

"ESTUDIOS DE CARGAS DE VIENTO SOBRE EDIFICIOS DEL PROYECTO EDIFICIO COSTANERA, CORRIENTES "

De Bortoli¹, Mario E.; Marighetti², Jorge O.; Wittwer³, Roberto A.; Udrizar²Lezcano, Ma. Sandra

¹Dr. Ingeniero Civil; ²Msc. Ingeniero Mecánico; ³Dr. Ingeniero Mecánico
Laboratorio de Aerodinámica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste
sudrizar@ing.unne.edu.ar; m_debortoli@yahoo.com.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos en un estudio realizado en el Túnel de Viento "Jacek P. Gorecki" de la UNNE, a solicitud de la empresa AET SA de la ciudad de Corrientes, Argentina, para determinar coeficientes de presión local, coeficientes de fuerza global, coeficientes de momento de volcamiento, coeficiente de momento torsor, determinación de la dirección y punto de aplicación de la fuerza resultante para 24 direcciones de viento incidente sobre un edificio torre a construirse en la ciudad de Corrientes, Argentina (Latitud 27°28'50"S y Longitud 58°50'02"O).

Los ensayos fueron realizados con una simulación de viento natural de espesor total, con exponente de la ley potencial de velocidades medias en correspondencia al tipo de terreno circundante. Las modificaciones del viento incidente, producto de la presencia de las edificaciones, fueron consideradas extendiendo la simulación física del entorno circundante hasta un radio de 200 metros. Las mediciones de presiones locales sobre la torre, se realizaron considerando el efecto de vecindad provocado por el entorno edilicio y topográfico inmediato. El modelo rígido utilizado fue construido en escala 1:200, reproduciéndose detalles de relevancia aerodinámica.

ABSTRACT

Numerous studies have been carried out to determine the effects of wind action on telecommunications towers and the components supported by them, the complexity of the determination of the acting loads.

Cellular antennas being one of the elements of greatest implantation and with little experimental information known, in Aerodynamics Laboratory of the Engineering Faculty of the UNNE wind tunnel tests were carried out with reduced models. Were recorded values of static pressure measurements, using a 64 simultaneous pressure channels and remote acquisition systems. Average, instantaneous local pressure and drag coefficients were obtained, for two models of cellular antennas, analyzed individually and in sets of three elements, for different incident wind directions and three inclinations respect to the vertical. The behavior of flow around the antennas was characterized with multivariate analysis techniques. Principal Component Analysis (PCA) and Independent Component Analysis (ICA) methods were applied to the fluctuating pressures on the outer surface of the reduced model.

Introducción

El Reglamento Argentino de Acción del Viento Sobre las Construcciones, CIRSOC 102 [1], especifica coeficientes de carga aplicables a estructuras de formas regulares y de pequeño porte. El reglamento aclara que cuando la estructura posee grandes dimensiones, formas geométricas inusuales o efectos de vecindad por la presencia de edificios cercanos es necesario estudiar más detalladamente la estructura en túnel de viento. Esto además permite lograr un proyecto más seguro desde el punto de vista de las acciones del viento.

En 1954 Jensen [2] dio a conocer una comparación de resultados de mediciones de presión sobre una casa en escala natural y sobre un modelo de la misma, a escala reducida, en túnel de viento. Los ensayos en túnel comprendían mediciones con modelos sometidos a flujo uniforme y suave y con modelos inmersos en la capa límite desarrollada sobre placas rugosas. A partir de éste y posteriores trabajos publicados a principio de la década del 60 quedó definitivamente establecido que una determinación de cargas de viento que tenga en cuenta los criterios de semejanza entre modelo y prototipo, requiere un particular tipo de túnel de viento conocido como túnel de capa límite, diferente de aquellos de uso aeronáutico. Para estos túneles se han desarrollado técnicas de simulación de la capa límite atmosférica que permiten reproducir el perfil de velocidades medias y las características turbulentas del flujo atmosférico. El Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, que tiene como principal campo de aplicación el estudio del comportamiento de las estructuras dentro de la capa límite atmosférica, cuenta con un túnel de capa límite y el instrumental necesario para realizar ensayos estructurales con simulación de la capa límite atmosférica.

El Reglamento, además, establece en su Capítulo 6 cuales deben ser las condiciones mínimas a cumplir en los ensayos:

1. La capa límite atmosférica natural ha sido modelada para tener en cuenta la variación de la velocidad del viento con la altura.
2. Las escalas de la componente longitudinal de la turbulencia atmosférica están modeladas aproximadamente a la misma escala que la usada para modelar el edificio u otra estructura.
3. El edificio u otra estructura modelada, las estructuras y topografía circundantes son geoméricamente similares a sus contrapartes en escala natural, excepto que, para edificios de baja altura que reúnan los requisitos del artículo 5.1, se permitirán ensayos para el edificio modelado en un único sitio de exposición tal como se define en el artículo 5.6.1.
4. El área proyectada del edificio u otra estructura y alrededores modelados es menor que el 8% del área de la sección transversal de ensayo, a menos que se haga una corrección por bloqueo.
5. Se ha tenido en cuenta el gradiente de presión longitudinal en la sección de ensayo del túnel de viento.
6. Los efectos del número de Reynolds sobre las presiones y las fuerzas están minimizados.
7. Las características de respuesta del instrumental del túnel de viento son

consistentes con las mediciones requeridas.

