíndricas: el abollamiento de las paredes a barlovento debido a las presiones positivas del viento o las fallas por volcamiento [1]. Cuando un tanque se encuentra parcial o totalmente vacío es más susceptible a experimentar fallas por pandeo, dependiendo de la estructura y material de construcción empleado.

En estructuras cilíndricas el viento genera una distribución de presiones no uniforme, como se observa en la Figura 1, en la que se aprecia el punto de estancamiento desarrollado a barlovento y su rápido decaimiento al aumentar θ y alcanzando un pico antes de volverse más uniforme en el lado a sotavento [2].

La variación de presiones depende también de la relación entre el diámetro y la altura del cilindro, varía con la altura y la geometría del techo [2].

Según Portela y Godoy un tanque con techo cónico tiene una carga de pandeo mayor que un tanque similar sin un techo [3] y la transición geométrica entre el cuerpo cilíndrico y el techo es crucial en la evaluación de presiones en el techo, ya que esta transición cambia las principales características de la separación de flujo. Las transiciones suaves, como en las configuraciones de domo, conducen a niveles de presión más bajos que las transiciones abruptas, como en techos cónicos poco profundos [4].

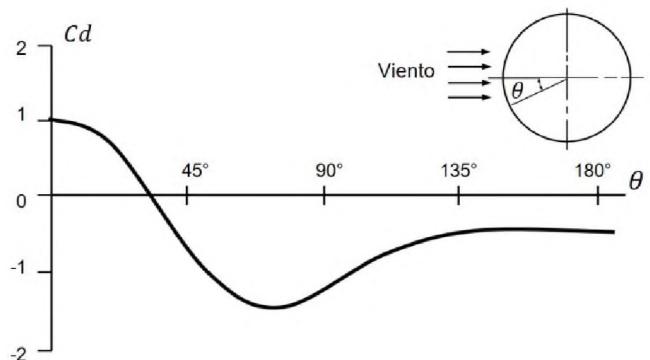


Figura 1: Distribución de presiones alrededor de una estructura cilíndrica [2].

Los Reglamentos de viento, en general, presentan métodos de cálculo basados en coeficientes aerodinámicos medios para estructuras cilíndricas, pero en general los reglamentos no tienen en cuenta todas las

configuraciones y variables posibles de este tipo de estructuras [5]. Por ello se han realizado numerosos ensayos de estructuras cilíndricas en túneles de viento, los cuales se iniciaron en la década del 80, con los estudios realizados por MacDonald, Kwok y Holmes [1] que analizaron silos aislados con tres configuraciones diferentes de cubiertas, planas, cónicas de 25 grados y sin cubierta. Contemporáneamente, Sabransky y Melbourne [6], investigaron la variación en la distribución de presiones debido a la inclinación de la cubierta y a la relación entre la altura y el diámetro de la estructura, analizaron, además, los cambios en la distribución de presiones en un grupo de tres silos próximos entre sí.

El Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones CIRSOC 102 incluye como una alternativa el procedimiento del túnel de viento, y define las condiciones de ensayo. En un trabajo realizado por Marighetti et al. [7]. Se realizaron una serie de ensayos en túnel de viento para establecer las condiciones de carga aerodinámica sobre un silo aislado, obteniéndose como resultado los coeficientes aerodinámicos globales. Se analizaron además los efectos del número de Reynolds (Re) en la distribución de presiones sobre la curvatura del cuerpo cilíndrico obteniéndose la independencia respecto al Re para un modelo rugoso, aún para valores de Re sub-críticos.

DESARROLLO

En este caso se analiza un tanque elevado que distribuirá agua por una nueva red de distribución, en la localidad de Las Breñas, ciudad cabecera del Departamento 9 de Julio, en el suroeste de la Provincia del Chaco.

La obra se está ejecutando en la actualidad y consiste en un tanque elevado nuevo de hormigón armado de 250 m³ de capacidad útil con una altura al fondo de cuba de 22 m y una altura total de 26,45 m (Figuras 2 y 3).

El tanque se está construyendo en un predio localizado en los límites de la ciudad, caracterizado por edificaciones bajas y aisladas.

