



# **VII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

# **II CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA FERROVIARIA**

15, 16 Y 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021



**FoDAMI**

Universidad Tecnológica Nacional

VII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica y II Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria : VII CAIM-II CAIFE / compilación de Nancy Quaranta ; Marta Caligaris ; Fernando Palmieri ; editado por Nancy Quaranta ; Marta Caligaris ; Fernando Palmieri. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional ; San Nicolás de los Arroyos : Facultad Regional San Nicolás, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-42-0210-3

1. Ingeniería. I. Quaranta, Nancy, comp. II. Caligaris, Marta, comp. III. Palmieri, Fernando, comp. IV. Título.

CDD 620.007

ISBN 978-950-42-0210-3



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN) no percibe fondos desde los congresos / jornadas, la publicación es gratuita y abierta para eventos realizados u organizados en unidades académicas de la UTN



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.



15, 16 Y 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021

## EFFECTOS DE INTERACCIÓN AERODINÁMICA EN EL CASO DE SILOS EN TANDEM A TRAVÉS DE ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO

Adrián R. Wittwer<sup>1</sup>, Héctor D. Mónaco<sup>2</sup>, Juan M. Rodríguez Aguirre<sup>3</sup>, Beatriz Iturri<sup>3</sup>, Juan J. Nittmann<sup>2</sup>, Hugo F. Begliardo<sup>2</sup>, Agustín Díaz<sup>1</sup>, Mario E. De Bortoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.  
correo-e: a\_wittwer@yahoo.es

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, FRRa, Argentina.

<sup>3</sup> F Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica (IMIT-CONICET-UNNE)

### RESUMEN

Las instalaciones agrícolas que disponen silos para el almacenamiento de granos son muy comunes en las zonas agropecuarias de Argentina y Brasil. Algunos accidentes causados por la acción del viento han sido reportados recientemente con relación a instalaciones estructurales de este tipo ubicadas en la provincia de Santa Fe y en el sur de Brasil. Por este motivo, la Universidad Tecnológica Nacional-Regional Rafaela y el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE han comenzado a desarrollar estudios experimentales en túnel de viento que permitan complementar los procedimientos establecidos en el Reglamento Argentino de Vientos CIRSOC 102. En este trabajo, se detallan las condiciones experimentales que permitieron evaluar las cargas sobre silos en tándem con diferentes separaciones entre sí, mediante una serie de ensayos en túnel de viento. Se presentan resultados obtenidos en forma de distribuciones de los coeficientes adimensionales de presión media y los valores medidos para el caso de dos silos se evalúan en relación con los valores para un silo aislado. Complementariamente, se establecen algunas características generales de los efectos de interacción aerodinámica entre silos y se evalúa la continuidad de los estudios con la aplicación de este tipo de metodología a establecimientos con grupos de varios silos, así como con el análisis de cargas de viento fluctuante a través del análisis de los coeficientes de valor RMS y de presiones de pico.

**Palabras Clave:** Cargas aerodinámicas, silos de acopio, estructuras metálicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un gran número de silos para almacenamiento de cereales se diseñan y construyen con poca información respecto a su resistencia a los daños provocados por los vientos. Varios estudios realizados en túnel de viento de capa límite sobre estructuras aisladas con relación de aspectos entre 0.5 y 2.0, así como sobre configuraciones agrupadas de silos alineados tienen en cuenta la dependencia de los coeficientes aerodinámicos con respecto al número de Reynolds [1, 2]. Existen varios fenómenos que se producen en estas estructuras metálicas e incluyen abollamiento por sobrepresiones y vibraciones localizadas inducidas por vórtices que actúan sobre elementos de sujeción o estructurales auxiliares [3]. Los Reglamentos de viento, como ocurre con el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones CIRSOC 102 [4], presentan métodos de cálculo basados en coeficientes aerodinámicos medios, e indican las condiciones de ensayo para el procedimiento del túnel de viento.

Este trabajo es la continuación de otro trabajo complementario donde, con el objetivo de evaluar las cargas de aerodinámicas sobre un silo aislado, se implementaron una serie de ensayos con un modelo liso y uno rugoso en el túnel de viento de capa límite de la UNNE [5].

En esta nueva propuesta, se evalúan las cargas aerodinámicas sobre silos en tándem con diferentes separaciones entre sí, a través de análisis experimental de la distribución de coeficientes de presión perimetrales medios

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los silos a ser ensayados en el túnel de viento tienen una relación  $H/D=2$ , son estructuras de forma cilíndrica y cubierta cónica, poseen grandes dimensiones en relación al peso propio, lo cual, desde el punto de vista aerodinámico, las torna susceptibles al problema de pérdida de estabilidad por compresión del costado y de volcamiento debidas a la acción del viento, sobre todo en la condición de que están vacíos o parcialmente llenos.

Los ensayos fueron realizados sobre dos modelos rígidos de silos a escala reducida conforme al procedimiento en túnel de viento del Reglamento CIRSOC 102. El primer modelo fue instrumentado para realizar las mediciones de las presiones medias y fluctuantes originadas por el viento, y el segundo modelo, no instrumentado, se empleó para evaluar la interacción aerodinámica al disponerlos en tándem. Las mediciones de las presiones estáticas originadas por el viento sobre los modelos se realizaron en la cámara de ensayos del túnel de viento. Se midieron las presiones medias y fluctuantes en la superficie cilíndrica por medio de tomas de presión estática, utilizando un sistema de medición Scanivalve de 96 canales. Posteriormente se determinaron coeficientes de presión local correspondientes a las tomas de presión. Para la disposición en tándem los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , ya que el modelo es simétrico, a intervalos de  $45^\circ$ , resultando 5 direcciones de viento incidente.

