



## **Análisis de las cargas aerodinámicas y del desempeño mecánico de estructuras cilíndricas verticales.**

Simon, Luciana <sup>a\*</sup>, Wittwer, Adrián R. <sup>a</sup>, Álvarez y Álvarez, Gisela M. <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco, Argentina.  
e-mails: [lucianasimon30@gmail.com](mailto:lucianasimon30@gmail.com), [a\\_wittwer@yahoo.es](mailto:a_wittwer@yahoo.es), [giselaalvarezalvarez@yahoo.com.ar](mailto:giselaalvarezalvarez@yahoo.com.ar)

---

### **Resumen**

A partir de la necesidad de incorporar los nuevos desarrollos en aerodinámica experimental al cálculo de estructuras cilíndricas verticales sensibles a la acción del viento como es el caso de los silos de almacenamiento de granos, se realizaron una serie de ensayos en túnel de viento para establecer las condiciones de carga aerodinámica sobre este tipo de estructura. Los experimentos realizados con modelos a escala reducida cumplen con las condiciones que establecen los procedimientos del Reglamento Argentino de Vientos CIRSOC 102 y de la Norma Brasileira NBR 6123 “Forças devidas ao vento em edificações”. En este trabajo, se detallan las condiciones experimentales de los ensayos en túnel de viento y se presentan resultados de coeficientes aerodinámicos globales obtenidos para el caso de un silo aislado. Luego se analizan los efectos del número de Reynolds en la distribución de presiones sobre la curvatura del cuerpo cilíndrico. Finalmente, se evalúan los efectos que provoca el agregado de rugosidad superficial sobre los coeficientes aerodinámicos.

**Palabras Clave** – Túnel de viento, Silos, Normas, coeficientes aerodinámicos globales.

### **1. Introducción**

Los silos de almacenamiento de granos empleados en instalaciones agrícolas son estructuras cilíndricas de baja altura, que muchas veces son construidas sin tener en cuenta el efecto adverso que el viento puede ocasionar en ellas. La falta de información confiable, al momento de realizar el diseño, ha contribuido al colapso de este tipo de estructuras ocasionando la pérdida de la estructura, la contaminación o pérdida del material almacenado y posibles daños a personas [1]. Según Macdonald et al. [2] existen dos fallas que son comunes: el abollamiento de las paredes a barlovento debido a las presiones positivas del viento o las fallas por volcamiento. En este tipo de estructuras cilíndricas es importante realizar estudios aerodinámicos en los cuales se analizan las fuerzas que el viento ejerce sobre el cuerpo sumergido él.

Existen varios fenómenos que se producen en algunos tipos de estructuras metálicas o en sus elementos estructurales y que deben ser tenidos en cuenta en el momento del diseño y de la verificación estructural. Estos problemas incluyen abollamiento por sobrepresiones y vibraciones localizadas inducidas por vórtices que actúan sobre elementos de sujeción o estructurales auxiliares [3]. En particular, se pueden presentar problemas asociados a la variación de los coeficientes de arrastre con el número de Reynolds y a las vibraciones por desprendimiento de vórtices. Los Reglamentos de viento, en general, presentan métodos de cálculo basados en coeficientes aerodinámicos medios, como ocurre con el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones CIRSOC 102 [4], e incluyen como una alternativa el procedimiento del túnel de viento, definiendo las condiciones de ensayo.

En este trabajo se realiza un análisis experimental en túnel de viento sobre un modelo a escala reducida rígido de un silo aislado que satisface criterios de semejanza ensayado en el Laboratorio de