En este trabajo se presenta el estudio realizado por el Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). El trabajo consistió en determinar las acciones provocadas por viento atmosférico sobre una torre a construirse en la ciudad de Corrientes, Argentina, latitud $27^{\circ}28'50''S$ y longitud $58^{\circ}50'02''O$, mediante ensayo en túnel de viento en condiciones controladas sobre un modelo a escala reducida que satisfacen leyes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. En el ensayo se determinaron las cargas provocadas por el viento sobre el edificio torre, considerando el efecto de vecindad mediante la reproducción del entorno edilicio y superficial inmediato. Se determinaron para la torre coeficientes de presión local, coeficientes de fuerza global, coeficientes de momento de volcamiento, coeficiente de momento torsor, determinación de la dirección y punto de aplicación de la fuerza resultante para 24 direcciones de viento incidente.

Descripción del Ensayo en Túnel de Viento

Los ensayos fueron realizados sobre un modelo rígido a escala reducida conforme al Capítulo 6 (Método 3-Procedimiento del túnel de viento) del Reglamento CIRSOC 102 [1], que se transcribieron en la sección anterior. Se tuvieron en cuenta las condiciones reales de vecindad en torno a la estructura, las características medias y los parámetros de turbulencia del viento atmosférico correspondiente al terreno de emplazamiento de la estructura. Se construyó un modelo reducido del complejo de torres, con su entorno natural y artificial reproducido hasta aproximadamente 2,5 veces la altura de la torre, en escala geométrica 1/200, compatible con la escala del viento atmosférico simulado en el túnel de viento. 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.

Se midieron las presiones medias y fluctuantes en la superficie exterior del modelo por medio de tomas de presión estática, utilizando un sistema de medición Scanivalve de 96 canales y transductores electrónicos Honeywell PC 163. Posteriormente se determinaron coeficientes de presión local correspondientes a las tomas de presión. Los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde 0° a 360° , a intervalos de 15° . Complementariamente, se determinaron coeficientes de presión local sobre elementos estructurales específicos. Para cada dirección de viento analizada, se determinaron por integración de los coeficientes local de presión en su área tributaria, los coeficientes de fuerza global, momento de volcamiento, momento torsor, punto de aplicación, dirección y sentido de la fuerza resultante, como además los coeficientes globales respectivos.

Descripción del Túnel de Viento de la UNNE

El túnel "Jacek P. Gorecki" de la UNNE (Figuras 1 y 2), es un túnel de capa límite de circuito abierto, también denominado tipo Eiffel. La longitud total del túnel es de 39,65 m. La cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho \times 1,8 m de alto \times 22,8 m de largo. Posee dos mesas de ensayos giratorias de 1,2 m de diámetro; una a 3,8 m del inicio de la cámara (mesa I), y la otra a 19,4 m (mesa II). 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 mesa II [3]. La regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico.

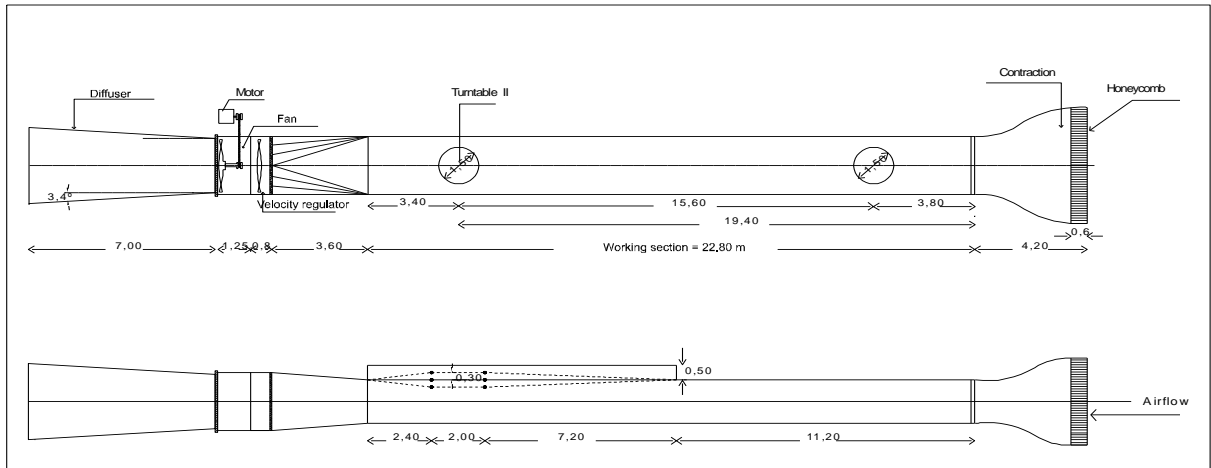


Figura 1. Planta y vista del túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE.



Figura 2. Túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE.

Técnica de Simulación de Capa Límite

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 [4], que permiten obtener escalas de simulación adecuadas para su utilización en el área estructural. La longitud de rugosidad superficial sobre el piso del túnel, durante los ensayos se estableció en función de la categoría de terreno a reproducir. A barlovento, se ubican dos generadores de vorticidad del tipo de Counihan [5,6] para generar un déficit inicial de cantidad de movimiento y distribuirlo en altura para obtener características semejantes a las atmosféricas (Figura 3).



Figura 3. Equipamiento de simulación de viento natural.

La Figura 4 muestra las principales características del escurrimiento incidente utilizado en estos ensayos; perfil de velocidades medias y perfil de intensidad turbulencia. El escurrimiento se puede asociar al de una zona suburbana ($n = 0,09$ y $0,21$). Una discusión más detallada de estas simulaciones puede ser encontrada en las referencias [7,8].