Simultáneamente, se midieron los valores de la velocidad media en condición no perturbada, a barlovento del modelo en la posición correspondiente a la altura máxima del modelo, utilizando un tubo de Pitot-Prandtl. Esto permite obtener la presión dinámica de referencia,  $q_z$ , en forma simultánea a las mediciones de las presiones fluctuantes sobre la torre. La presión estática de referencia se obtuvo del mismo tubo de Pitot-Prandtl. Con los datos de las mediciones, para cada dirección de viento analizada, se determinaron los coeficientes de presión para cada toma, asociando los valores medidos a áreas tributarias que se definen a partir de la ubicación de cada toma y la separación entre las tomas más próximas entre sí.

El túnel "Jacek P. Gorecki" de la UNNE es un túnel de capa límite de circuito abierto, denominado tipo Eiffel [6]. La longitud total del túnel es de 39,65 m y la cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho  $\times$  1,8 m de alto  $\times$  22,8 m de largo. Un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW produce una velocidad máxima en vacío de 25 m/s en la cámara de ensayos.

La técnica de simulación de la capa límite atmosférica implementada en el túnel de viento para estos ensayos se encuentra comprendida dentro de los métodos de rugosidad, barrera y dispositivo de mezcla [7], que permiten obtener escalas de simulación adecuadas para su utilización en el área estructural.

El modelo del silo fue construido sin definir una escala geométrica específica ya que no se partió de un prototipo existente, pero reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica con una misma escala (por las dimensiones del modelo en relación a silos de este tipo puede considerarse una escala aproximada de 1:50). En el trabajo complementario [5] se indican detalles constructivos del modelo, así como la distribución de las tomas de presión sobre las paredes y cubierta del silo instrumentado. Empleando la misma escala se construyó otro modelo del silo, pero sin instrumentar, denominado modelo mudo, que se utilizó para evaluar la interacción aerodinámica con el silo instrumentado. En la Figura 1 se muestran la configuración en planta de los silos durante los ensayos, así como también se ilustra la disposición de ambos modelos experimentales.

### **3. RESULTADOS**

Los resultados de los ensayos se presentan de forma separada de acuerdo a la separación entre silos. En las Figuras 2 a 6 son mostrados los gráficos de distribución de coeficientes de presión perimetrales para separaciones entre 2D y 1D. Luego, en las Figuras 7 a 11 se indican los gráficos correspondientes a separaciones menores que D.

#### **3.1. Silos separados por una distancia $s \geq D$**

En la Figura 2 se presentan las distribuciones perimetrales de los coeficientes de presión media para el caso en que el modelo del silo instrumentado se encuentra en la posición directamente a sotavento del modelo no-instrumentado (mudo). Los gráficos ilustran las cuatro separaciones

entre silos que fueron evaluadas; 2D, 1.5D, 1.3D, 1D. En cada uno de los gráficos se muestran las tres líneas perimetrales analizadas que corresponden a la menor altura (inferior), a la intermedia (media) y a la de mayor altura (superior). Si bien los efectos de interacción aerodinámica se perciben desde la mayor separación (2D), desde el punto de vista de una clara disminución de cargas aerodinámicas, sobre todo en relación a las presiones positivas que se generan a barlovento, recién se hacen considerables para las separaciones 1.3D y 1D. El efecto es más significativo en la línea perimetral inferior.