El caso particular de un tanque de agua cilíndrico con secciones variables, como el analizado, no está específicamente contemplado en el Reglamento. A raíz de ello, y a partir de ensayos realizados en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad Nacional del Nordeste [7], en los que se determinaron coeficientes locales de carga aerodinámica sobre cilindros cortos verticales se

plantea un primer análisis de esta estructura. Luego, se realiza una comparación de los resultados que se obtienen usando estos valores experimentales y los establecidos por el Reglamento CIRSOC 102 [8] y la Norma Brasilera NBR 6123 [9].

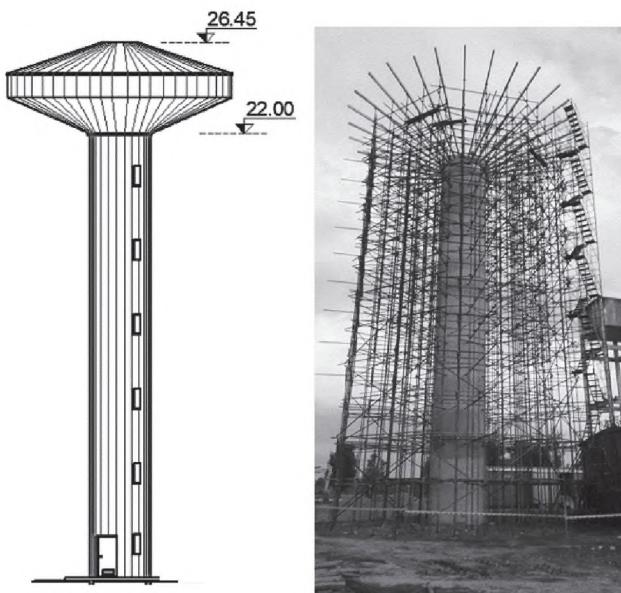


Figura 2: Tanque analizado

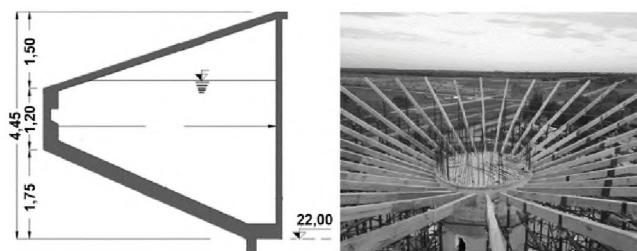


Figura 3: Cuba en construcción

Ensayo en el túnel de viento

El ensayo fue realizado en túnel de viento de capa límite de circuito abierto “Jacek P. Gorecki” de la UNNE (Figura 4). La cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho \times 1,8 m de alto \times 22,8 m de largo, posee un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW que produce una velocidad máxima en vacío de 25 m/s en la mesa de ensayo II donde se ensayan estos modelos. La regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico [10].

En las Figura 5 se muestra el modelo de la estructura cilíndrica analizada y las tomas de presiones que se distribuyeron en tres niveles. Se dispusieron 24 tomas de presión en cada nivel. El

modelo fue instrumentado para realizar las mediciones de las presiones medias y fluctuantes originadas por el viento. En la Figura 5 se aprecia, además, los elementos superficiales de rugosidad colocados en el modelo para obtener una mejora en los coeficientes aerodinámicos.



Figura 4: Túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE

El flujo atmosférico simulado en el túnel de viento corresponde a la categoría de terreno entre rural y suburbano, en concordancia con el entorno donde se emplazará el tanque. La simulación de la capa límite atmosférica se logró empleando una combinación de elementos de rugosidad superficial dispuestos sobre el piso del túnel y dispositivos de mezcla ubicados a barlovento [6], que permiten obtener escalas de simulación adecuadas para su utilización en el área estructural.

Para la medición de las presiones medias y fluctuantes se empleó un sistema de medición Scanivalve de 96 canales y transductores electrónicos Honeywell PC 163.

Con las presiones medias medidas se determinaron los coeficientes aerodinámicos globales medios de arrastre (C_d) asociando los valores medidos de presiones a áreas tributarias que se definen a partir de la ubicación de cada toma y la separación entre las tomas más próximas entre sí.