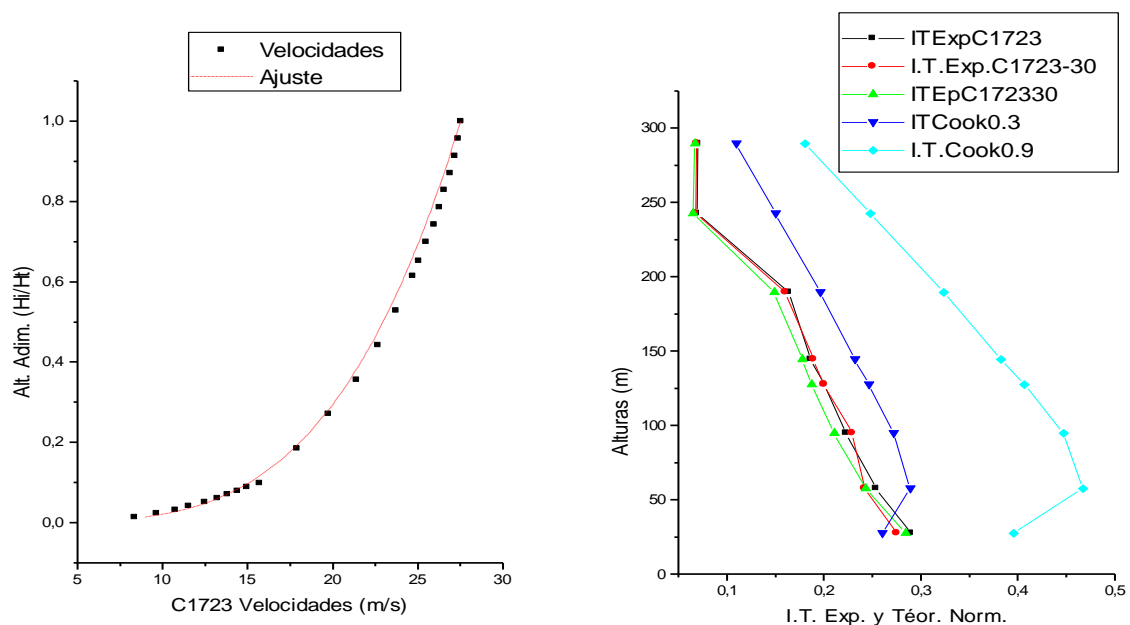


Figura 4. Perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia.

Descripción del Modelo reducido del Complejo de Torres

Para que los coeficientes de presión obtenidos en el túnel de viento sobre el modelo guarden correspondencia con la estructura real deben respetarse condiciones de semejanza. Debe tenerse en cuenta que las características del flujo incidente sean semejantes a las del viento natural incidente en la estructura real, y el modelo debe guardar una semejanza geométrica con la estructura real dentro de un rango de

escalas asociados a escalas geométricas presentes en el flujo incidente simulado. El modelo de las torres fue construido con una escala geométrica de 1:200, reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica (Figura 5). Para cada una de las direcciones de viento analizadas se reprodujeron la rugosidad y los edificios cercanos.

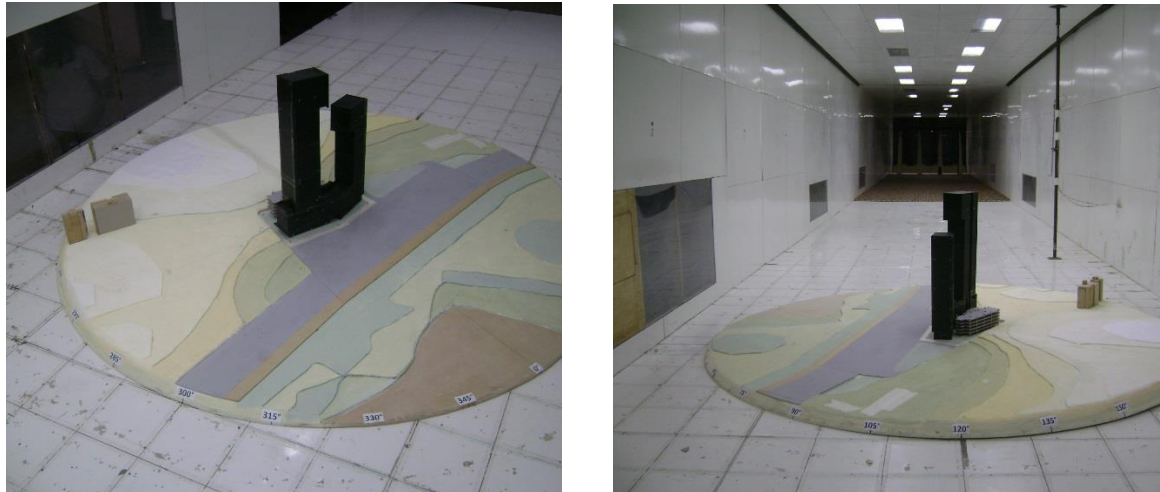


Figura 5. Modelo del complejo de torres del Edificio Costanera y reproducción del entorno inmediato en la cámara de ensayos del túnel de viento.

La estructura del modelo está compuesta por las Torres 1 y 2, y una base común a ambas, que denominaremos Edificio Base, cuya altura es constante de 0,087 metros, La base se desarrolla en forma no paralela, ya que en correspondencia con la unión de Torre 1 y 2, presenta un quiebre de 26° , con un frente de 0,235 m para la Torre 1 y de 0,195 m para la Torre 2 con una profundidad constante en todo lo largo de 0,085 m. En la parte trasera observando desde el Río Paraná, esta adosado el Edificio de Cochera, en correspondencia con el quiebre de 26° , con una superficie en planta dada por 0,2635 m de largo (aproximadamente alineado al eje longitudinal del Edificio Base) por 0,07425 m de ancho y una altura de 0,05625 m. Ambas Torres comienzan a partir del nivel de 0,114 m. Todos estos valores están dados tomando como referencia las dimensiones del prototipo las cuales son para el Edificio Base altura 17,40 m, profundidad 17m conformado por 5 pisos, con un frente para para la Torre 1 de 47 m y para la Torre 2 de 39 m. Las dimensiones de la Torre 1 son de 105,9 m de altura conformado por 34 pisos, en el caso de la Torre 2 su altura es de 76,80 m conformado por 24 pisos.