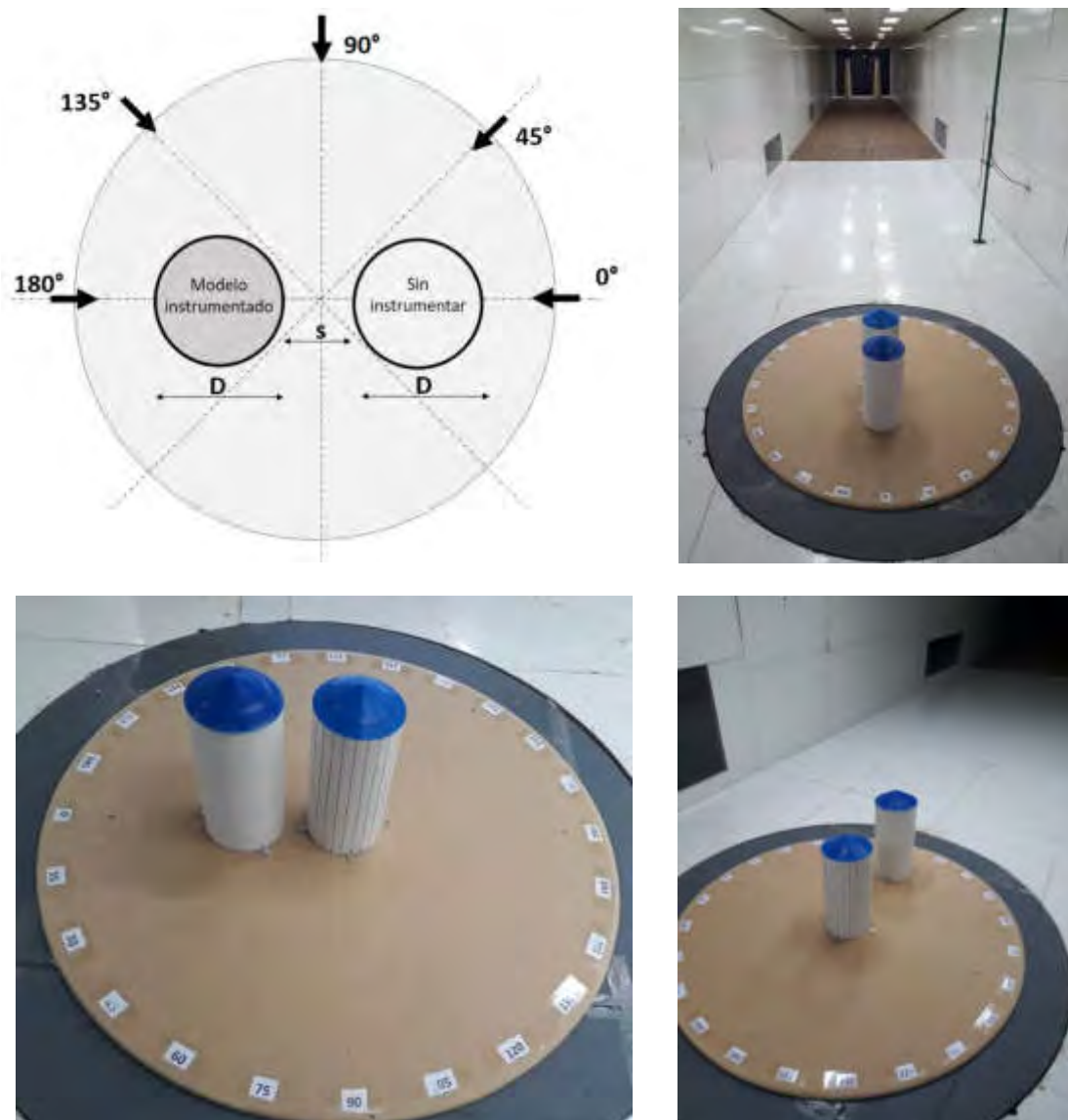


Figura 1: Configuración en planta de modelo de los silos y disposición de ambos modelos en la cámara de ensayos del túnel de viento.

De la misma forma, en la Figura 3 se presentan las distribuciones perimetrales de los coeficientes de presión media cuando el modelo del silo instrumentado se encuentra parcialmente a sotavento del modelo mudo ya que el viento incide oblicuamente. Los gráficos muestran las cuatro

separaciones (2D, 1.5D, 1.3D, 1D) y las tres líneas perimetrales analizadas (inferior, media y superior). Para esta dirección de viento, los efectos de interacción aerodinámica se pueden considerar despreciables inclusive para las separaciones 1.3D y 1D.

Las distribuciones perimetrales de los coeficientes de presión media cuando el viento incide en dirección transversal al eje que determinan ambos modelos se indica en la Figura 4. Se muestran las mismas cuatro separaciones ya consideradas. Si bien, los efectos de interacción aerodinámica se pueden considerar despreciables desde el punto de vista de las cargas, la línea de tomas superior presenta una leve alteración en la zona donde se produce la succión máxima, producto de la presencia lateral del modelo mudo.

En la Figura 5 se presentan las distribuciones perimetrales cuando el modelo del silo instrumentado se encuentra parcialmente a barlovento del modelo mudo ya que el viento incide oblicuamente. Igualmente, se muestran las cuatro separaciones entre modelos para las tres líneas perimetrales. Los efectos de interacción aerodinámica se pueden considerar despreciables, inclusive desde el punto de la simetría de las distribuciones definiendo un eje paralelo a la dirección del viento incidente que pasa por el centro del modelo instrumentado.

Para el caso en que el modelo del silo instrumentado se encuentra en la posición directamente a barlovento del modelo mudo (Figura 6), los efectos del silo mudo son prácticamente nulos para todas separaciones y en las tres líneas perimetrales.