Para cada toma de presión se calcula la componente de la fuerza en la dirección del viento incidente $F_{xi} = P_i a_i \cos\alpha_i$, donde P_i es la presión por toma, a_i área tributaria asociada a esa toma y α_i es el ángulo de incidencia de viento por toma. Los coeficientes aerodinámicos globales medios de arrastre (C_d) para cada nivel de tomas de presiones se determinaron con la Ecuación (1), donde: \bar{q} es la presión dinámica

media correspondiente a la altura de referencia de cada nivel y A el área de referencia total frontal.

$$Cd = \frac{\sum_{i=1}^{24} Fx_i}{\bar{q} A} \quad (1)$$

Debido a la simetría de la estructura la acción de vientos incidentes turbulentos desarrollados como los simulados en este ensayo, se verificó la simetría de flujo y que el coeficiente aerodinámico lateral sea aproximadamente nulo [7].

En la Figura 5 se presentan Los coeficientes aerodinámicos globales medios de arrastre (Cd) de los tres niveles de tomas de presiones definidos previamente. El ensayo se realizó para varios números de Reynolds, lo cual permitió evidenciar la independencia de los coeficientes globales de arrastre indicados en la Figura 5 con el número de Reynolds.

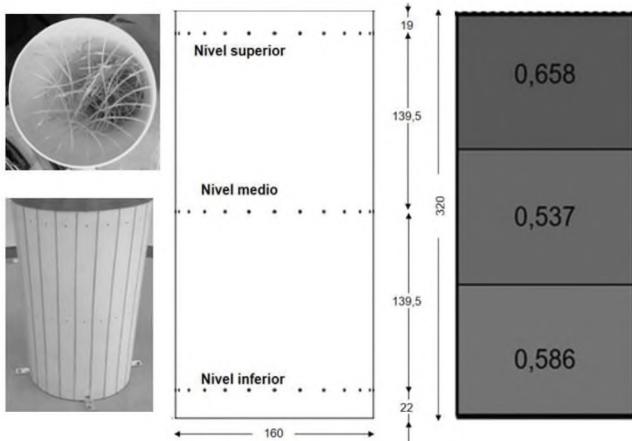


Figura 5: Estructura cilíndrica analizada y coeficientes de arrastre medios obtenidos en los diferentes niveles.

Aplicación de las normativas CIRSOC 102 y NBR6123

En el presente trabajo se han utilizado distintos métodos de cálculo a partir de las normas de viento argentina CIRSOC 102-2005 [8] y brasileña NBR 6123 [9], a fin de computar las fuerzas en los distintos niveles de la estructura.

Mediante la norma CIRSOC 102-2005 [8], se evaluó el tanque y fuste, contemplando la sensibilidad a los efectos dinámicos producidos por la interacción fluido - estructura, incluyendo en la Ecuación (2) el coeficiente G efecto de ráfaga, el cual varía dependiendo la cantidad de masa de agua en el tanque elevado por la estructura. En particular el factor de efecto de ráfaga tiene en cuenta los efectos de carga en la dirección del

viento debido a efectos de amplificación dinámica, no incluyendo efectos de cargas transversales a la dirección del viento, desprendimientos de vórtices, inestabilidad debida a galope o flameo, o efectos dinámicos torsionales. Por lo tanto, representa una hipótesis de carga, respecto del posible real escenario.

$$F = Cd G q_z A_f \quad (2)$$

Donde $Cd(0,845)$ representa el coeficiente de fuerza global debido a la carga generada por el viento, G (0,85) el coeficiente de ráfaga, q_z la presión dinámica para la zona de emplazamiento de la estructura y A_f el área frontal representativa.

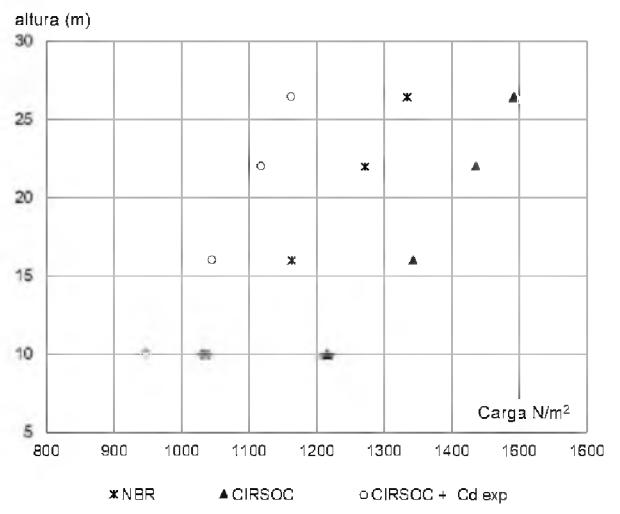


Fig. 6 Carga sobre la estructura obtenida por los métodos estudiados.