En el modelo la Torre 1 tiene una altura medida desde la base de la representación del terreno de 0,5295 m. En su longitud presenta desde el inicio una sección transversal de 0,105 m en el sentido del eje longitudinal del Edificio Base con un ancho de 0,085 m hasta la cota de 0,459 m, a partir de esa altura se modifica con una profundidad de 0,143 m, manteniendo el ancho constante respecto al tramo inferior de 0,085 metros.

Respecto a la Torre 2, la altura medida desde la representación de la base del terreno es de 0,384 m. En su longitud presenta desde el inicio una sección transversal de 0,083 m en el sentido del eje longitudinal del Edificio Base con un ancho de 0,085 m hasta la cota de 0,324 m, a partir de esa altura se modifica con una profundidad de

0,113 m, manteniendo el ancho constante respecto al tramo inferior de 0,085 m.

En Figura 6 se indican la orientación de los ejes de referencia adoptados, la dirección de viento incidente correspondiente a 0° y el sentido de giro para las sucesivas rotaciones de 15° que determinan las 24 direcciones de viento analizadas.

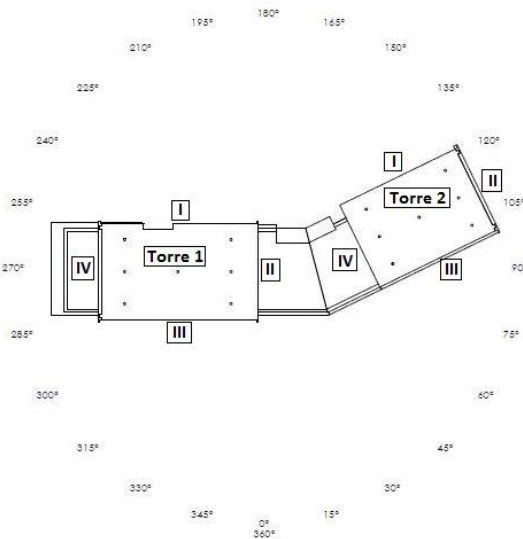


Figura 6. Ubicación del modelo del edificio torre en planta respecto a las direcciones viento incidente.

Para las direcciones de viento correspondiente a las direcciones de 300° , 315° , 330° , 345° , 0° , 15° , 30° , 45° y 60° la categoría de terreno de la rugosidad superficial se corresponde a un terreno de campo abierto, en tanto, las restantes direcciones de viento son consideradas con categoría de viento suburbano (potencia del perfil de variaciones de velocidades media con la altura de 0,09 y 0,21 respectivamente).

Para la determinación de las acciones del viento se supuso que las Torres 1 y 2 se comportan como estructuras independientes, siendo denominada Torre 1 la más alta y Torre 2 la más baja. Así, ambas torres se instrumentaron y se determinaron los coeficientes de presión local, fuerza, momento de volcamiento y torsor de forma independiente. El denominado Edificio Base, es la estructura común a ambas torres, que, por su altura, solamente se determinaron coeficientes de presión local.

Para determinar el baricentro de cada una de las torres, se determinaron los momentos estáticos correspondientes considerando que las rigideces permanecen constantes en altura, evidenciando en la parte superior modificaciones en las dimensiones geométricas en planta menores que no modifican la hipótesis planteada (Figura 7).

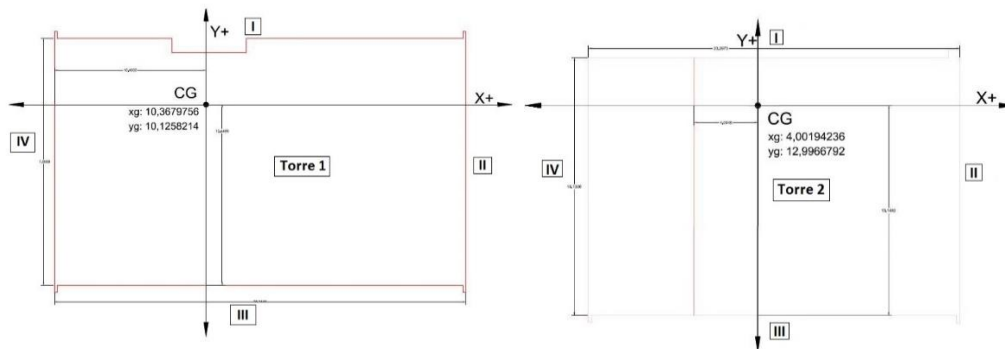


Figura 7. Ubicación del baricentro y ejes de referencia adoptados para Torre 1 y 2.

Descripción del Instrumental utilizado

Para determinar las características de la simulación de la capa límite atmosférica en el túnel de viento se realizaron mediciones de las velocidades medias y fluctuantes. Las velocidades medias se determinaron con tubos de Pitot-Prandtl y micromanómetro, tipo Betz. Para el análisis de las velocidades fluctuantes se utilizó un anemómetro de hilo caliente Dantec 56C con una placa de adquisición de datos Computer Board PCI-DAS 1602/16 y los registros se procesaron con software desarrollado en este laboratorio. Mediante el procesamiento de datos se obtuvieron intensidades de turbulencia y espectros de potencia. Los registros de presiones fluctuantes de las tomas de presión ubicadas sobre la superficie de la torre, fueron obtenidos mediante un sistema utilizando un sistema de medición Scanivalve de 96 canales y transductores electrónicos Honeywell PC 163.