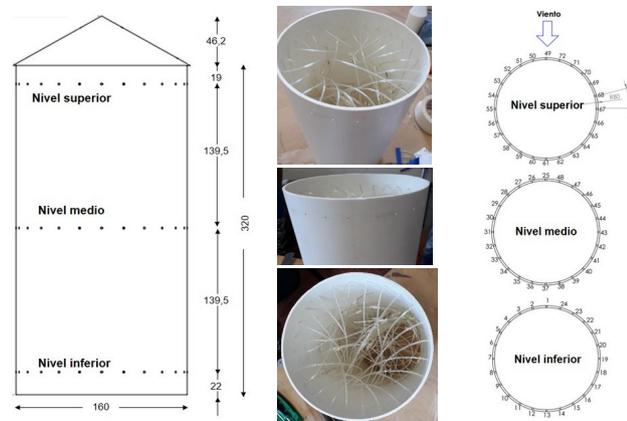
Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Para poder realizar un análisis de los efectos del número de Reynolds sobre los coeficientes aerodinámicos globales de arrastre y lateral, el modelo se ensaya a diferentes velocidades de viento incidente. Luego, se evalúan los efectos que provoca el agregado de rugosidad superficial en las paredes del modelo sobre los coeficientes aerodinámicos.

## 2. Cuerpo

### Características de los modelos de silo a emplear

El silo a ser ensayado en el túnel de viento tiene una relación entre la altura y diámetro igual a 2 ( $H/D=2$ ), su estructura es de forma cilíndrica y cubierta cónica, posee gran dimensión en relación al peso propio, lo cual, desde el punto de vista aerodinámico, lo torna susceptible al problema de pérdida de estabilidad por compresión y de volcamiento debido a la acción del viento, sobre todo en la condición de que esté vacío o parcialmente lleno.

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 las Figuras 1 y 2 se muestran detalles constructivos del modelo, así como la distribución de las tomas de presión que se dispusieron en tres niveles sobre las paredes del silo. 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.



**Fig 1. Detalle de los modelos ensayados, disposición de tomas de presión.**

En la Figura 2 se aprecian, además, los elementos superficiales de rugosidad que se agregaron en las paredes del silo al segundo modelo ensayado.



**Fig. 2: Modelo de silo aislado instrumentado con y sin rugosidad montado en la cámara de ensayos.**

### **Ensayos del modelo en el túnel de viento**

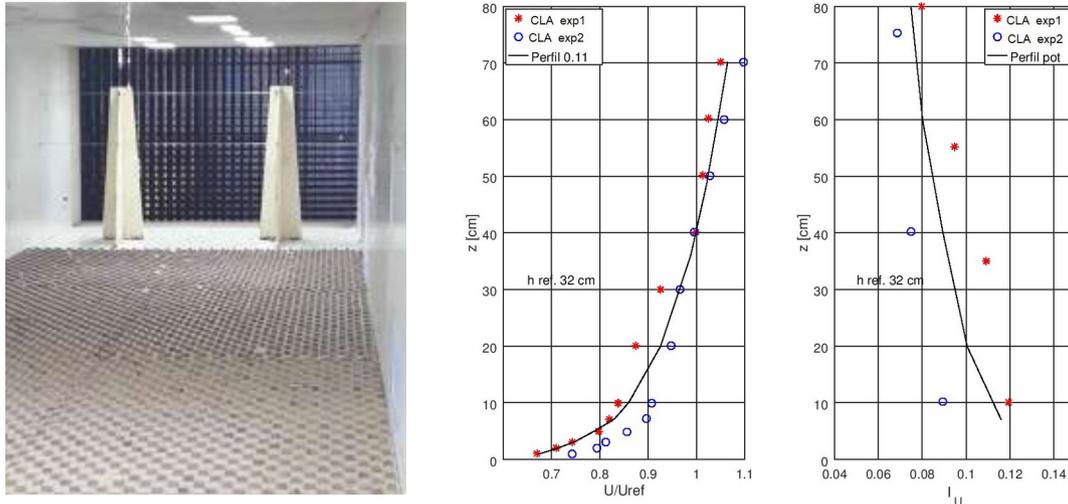
El ensayo fue realizado en túnel de viento de capa límite de circuito abierto “Jacek P. Gorecki” de la UNNE (Figura 3). La cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho  $\times$  1,8 m de alto  $\times$  22,8 m de largo, posee un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo 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 [5].