Luego utilizando la misma metodología [8], se calcularon las cargas de viento por cada nivel de la estructura, reemplazando el coeficiente de fuerza Cd de la Ecuación (2), por el máximo coeficiente de fuerza obtenido en el ensayo experimental, descripto previamente. Los resultados son presentados en la Figura 6 permitiendo contrastarlos, resultando evidente la reducción acorde a la disminución del nuevo Cd (0,658).

Por último, se presentan las cargas globales por nivel calculadas mediante la norma NBR 6213 [9] en la Figura 6, las cuales solo contemplan las cargas estáticas generadas por el viento sobre la superficie frontal cilíndrica y la discretización del tanque en tres partes rectangulares. Estas han sido obtenidas del producto de la presión dinámica actuante y el coeficiente de presión para cada ángulo de incidencia de viento sobre la estructura.

La norma brasileña propone dos métodos de cálculo para considerar los efectos dinámicos debidos a la turbulencia atmosférica, en los cuales la respuesta dinámica total se calcula estableciendo una superposición de las respuestas media y fluctuante [9].

En estructuras muy flexibles las fluctuaciones de pueden generar oscilaciones importantes en la dirección del viento. En las edificaciones con un período fundamental menor o igual a 1, la norma brasileña considera que la influencia de la respuesta fluctuante es pequeña, y sus efectos ya son considerados en el método que considera una respuesta media, en la determinación del factor S2, factor que considera a influencia da rugosidad del terreno, las dimensiones de la edificación y el factor ráfaga.

En el caso analizado el período fundamental resultó ser menor a uno, por lo cual solo se realizó el análisis considerando un análisis estático.

Como se observa en la Figura 6 las cargas globales de viento por niveles calculadas empleando las normas CIRSOC 102-2005 [8] y NBR 6123 [9], presentan diferencias del orden del 15 %. Ambas normativas, no obstante, indican valores mayores a los que se obtienen con la aplicación de los valores experimentales siguiendo el procedimiento del CIRSOC 102.

Análisis complementario de valores fluctuantes

En la actualidad, se están desarrollando métodos de aproximación cuasi-estática que incluyen el uso de valores fluctuantes de presión. Siendo que en este estudio se midieron presiones fluctuantes, se considera conveniente ilustrar como se aplicarían estos valores a la determinación de las cargas de viento. No obstante, se aclara que todo el estudio anterior se realizó con presiones medias de acuerdo con los métodos normativos.

La Figura 7 muestra los registros de presiones fluctuantes correspondientes a tres tomas de presión; una que corresponde a $\theta = 0^\circ$, 90° y 180° de la Figura 1, respectivamente. Para apreciar mejor las fluctuaciones en cada toma, de los 30 s que dura el registro, solo se reproducen los primeros 5 s. El análisis visual permite verificar que la toma frontal, a barlovento, indica un valor de presión media positivo en torno a los 180 Pa y fluctuaciones importantes alrededor de +/- 95 Pa de pico a pico. La toma lateral, en la zona de desprendimiento indica una fuerte succión, con un

valor medio próximo a -300 Pa y fluctuaciones del orden de +/- 150 Pa. Finalmente, la toma a sotavento ubicada en $\theta = 180^\circ$, también indica succiones, pero menores a la anterior, con valor medio en torno a -135 Pa y fluctuaciones de +/- 50 Pa.

La aplicación del método de análisis cuasi-estático requiere realizar el promediado sucesivo de cada muestra o registro, asociando el tiempo de promediado a la duración de ráfagas, generalmente fijados en 3 y 16 segundos. Los tiempos de ráfaga a escala real deben ser afectados por la escala de tiempo con que fueron realizados los ensayos, en este caso, $\lambda_t \approx 1/90$. El análisis estadístico de los registros promediados, permite obtener coeficientes de pico asociados a ráfagas de 3 y 16 segundos.