En todos los ensayos se registraron las velocidades del escurrimiento medio a la altura de referencia equivalente a la altura máxima del modelo en condición no perturbada, es decir a barlovento del modelo para evitar interferencias, utilizando un tubo Pitot-Prandtl. Esto permite obtener también la presión dinámica de referencia no perturbada q_z , en forma simultánea a las mediciones de las presiones fluctuantes sobre la torre.

Distribución de Tomas de Presión Estática en el modelo

La distribución de tomas de presión sobre el modelo presenta diferentes configuraciones de acuerdo a los aspectos geométricos de diseño de la estructura, teniendo en cuenta la posibilidad de que produzcan fenómenos aerodinámicos localizados típicos en función de sus características y dimensiones.

Como se observa en Figura 6, las tomas de presión sobre las Torres 1 y 2 se distribuyeron sobre las superficies designadas I, II, III y IV.

Así, es posible considerar dos grupos de tomas teniendo en cuenta su localización y su posterior aplicación al análisis de cargas de viento, locales o globales, y a la prevención de efectos localizados de viento, no necesariamente asociados a cargas locales.

El primer conjunto de tomas está asociado con el análisis de cargas globales

provocada por el viento sobre la estructura y se caracteriza porque las tomas se ubican en las áreas expuestas directamente a la acción del viento (Figura 8 y 9, respectivamente).



Figura 8. Ubicación de las tomas de presión sobre la estructura Torre 1.

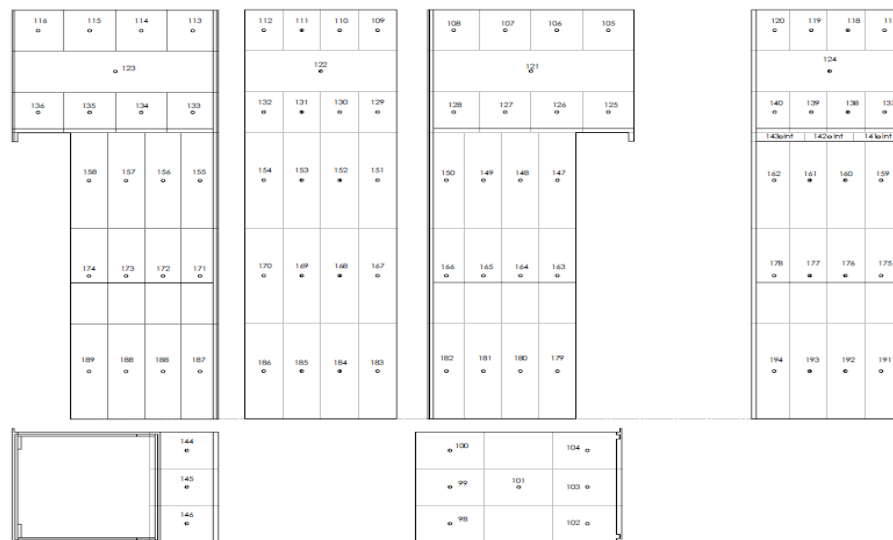


Figura 9. Ubicación de las tomas de presión sobre la estructura Torre 2.

El segundo grupo, como se observa en Figura 8 y 9, corresponde a la zona de balcones y azotea, las que se instrumentaron con tomas de presión estática externas en lugares aerodinámicamente representativos. En estos puntos sólo se consignan valores de coeficientes local de presión, ya que refieren a efectos locales dados por detalles geométricos de diseño o como ocurre en azotea, para obtener mediciones que reporta efectos de ráfagas de viento, relacionadas con el efecto de Confort.

Respecto al edificio Base se distribuyeron las tomas de presión local en su superficie, pero dada la baja altura y sus dimensiones en planta ampliamente superiores a las de las Torres, se consideró que no contribuye con los esfuerzos aerodinámicos en las Torres, por lo que solamente se calcularon los coeficientes de presión local. La ubicación se señala en Figura 10 y Figura 11.

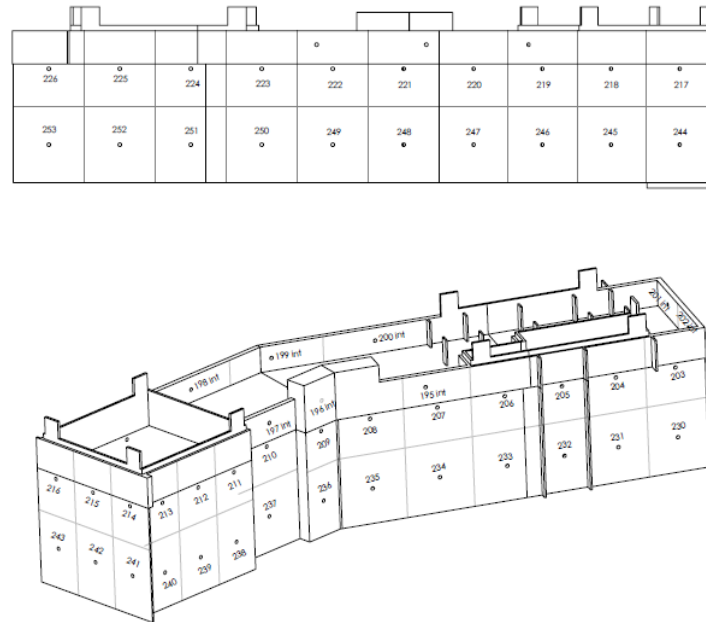


Figura 10. Ubicación de las tomas de presión sobre el Edificio Base.