**Fig. 3. Túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE.**

Para la simulación de la capa límite atmosférica se empleó una técnica que combina elemento 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. Conforme la clasificación que aparece en los reglamentos de viento, el flujo atmosférico simulado corresponde a la categoría de terreno entre rural y suburbano.

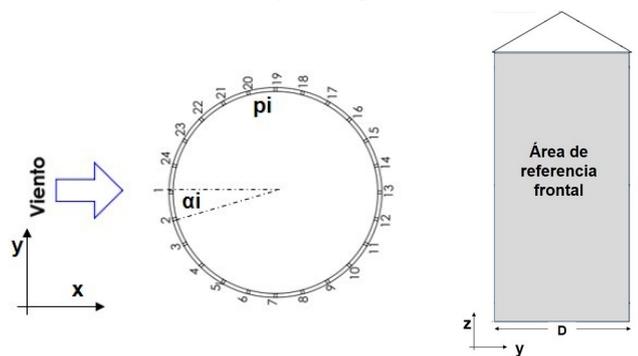
La Figura 4 muestra los elementos de simulación y las principales características del escurrimiento incidente utilizado en estos ensayos; perfil de velocidades medias y perfil de intensidad turbulencia.



**Fig 4. Equipamiento de simulación de viento natural y perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia.**

Las mediciones de las presiones estáticas originadas por el viento sobre el modelo se realizaron en la cámara de ensayos del túnel de viento, donde la velocidad máxima en vacío alcanza un máximo de 25 m/s. Las presiones medias y fluctuantes se obtuvieron utilizando un sistema de medición Scanivalve de 96 canales y transductores electrónicos Honeywell PC 163. Simultáneamente, se midieron los valores de la velocidad media, 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,  $q$ , en forma simultánea a las mediciones de las presiones fluctuantes sobre el silo. La presión estática de referencia se obtuvo del mismo tubo de Pitot-Prandtl.

Con las presiones medias medidas se determinaron los coeficientes aerodinámicos globales medios de arrastre ( $C_d$ ) y laterales ( $C_l$ ), 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.



**Fig. 5. Cálculo de Coeficientes aerodinámicos**

## Resultados

Se presentan los resultados de los ensayos realizados en el túnel de viento para modelo liso y rugoso, expresados en coeficientes aerodinámicos globales para distintos números de Reynolds.

En primera instancia se realiza un estudio de simetría de flujo evaluando el coeficiente de carga global lateral. Luego se presentan los coeficientes de arrastre para ambos modelos.

### Análisis de simetría de flujo

En este tipo de estructuras simétricas evaluadas a la acción de vientos incidentes turbulentos desarrollados como los simulados en este ensayo, se espera que las cargas globales solo sean representadas por un único coeficiente asociado al arrastre. Para ello es necesario que se verifique la simetría de flujo y que el coeficiente aerodinámico lateral sea nulo o cercano a 0. En la Figura 6 se presenta este coeficiente lateral evaluado en el sector izquierdo “cli” y derecho “cld”, y su composición total “cl”, tanto para el modelo liso como rugoso de este trabajo, representados con sub-índices “l” y “r”.

### Determinación del coeficiente global de arrastre aerodinámico

En la Figura 6 se presentan los coeficientes globales de arrastre de los modelos ensayados para diferentes números de Reynolds. Con trazo continuo los resultados del modelo liso, y con trazo discontinuo los resultados del modelo rugoso. Además, se presentan los coeficientes globales de los tres niveles definidos previamente, los cuales están distribuidos desde la base a la cima.

Para su cálculo se han utilizado las áreas tributarias de los niveles.