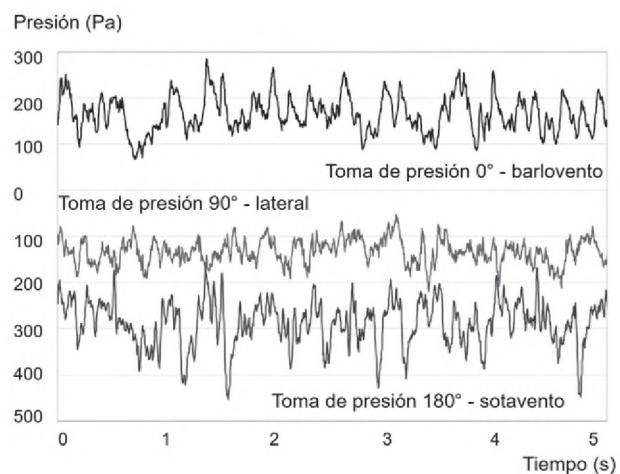


Figura 7: Registros de presiones fluctuantes.

La ventaja de aplicar estos nuevos métodos es que los valores de carga se asocian a directamente a los picos de presión en cada punto, mientras que los métodos normativos definen un coeficiente de ráfaga común a todos los puntos. Este coeficiente de ráfaga, generalmente, es lo suficientemente grande como para que los valores de carga obtenidos estén del lado de la seguridad. Sin embargo, ha ocurrido en las cargas localizadas de cierto tipo de estructura que los valores obtenidos por métodos normativos son menores a los calculados usando métodos de aproximación cuasi-estática con coeficientes de presión asociados a picos de ráfaga [11].

CONCLUSIONES

El análisis de cargas a partir de la aplicación de las normas estudiadas para la estructura en cuestión, evidencia que la contemplación de los

efectos de ráfaga resulta en estados de carga mayores a los obtenidos simplemente por efectos de forma ante la incidencia del viento sobre la estructura, aun contemplando los coeficientes más desfavorables obtenidos en un ensayo experimental. El coeficiente de ráfaga posee un factor de peso, que debe ser considerado en el análisis de éstas estructuras. La aplicación de la Norma CIRSOC 102-2005 contempla efectos de ráfaga al incrementar las cargas estáticas generadas por el viento, obtenidas solo de coeficientes de presión asociados a la dirección del viento incidente respecto de la estructura y su forma en cuestión. Actualmente, se comienzan a aplicar métodos de aproximación cuasi-estática que requieren valores experimentales de presiones fluctuantes localizadas. Estos métodos incorporan los efectos de ráfagas localmente, lo que permite optimizar el cálculo estructural y mejorar la verificación de las distintas componentes.

REFERENCIAS

- [1] P.A. MacDonald, K.C.S. Kwok, J.D. Holmes (1988). Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 31 165–187.
- [2] Rotter, J. (2009). Silos and tanks in research and practice: State of the art and current challenges. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures.
- [3] Portela, Genock & Godoy, Luis. (2005). Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a dome roof. *Journal of Constructional Steel Research - J CONSTR STEEL RES.* 61. 808-824. 10.1016/j.jcsr.2004.11.001.
- [4] Portela, Genock & Godoy, Luis. (2005). Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a dome roof. *Journal of Constructional Steel Research - J CONSTR STEEL RES.* 61. 808-824. 10.1016/j.jcsr.2004.11.001.
- [5] Hua, Xiapin & Letchford, Chris. (2014). A Comparison of Wind Loads on Circular Bins, Silos and Tanks. *Structures Congress 2014 - Proceedings of the 2014 Structures Congress.* 1616-1629. 10.1061/9780784413357.142.
- [6] Sabransky, IJ y Melbourne, WH (1987). Design pressure distribution on circular silos with conical roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 26, Issue 1, 1987, 65–84.*
- [7] Marighetti J, Mónaco H., Alvarez y Alvarez, G; Udrizar Lezcano, S; Adotti, M; Begliardo H., Nittmann J.; Simon, L; Wittwer, A. (2021) Evaluación de fuerzas aerodinámicas globales sobre un Silo de acopio mediante ensayos en túnel de viento. *Anales VII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*, 15, 16 y 17 de Septiembre 2021.
- [8] Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (2001), Reglamento CIRSOC 102: “Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones”, INTI, Buenos Aires.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- [10] Wittwer, A y Möller, V (2000) “Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 84 (3), pp. 307-320.
- [11] Marighetti J, Wittwer A., De Bortoli M., Natalini B., Paluch M., Natalini M (2000) Fluctuating and mean pressure measurements on a stadium covering in wind tunnel, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 84, Issue 3, 321-328.*