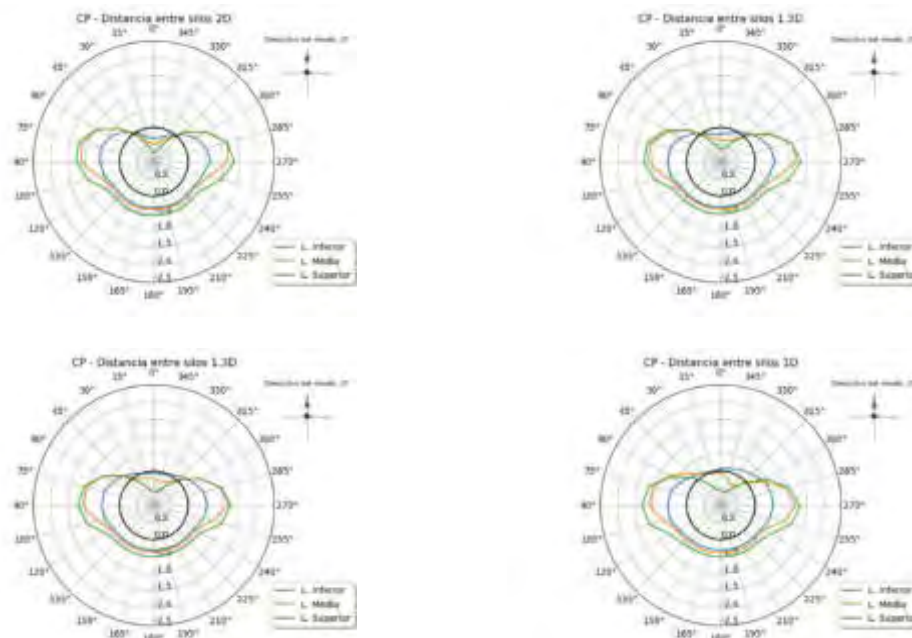


Figura 2: Coeficientes de presión perimetrales – silo completamente a sotavento - separación entre silos desde 2D a 1D.

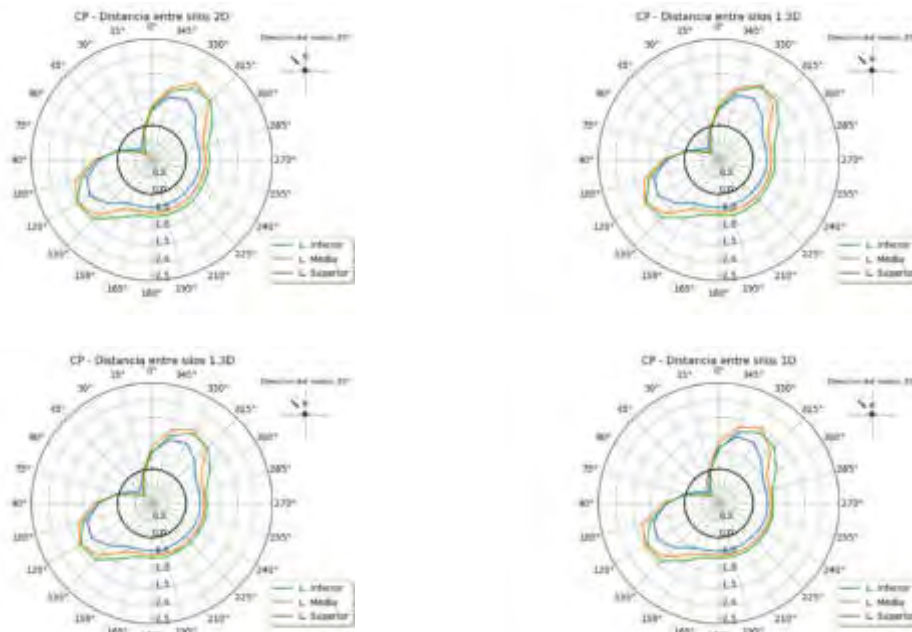


Figura 3: Coeficientes de presión perimetrales – silo a sotavento con viento incidente oblicuo - separación entre silos desde 2D a 1D.

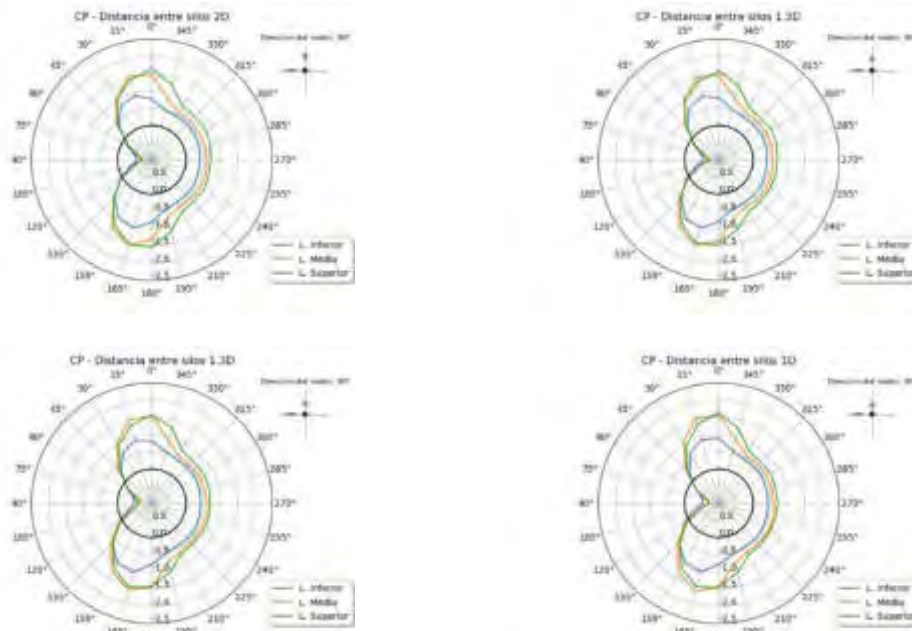


Figura 4: Coeficientes de presión perimetrales – silo en posición lateral respecto a la dirección de viento incidente - separación entre silos desde 2D a 1D.