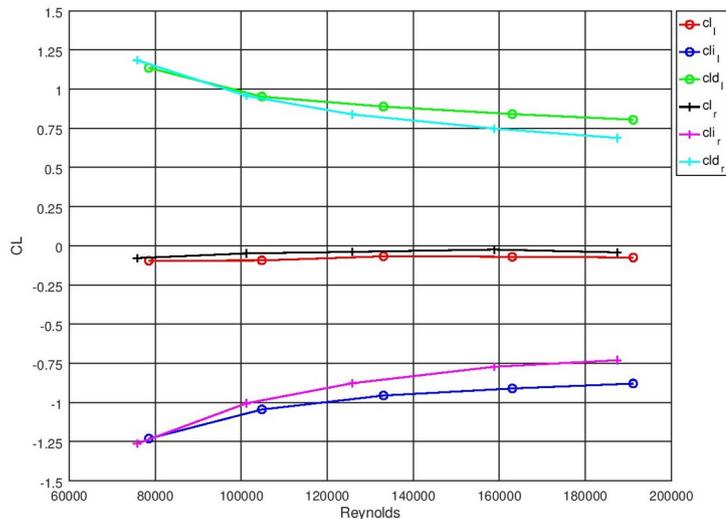
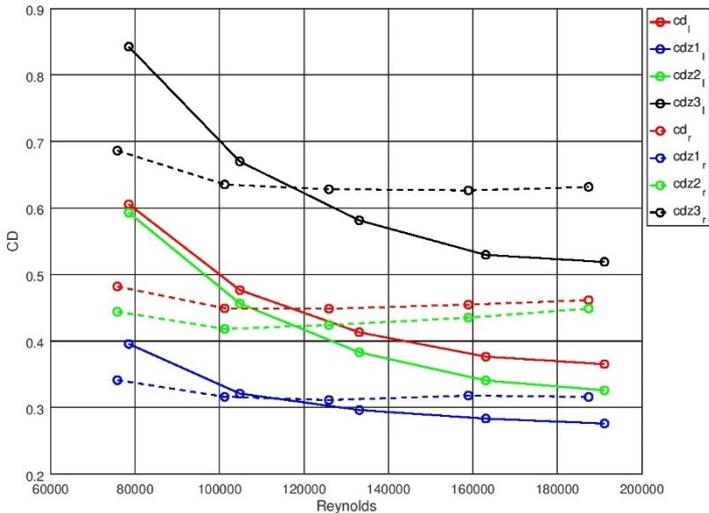


Fig. 6: Coeficiente aerodinámico lateral

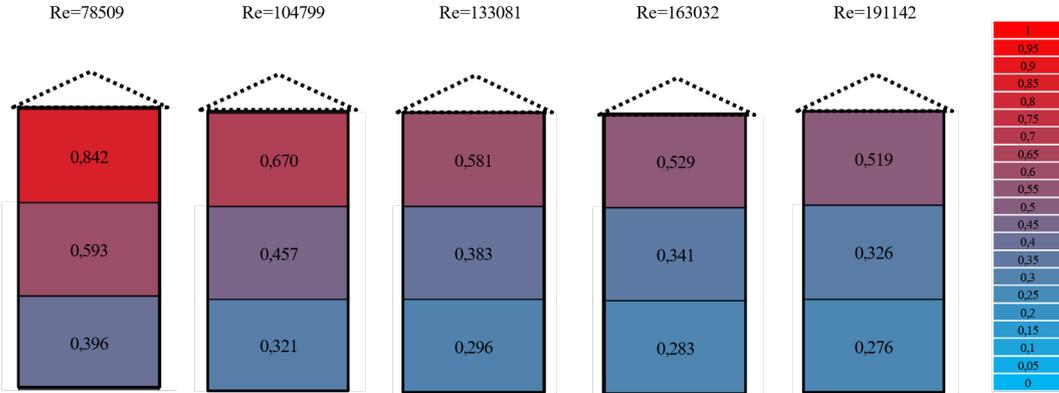
Se evidencia el efecto de la independencia del coeficiente global de arrastre con el número de Reynolds para el modelo rugoso, debido al incremento local de la turbulencia local producida por la rugosidad, aún inclusive a valores de Reynolds sub-críticos [7]. En contraste, el modelo liso muestra dependencia del coeficiente de arrastre con el número de Reynolds, la cual disminuye con valores superiores a  $1,3 \times 10^5$ , en coincidencia con lo expuesto por Cheung & Melbourne [8] que sugiere que a valores de alta intensidad de turbulencia de viento incidente mayores o iguales al 4%, la distribución de presiones en las paredes es independiente del número de Reynolds si el ensayo se

realiza a niveles superiores a  $1 \times 10^5$  de Reynolds, afectando así también el comportamiento de los coeficientes globales.