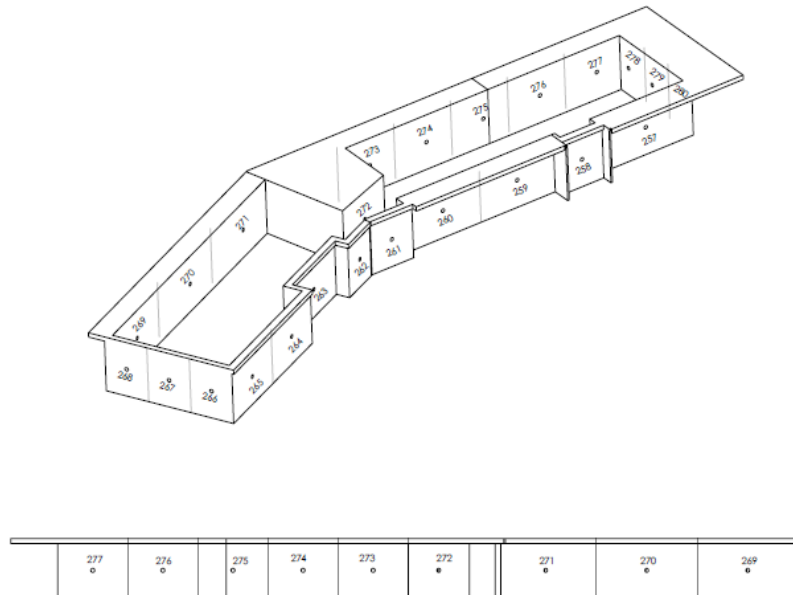


Figura 11. Ubicación de las tomas de presión sobre el Edificio Base.

Coeficiente de Presión Local, de Fuerza y Momento Global

Se determinaron 279 coeficientes de presión local distribuidos sobre las superficies exteriores de las torres. Conceptualmente, los coeficientes son cargas adimensionalizadas mediante parámetros de referencia. Conforme a la literatura especializada, se dan las siguientes definiciones que son compatibles con las que indica el reglamento CIRSOC 102. El coeficiente de presión local exterior está definido por la expresión (1):

$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t) dt}{q} \quad (1)$$

Siendo:

Δp : la diferencia de presión estática entre el punto de medición (toma de presión sobre la superficie) y la presión estática de referencia (toma estática del tubo Pitot-Prandtl ubicado en la posición de referencia). La altura donde se midió la presión dinámica de referencia con el Tubo Pitot-Prandtl es de 0,605 m.

q : es la presión dinámica medida a la altura de referencia. En este ensayo se correspondió con la máxima altura de la Torre 1.

T : Intervalo de tiempo de adquisición.

\bar{c}_p : Coeficiente de presión local medio.

Los coeficientes de presión local se determinaron a partir de las presiones fluctuantes medidas en cada toma, obteniendo el coeficiente de presión local medio, rms, mínimo y máximo, para cada ángulo de incidencia del viento (Figura 6). Valores positivos de los coeficientes de presión local corresponden a acciones dirigidas hacia la superficie.

El coeficiente de presión local rms está definido por la expresión (2):

$$\tilde{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q} \quad (2)$$

Siendo:

\tilde{c}_p : Coeficiente de presión local rms.

Los coeficientes de presión local máxima y mínima están definidos por (3):

$$\hat{c}_p = \frac{\Delta p(t)_{max}}{q} \quad y \quad \check{c}_p = \frac{\Delta p(t)_{min}}{q}$$

Siendo:

$\Delta p(t)$: Valor máximo y mínimo de presión correspondiente al registro medido

$\hat{c}_p; \check{c}_p$: Coeficiente local máximo o mínimo respectivamente.

Las fuerzas normales a las superficies de las torres provocadas por la presión estática local aplicadas en las áreas tributarias superficiales, se proyectaron en los ejes ortogonales X e Y. Los coeficientes de fuerza para cada eje, C_{Fx} y C_{Fy} definidos por las expresiones (4), se determinaron a partir de la integración de los coeficientes de presión local por sus áreas tributarias divididos por la presión dinámica de referencia, por la expresión (2):

$$C_{fx} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{c}_{pj} A_j \sin \beta_j}{A_R} \quad y \quad C_{fy} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{c}_{pj} A_j \cos \beta_j}{A_R} \quad (4)$$

Siendo:

n: número de tomas.

\bar{c}_{pj} : es el coeficiente de presión media correspondiente a la toma j.

A_j : es el área tributaria de la toma j.

β_j : ángulo que forma la fuerza normal superficial respecto al eje y positivo en sentido contrario a las agujas del reloj.

A_R : área maestra de referencia.

C_{fx} o C_{fy} : Coeficiente global de fuerza sobre el eje x o y respectivamente.

El área maestra de referencia, A_R , definida como:

$$A_R = W H$$

Donde,

W : es el ancho de menor dimensión de la superficie en planta de cada torre.

H : es la altura de las Torres medidas desde la parte superior del Edificio Base, siendo la más alta la Torre 1 y la restante Torre 2.

Además, se determinó el punto de aplicación y dirección de la fuerza global sobre la estructura.

El ángulo de la dirección de la fuerza global se determinó como el cociente entre

$$\alpha_R = \frac{C_{Fx}}{C_{Fy}}$$

El punto de aplicación de la fuerza resultante (A_{PR}) para las direcciones de viento analizadas (α_v) es el cociente entre la altura de aplicación adimensionalizada respecto a la altura de referencia utilizada.