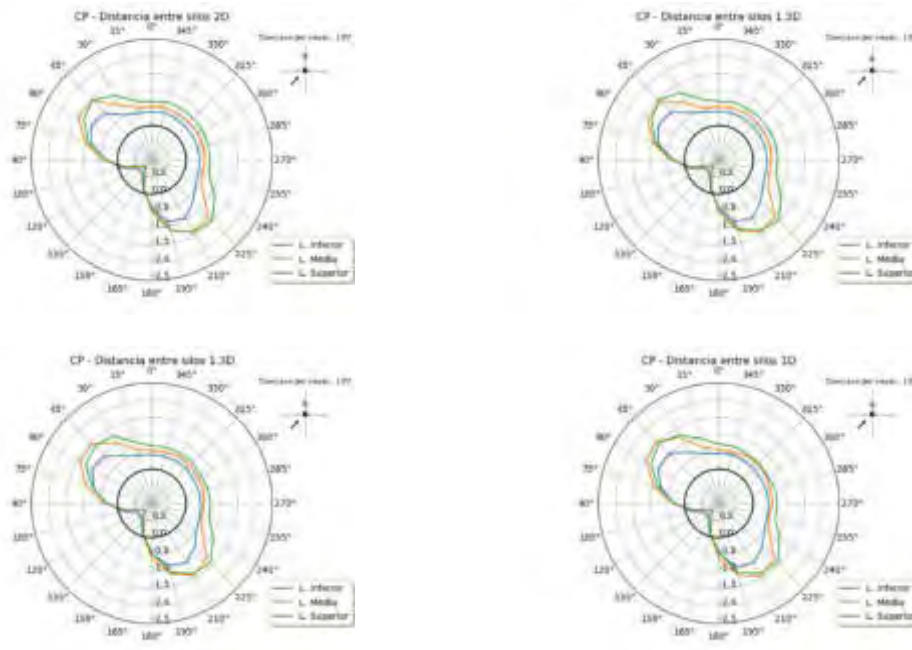


Figura 5: Coeficientes de presión perimetrales – silo a barlovento con viento incidente oblicuo - separación entre silos desde 2D a 1D.

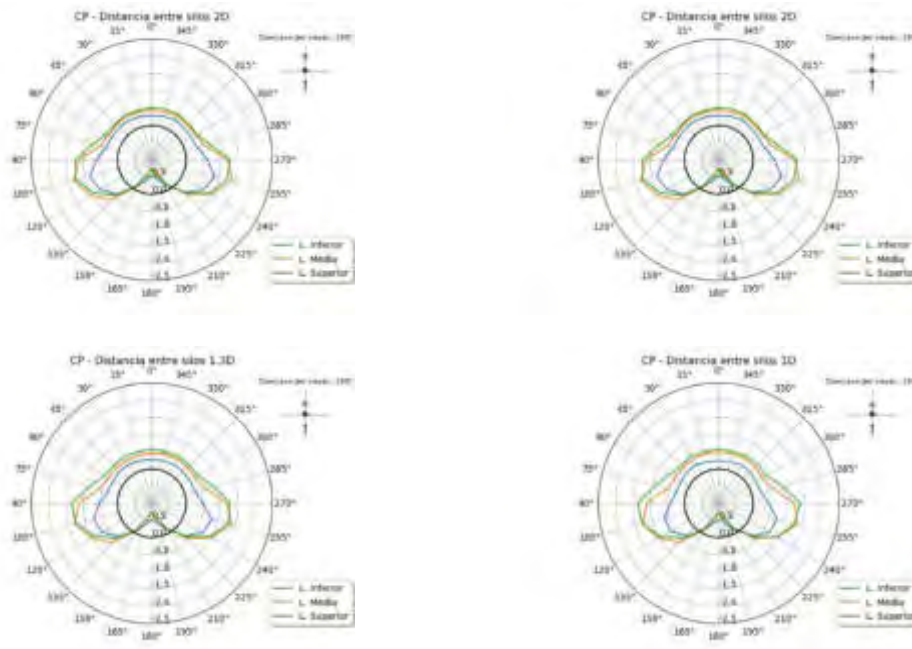


Figura 6: Coeficientes de presión perimetrales – silo completamente a barlovento - separación entre silos desde 2D a 1D.

### 3.2. Silos separados por una distancia $s < D$

En la Figura 7 se presentan las distribuciones de los coeficientes de presión para el caso del modelo instrumentado ubicado directamente a sotavento del modelo mudo, considerando separaciones entre silos menores a  $D$ , es decir;  $0.70D$ ,  $0.15D$ ,  $0.05D$ ,  $0.02D$ . En caso de la separación  $0.70D$ , se mantiene la tendencia verificada en la Figura 2, sin embargo, a partir de la separación  $0.15D$ , las distribuciones correspondientes a la línea media y superior una configuración especial que se acentúa con la disminución de la separación entre silos. Con la menor separación ( $0.02D$ ), por efectos de la estela del modelo mudo, todos los valores indican succiones, excepto dos puntos con valores positivos muy próximos a cero en cada una de las líneas media y superior.

Para estas mismas separaciones menores a  $D$ , en la Figura 8 se presentan las distribuciones de los coeficientes de presión cuando el modelo del silo instrumentado se encuentra parcialmente a sotavento del modelo mudo porque la incidencia del viento es oblicua. Para esta dirección de viento, los efectos de interacción aerodinámica que se consideraron despreciables para las separaciones hasta  $1D$ , comienzan a manifestarse en la línea perimetral media para la separación  $0.70D$ . A medida que disminuye la separación, el efecto se acentúa definiendo un máximo localizado de succión para  $0.02D$  en el punto perimetral que corresponde al ángulo  $45^\circ$  respecto a la línea de acción del viento.