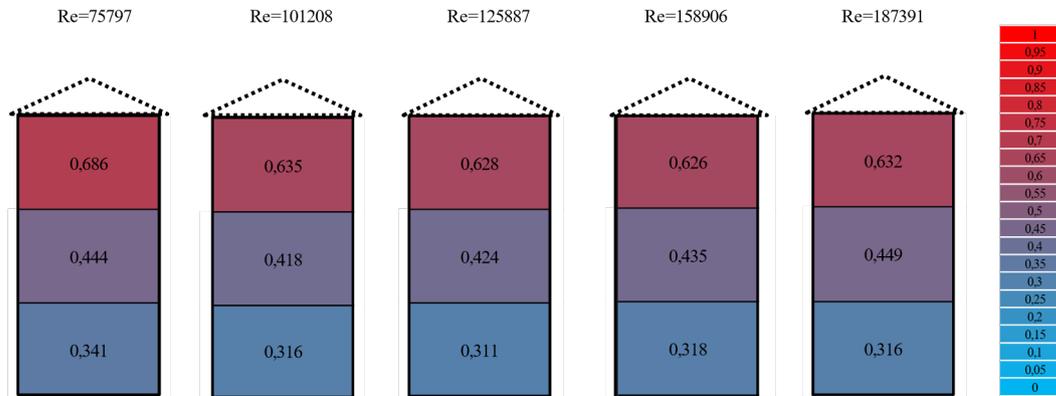


**Fig 7: Coeficientes aerodinámicos de arrastre globales totales y por nivel.**

A continuación, se presentan gráficas adicionales en vista lateral esquemática de los silos para los coeficientes de arrastre globales por nivel para el modelo liso (Figura 8) y para el modelo rugoso (Figura 9).



**Fig 8: Coeficientes de arrastre globales por nivel para modelo liso**



**Fig 9: Coeficientes de arrastre globales por nivel para modelo rugoso**

### Discusión de las normativas CIRSOC 102 y NBR6123

El Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones CIRSOC 102 en su anexo IV - Coeficientes de presión externa ( $c_p$ ) para depósitos, silos y tanques circulares define las presiones externas para depósitos, silos y tanques circulares, solo función del coeficiente de ráfaga "G", el coeficiente de presión externa " $C_p$ " y la presión dinámica " $q_h$ " calculada a la altura (h). El  $C_p$  depende del ángulo de incidencia del viento sobre la superficie del silo, pero no especifica la posible variación de los coeficientes con el número de Reynolds, ni relación de aspecto. Tampoco se definen detalles de acabado superficial que puedan afectar el valor de los coeficientes sobre las paredes, ha de tenerse en cuenta que muchos silos poseen diseños con chapas corrugadas, aditamentos rigidizadores, sistemas mecánicos o de inspección que cambiarían la condición de estudio siendo innegable la rugosidad superficial del mismo para el estudio de semejanza en el modelo. La norma menciona un estudio sobre el análisis de variación del coeficiente de presión local con el número de Reynolds para silos con distintas relaciones de aspecto y destaca la dificultad de realizar los ensayos experimentales para alcanzar número de Reynolds comparables entre modelo y prototipo.