Coefficientes de momento de volcamiento (CV_R)

De igual manera, los coeficientes de momento de volcamiento se determinaron a partir de los coeficientes de presión, integrando las acciones sobre cada área tributaria y multiplicando por el brazo de palanca de cada fuerza tributaria respecto al eje referido. Los coeficientes de momento de volcamiento sobre cada eje, CV_x y CV_y , son definidos por las expresiones (5):

$$CV_x = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{c}_{pj} A_j \cos \beta_j h_j}{A_R W} \quad y \quad CV_y = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{c}_{pj} A_j \sen \beta_j h_j}{A_R W} \quad (5)$$

Donde,

h_j : altura de toma de presión j medida desde nivel superior del Edificio Base

$$CV_R = \sqrt{(CV_x)^2 + (CV_y)^2}$$

Coefficientes de momento Torsor (CM_T)

El coeficiente de momento torsor se determinó a partir de los coeficientes de presión, integrando las acciones sobre cada área tributaria y multiplicando por el brazo de palanca de cada fuerza tributaria respecto al centro de rigidez de la sección transversal de la estructura. Así, los momentos de giro de cada componente de fuerza respecto al eje z resultan en las expresiones (6):

$$C_{MZ_y} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{c}_{pj} A_j \cos \beta_j x_j}{A_R W} \quad y \quad C_{MZ_x} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{c}_{pj} A_j \sen \beta_j y_j}{A_R W} \quad (6)$$

Donde,

x_j ; y_j : son las distancias desde la toma a el centro de rigidez dela sección transversal (Anexo B, Tabla 1)

El coeficiente de momento torsor resultante, es definido como:

$$C_{MT} = C_{MZ_x} + C_{MZ_y}$$

En Anexo A y B se muestran los coeficientes de presión local medio, mínimo, máximo,

rms y valores de fuerzas globales para las direcciones ortogonales baricéntricas, con sus componentes, dirección y sentido y su punto de aplicación, con los coeficientes globales de fuerza, momento de volcamiento y torsor para cada dirección de viento incidente (α_v) para la Torre 1 y 2 respectivamente.

Aplicación de Coeficientes

Para extrapolar a condiciones de escala real los valores de cargas obtenidos en el modelo analizado en este trabajo, debe realizarse el siguiente procedimiento:

Cargas Locales

Las cargas locales se obtienen a partir de multiplicar los coeficientes de presión local por la presión dinámica del sitio de emplazamiento y por el área tributaria de la toma considerada.

Así, la presión dinámica de referencia utilizada en este trabajo se correspondió con la altura máxima del modelo de la torre. El procedimiento exige el cálculo de la velocidad de referencia, usualmente obtenida a 10 m de altura, siguiendo los procedimientos estipulados en los reglamentos de cada país. Posteriormente esta velocidad debe extrapolarse a la altura utilizada en el ensayo en túnel de viento, que se corresponde con la altura máxima del edificio Torre 1.

Para la determinación del área de referencia, es importante diferenciar la definición de área tributaria y área de referencia. El área tributaria define el espacio de la superficie de la estructura donde se admite una correlación espacial unitaria de los coeficientes de presión local, es decir, el valor del coeficiente de presión local permanece constante sobre esa área. De esta manera, para determinar una carga localizada sobre un elemento estructural de interés, se debe ubicar el coeficiente de presión local que se corresponde con esa área tributaria y multiplicar el coeficiente de presión local por la presión dinámica, determinada anteriormente, y por el área real del elemento estructural en cuestión. Las áreas tributarias correspondientes a cada toma de presión local fueron definidas como la separación media ente tomas en la dirección horizontal y vertical respectivamente (niveles de pisos).

Para incluir las fluctuaciones de las cargas es necesario adicionar a los valores medios de los coeficientes de presión local el valor del rms respectivo, donde la presión dinámica del sitio de emplazamiento se debe corresponder con una velocidad promediada sobre un intervalo de tiempo de 10 minutos a una hora.

Cargas Globales

Las cargas globales se obtienen a partir de multiplicar los coeficientes globales por la presión dinámica del sitio de emplazamiento y por el área de referencia considerada. La presión dinámica de referencia utilizada, de igual manera que en el caso anterior, se corresponde con la altura máxima del modelo de la torre y el procedimiento de cálculo de la velocidad de referencia se realiza con las mismas condiciones.

Discusión de resultados

Se midieron las presiones medias y fluctuantes en la superficie exterior del modelo por medio de tomas de presión estática, donde se determinaron coeficientes de presión local correspondientes a las tomas de presión. Los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde 0° a 360° , a intervalos de 15° determinándose coeficientes de presión local sobre elementos estructurales específicos. En cada dirección de viento, se determinaron por integración coeficientes local de presión en su área tributaria, coeficientes de fuerza global, momento de volcamiento, momento torsor, punto de aplicación, dirección y sentido de la fuerza resultante, así como, coeficientes globales respectivos.

En Tabla 1 y Tabla 2 se muestran los coeficientes globales obtenidos de los ensayos en túnel de viento de las Torre 1 y Torre 2; se muestran las magnitudes coeficientes de fuerza, C_f , ángulo de las resultantes, α_R , coeficientes de volcamiento, C_{MV} , coeficiente de momento torsor, C_{MT} , y excentricidad, $exc.$, de la resultante en cada dirección de viento α_v analizada.