Cuando el viento incide en dirección transversal al eje que determinan ambos modelos (Figura 9), el comportamiento de las distribuciones de presión es bastante semejante al observado para el caso anterior con viento oblicuo. Es decir, a medida que disminuye la separación entre silos, se comienza a definir un máximo localizado de succión. En este caso, ese valor constituye un máximo local pero no es un máximo absoluto en toda la distribución perimetral y se ubica a  $90^\circ$  respecto a la línea de acción del viento, zona de menor sección de circulación de aire entre silos.

Cuando el modelo del silo instrumentado se encuentra parcialmente a barlovento del modelo mudo (viento incidente oblicuo, Figura 10), las distribuciones perimetrales de presión presentan la configuración más interesante por efecto de la interacción aerodinámica. A partir de la separación correspondiente a  $0.15D$ , comienzan a definirse dos zonas de succión local hacia el lateral izquierdo del silo, que para las separaciones de  $0.05$  y  $0.02D$  se mantiene solo en la línea perimetral superior. Nuevamente, el máximo de succión local que se produce entre silos no es un máximo absoluto en toda la distribución perimetral y se ubica a  $135^\circ$  respecto a la línea de acción del viento, es decir, la zona de menor separación entre silos.

Finalmente, para el caso en que el modelo del silo instrumentado se encuentra en la posición directamente a barlovento del modelo mudo (Figura 11), los efectos de interacción son prácticamente despreciables desde el punto de vista de las cargas aerodinámicas. Sin embargo, para las menores separaciones ( $0.05$  y  $0.02D$ ) se producen unas variaciones locales en la zona de sotavento del modelo instrumentado, donde la sección de separación entre silos es menor,

en las distribuciones correspondientes a la línea perimetral superior. También se observan valores de succiones laterales más semejantes para las tres líneas a medida que la separación entre silos disminuye.

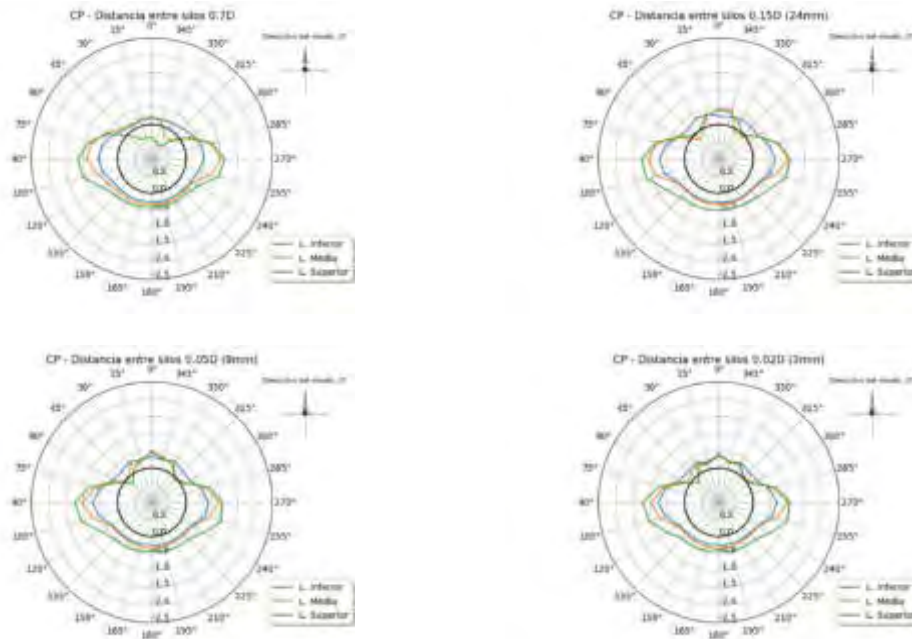


Figura 7: Coeficientes de presión perimetrales – silo instrumentado ubicado completamente a sotavento - separación entre silos desde 0.70D a 0.02D.

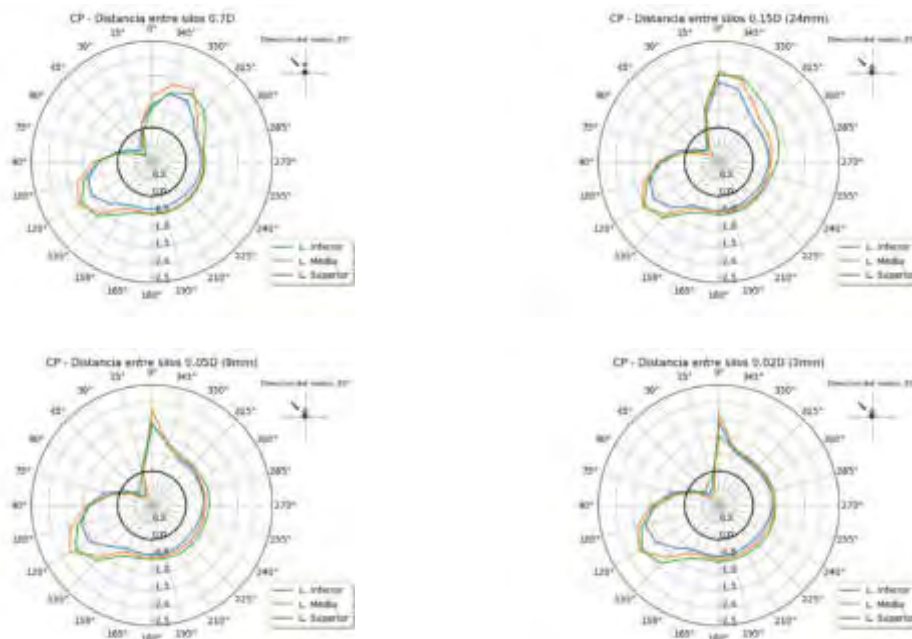


Figura 8: Coeficientes de presión perimetrales – silo instrumentado a sotavento con viento incidente oblicuo - separación entre silos desde 0.70D a 0.02D.