La norma brasilera NBR 6123:1988 aporta para el cálculo de presiones externas, los coeficientes de presión externa contemplando ángulo de incidencia de viento, relaciones de aspecto, rugosidad y dos rangos de números de Reynolds para la definición del arrastre global en modelo liso. Según esta norma, el coeficiente global para una sección circular con relación de aspecto entre altura y diámetro, 2 a 1 resulta algo mayor al obtenido en el presente ensayo, para ambos tipos de superficies evaluadas habiendo seleccionado los coeficientes correspondientes a mayor número de Reynolds. Este análisis se resume en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Comparación coeficientes de arrastre globales entre ensayo y norma brasilera.

Cd	Reynolds	Cd
Liso NBR6123	$\leq$ 350000	0,7
Rugoso	--	0,8

NBR6123		
Liso ensayado	19114 2	0,36 5
Rugoso ensayado	18739 1	0,46 1

Se puede observar en la Tabla 1 que existe una correspondencia con los valores obtenidos en este trabajo y los publicados en la norma brasilera, la cual como es de esperar son mayores al intentar abarcar ciertos niveles de incertidumbre con el fin de certificar la seguridad para los cálculos.

### 3. Conclusiones

En primer lugar, fue posible verificar la simetría de la distribución lateral de presiones a través del análisis de los coeficientes laterales. Para el modelo liso, si bien no se verifica la independencia de los coeficientes de arrastre respecto al Re, sí es posible observar una clara disminución de su variación a partir de un valor específico. La independencia respecto al Re sí se verifica para el modelo rugoso, aún para valores de Re sub-críticos.

Los coeficientes aerodinámicos globales de arrastre para silo liso que se encuentren por encima del umbral de  $Re=130000$ , con intensidades de turbulencia del perfil de velocidades de viento incidente mayor o igual al 4%, son utilizados para ser contrastados con valores normativos. Existe una diferencia entre los resultados de los coeficientes de arrastre globales obtenidos en este trabajo y la norma NBR 6123. Por otro lado, hay eventos meteorológicos donde silos que se presuponen contruidos bajo norma, tienen fallas estructurales, evidenciando que se encuentran sometidos a ráfagas con velocidades de viento mayores a las previstas en las normas.

Todos estos aspectos deben ser considerados para dar continuidad a la investigación que se pretende desarrollar. Es así que, a partir de estos resultados preliminares, ya se han implementado una serie de ensayos de dos silos en tándem para analizar efectos de interacción aerodinámica no previstos por las normas mencionadas. Asimismo, se prevé evaluar el caso de grupos de cuatro o más silos, así como también analizar las presiones fluctuantes implementando el procedimiento de análisis cuasi-estático de cargas aerodinámicas.

### Referencias

- [1] Adem Dogangun; Zeki Karaca; Ahmet Durmus; and Halil Sezen, M. Cause of Damage and Failures in Silo Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Volume 23- 2, 2009.
- [2] P.A. MacDonald, K.C.S. Kwok, J.D. Holmes, Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Pointpressure measurements on isolated structures, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 31 (1988) 165–187.
- [3] Acir M. Loredo-Souza, Adrián Roberto Wittwer, “Avaliação em túnel de vento das ações e efeitos do vento sobre edificações, pessoas e o meio-ambiente” en “Turbulência”, Volume 9, Coleção Cadernos de Turbulência, Editores: Maria Luiza Sperb Indrusiak et al., ISBN 978-8585769-51-2, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, ABCM, UNISINOS, Escola Politécnica, RS, Brasil, 2014. .

- [4] “*Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones*”, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Reglamento CIRSOC 102: INTI, Buenos Aires, 2001.
- [5] 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.
- [6] 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, 157-176, 1978.
- [7] J.C.K. Cheung, W.H. Melbourne, Effects of surface roughness on a circular cylinder in supercritical turbulent flow. Twelfth Australasian Fluid Mechanics Conference, Australia 1995.
- [8] J.C.K. Cheung, W.H. Melbourne, Turbulence effects on some aerodynamic parameters of a circular cylinder at supercritical numbers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 14, 1–3, 1983, pp. 399-410.
- [9] “*Forças devidas ao vento em edificações*”. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-6123 –Rio de Janeiro, 1988.