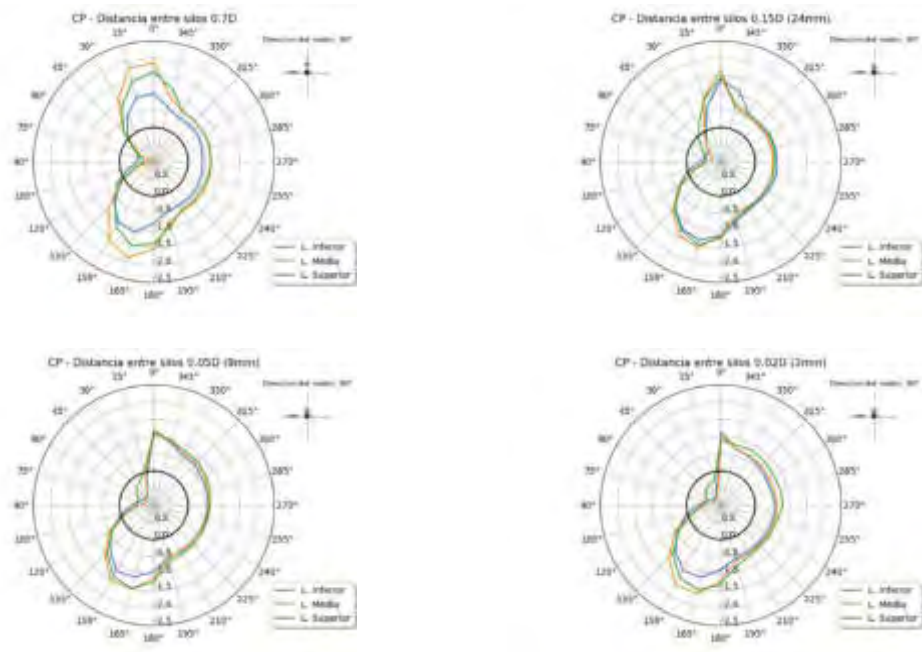


Figura 9: Coeficientes de presión perimetrales – silos ubicados en posición lateral respecto a la dirección de viento incidente - separación entre silos desde 0.70D a 0.02D.

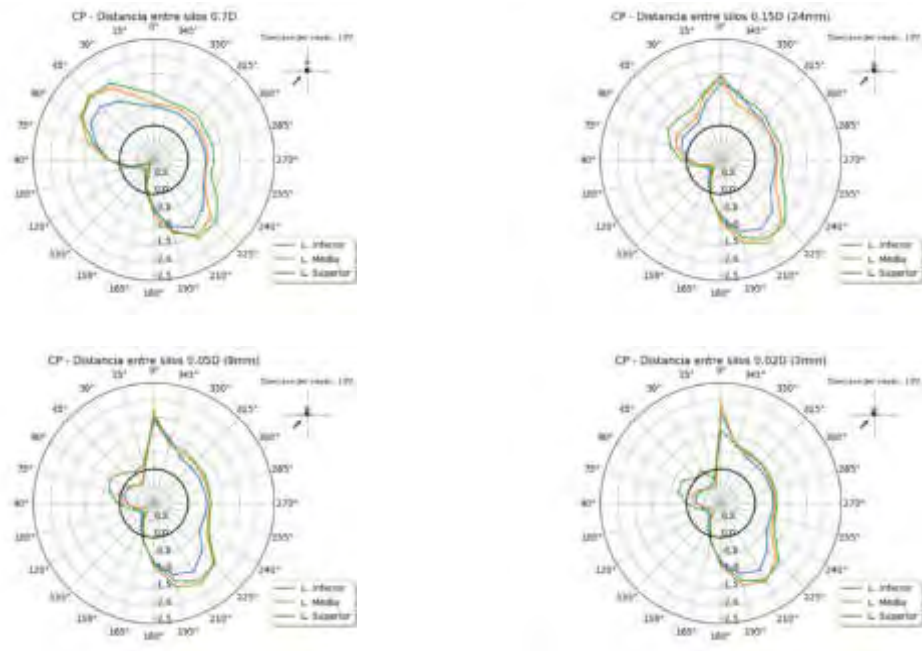


Figura 10: Coeficientes de presión perimetrales – silo instrumentado a barlovento con viento incidente oblicuo - separación entre silos desde 0.70D a 0.02D.

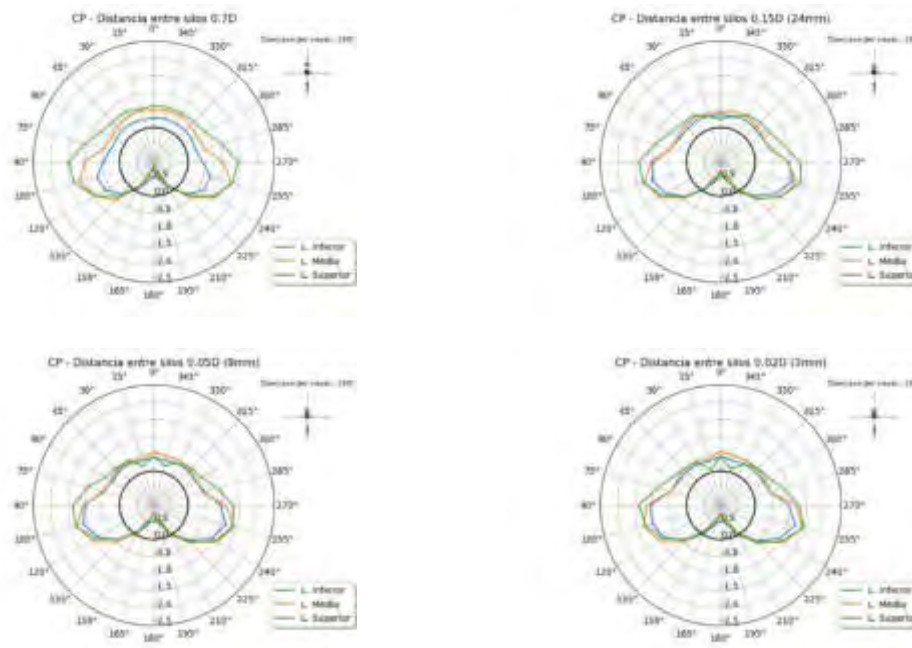


Figura 11: Coeficientes de presión perimetrales – silo instrumentado completamente a barlovento - separación entre silos desde 0.70D a 0.02D.

### 3.3. Discusión de resultados

Los resultados de los ensayos permiten determinar que cuando la separación entre silos es igual o mayor a  $D$ , los efectos de interacción son despreciables. Cuando las separaciones son menores a  $D$ , comienzan a verificarse efectos de interacción aerodinámica que, si bien no son importantes desde el punto de vista de las cargas de viento global, si deberían ser tenidos en cuenta al analizar efectos localizados. Para la dirección transversal a la orientación tándem de los silos, debe tenerse en cuenta el valor positivo localizado barlovento, mientras que para ambas direcciones oblicuas, deben tenerse en cuenta las succiones locales en la zona de menor sección de separación entre ambos silos.

### 4. CONCLUSIONES

El análisis de las distribuciones de presión exterior sobre silos cilíndricos indica que la interacción entre dos silos en tándem no debería provocar efectos de carga aerodinámica importantes respecto al caso de un silo aislado como se analiza en el Reglamento Argentino de Vientos CIRSOC 102. Sin embargo, los efectos localizados si presentan incrementos respecto al caso aislado en zonas específicas para algunas direcciones de viento. Estos valores deberían ser analizados convenientemente para su posible aplicación, sobre todo al dimensionamiento de los elementos de sujeción.

Por otro lado, en este análisis preliminar, no se incluyó la evaluación de los valores de cargas fluctuantes de viento. No obstante, se midieron presiones fluctuantes y se determinaron coeficientes de valor RMS, máximo y mínimo. Estos valores no se presentan ahora porque

requieren un análisis estadístico para la aplicación del método cuasi-estático de cargas de viento en estructuras, sin embargo, este análisis será próximamente desarrollado.

Finalmente, para complementar el estudio, se realizarán ensayos en túnel de viento incluyendo grupo de seis a ocho silos para analizar, del mismo modo que en el caso de dos silos en tándem, no se verifiquen variaciones de las cargas de viento que deban ser consideradas al momento del diseño y cálculo estructural de este tipo de instalación.

## 5. REFERENCIAS

- [1] P.A. MacDonald, K.C.S. Kwok, J.D. Holmes. *Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 31, 165–187, 1988.
- [2] I.J. Sabransky, W.H. Melbourne. *Design pressure distribution on circular silos with conical roofs*. J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., 26, 65-84, 1987.
- [3] A. M. Loredo-Souza, A. R. Wittwer. *Avaliação em túnel de vento das ações e efeitos do vento sobre edificações, pessoas e o meio-ambiente*. Turbulência, Vol. 9, Cadernos de Turbulência, Editores: Maria Luiza Sperb Indrusiak et al. ABCM, UNISINOS, RS, Brasil, 2014.
- [4] Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. *Reglamento CIRSOC 102: Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones*. INTI, Buenos Aires, 2001.
- [5] J. Marighetti, H. D. Mónaco, G. Alvarez y Alvarez, S. U. Lezcano, M. Adotti, H. F. Begliardo, J. J. Nittmann, L. Simon, A. Wittwer. *Evaluación de fuerzas aerodinámicas globales sobre un silo de acopio mediante ensayos en túnel de viento*. (en proceso de revisión) CAIM 2020.
- [6] A. R. Wittwer, S. V. Möller. *Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 84 (3), pp. 307-320, 2000.
- [7] N. J. Cook. *Wind-Tunnel Simulation of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier and Mixing-Device Methods*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 3, pp. 157-176, 1978.