α_v	C_f	α_R	C_{MV}	C_{MT}	$exc.$
0	1,95	80	4,55	-0,24	-0,013
15	1,72	88	4,04	-0,20	-0,012
30	1,59	105	3,69	-0,04	-0,003
45	1,48	121	3,40	0,08	0,006
60	1,35	135	3,16	0,19	0,015
75	1,00	157	2,47	0,30	0,032
90	0,64	-179	1,82	0,21	0,034
105	0,96	-122	2,63	0,16	0,017
120	1,28	-119	3,10	0,21	0,017
135	1,32	-108	3,20	0,21	0,017
150	1,44	-89	3,47	0,20	0,015
165	1,64	-74	3,97	0,16	0,010
180	0,97	-74	1,46	0,03	0,003
195	1,69	-86	3,95	0,06	0,004
210	1,74	-69	4,00	-0,07	-0,003
225	1,73	-59	4,04	-0,12	-0,007
240	1,57	-37	3,71	-0,14	-0,009
255	1,30	-6	3,03	-0,12	-0,010
270	1,21	-2	2,82	-0,22	-0,019

α_v	C_f	α_R	C_{MV}	C_{MT}	exc.
285	1,21	37	2,83	-0,33	-0,029
300	1,52	35	3,51	-0,30	-0,021
315	1,74	58	3,90	-0,22	-0,013
330	1,77	76	3,99	-0,10	-0,006
345	1,88	91	4,29	-0,08	-0,004

Tabla 1 - Coeficiente de Fuerza, ángulo de Resultante, Coeficiente de Volcamiento, Coeficiente de Momento Torsor y Excentricidad de la Resultante para la Torre 1 de cada dirección de viento α_v .

α_v	C_f	α_R	C_{MV} (Nm)	C_{MT}	Exc
0	1,80	112	3,60	-0,088	-0,004
15	2,02	105	4,18	-0,290	-0,012
30	1,98	100	4,15	-0,370	-0,016
45	1,77	94	3,65	-0,330	-0,016
60	1,81	63	3,74	-0,650	-0,031
75	1,44	48	3,00	-0,570	-0,034
90	1,17	15	2,41	-0,370	-0,028
105	1,16	-7	2,34	-0,320	-0,024
120	1,18	0	2,34	-0,430	-0,031
135	1,53	-33	3,17	-0,280	-0,016
150	1,71	-52	3,47	-0,014	-0,001
165	1,71	-68	3,47	0,101	0,005
180	1,71	-90	3,50	0,224	0,011
195	1,79	-99	3,65	0,381	0,018
210	1,62	-95	,35	0,317	0,017
225	1,38	-99	2,85	0,269	0,017
240	1,30	-106	2,68	0,236	0,016
255	1,27	-107	2,58	0,229	0,015
270	0,86	-95	1,55	0,178	0,018
285	0,29	152	0,48	0,058	0,017
300	0,85	177	1,67	0,244	0,025
310	1,21	155	2,42	0,257	0,018

α_v	C_f	α_R	C_{MV} (Nm)	C_{MT}	Exc
330	1,45	135	2,91	0,207	0,012
345	1,62	122	3,30	0,094	0,005

Tabla 2 - Coeficiente de fuerza, ángulo de resultante, coeficiente de volcamiento, coeficiente de momento torsor y excentricidad de la resultante para la Torre 2 de cada dirección de viento α_v .

Es posible establecer, en relación a las componentes de las cargas de viento, que el valor máximo de la fuerza provocada por el viento se produce para la Torre 2 a una dirección de viento de 15° con un valor de C_F de 2,02 y un C_{MV} de 4,18. En Torre 1, en tanto, el valor máximo de la fuerza provocada por el viento se produce para una dirección de viento de 0° con un valor de C_F de 1,95 y un valor máximo de C_{MV} de 4,18.

Con relación al momento torsor el valor máximo se produce para la Torre 2 para la dirección de viento de 60° con un valor de C_{MT} de -0,650. Respecto a la Torre 1 el valor máximo se produce para la dirección de viento de 315° con una magnitud de C_{MT} de -1,360.

Los coeficientes de presión local son determinados en 279 puntos distribuidos sobre las superficies exteriores de las torres. Los coeficientes de presión local se determinaron a partir de las presiones fluctuantes medidas en cada toma, de forma tal que fue posible obtener el coeficiente local medio, rms, mínimo y máximo, respectivamente para cada ángulo de incidencia del viento.

En Tabla 3 se observan las magnitudes de coeficientes de presión local medio, máximo, mínimo y desvío estándar en algunas tomas, cara II de la Torre 1, $\alpha_v = 0^\circ$.

Torre 1, $\alpha_v = 0^\circ$				
Toma	CP_{Med}	CP_{Max}	CP_{Min}	CP_{RMS}
13	-1,57	-2,65	-0,89	0,15
14	-1,70	-2,80	-1,08	0,15
15	-1,63	-2,41	-1,04	0,15
25	-1,73	-2,80	-0,70	0,25
34	-1,76	-2,90	-0,54	0,12
35	-2,29	-3,44	-1,25	0,15
56	-1,51	-2,62	-0,77	0,17
57	-1,50	-2,57	-0,83	0,16
72	-1,59	-2,83	-0,50	0,18
73	-1,57	-2,80	-0,86	0,26
89	-2,12	-4,71	-1,04	0,16

Tabla 3 - Coeficiente de presión local medio, máximo, mínimo y desvío estándar en cara II de la Torre 1, $\alpha_v = 0^\circ$.

Con el viento incidente a 0° son obtenidos los valores más elevados en los coeficientes de succión entre las dos torres, caras II de la Torre 1 y cara IV de la Torre 2, siendo superiores en las tomas ubicadas sobre la Torre 1.

En la dirección de viento de 195° , opuesta a al anterior, el fenómeno se repite para las tomas ubicadas en la cara IV de la torre 2, como se observa en Tabla 4.

Torre 2, $\alpha_v = 195^\circ$.				
Toma	CP_{Med}	CP_{Max}	CP_{Min}	CP_{RMS}
119	-1,47	-2,43	-0,54	0,27
120	-1,59	-2,73	-0,77	0,27
124	-1,46	-2,40	-0,65	0,15
139	-1,62	-2,75	-0,61	0,15
140	-2,02	-3,61	-0,73	0,15

Tabla 4 - Coeficiente de presión local medio, máximo, mínimo y desvío estándar en cara II de la Torre 2, $\alpha_v = 195^\circ$.

En Tabla 5 se muestran los valores de coeficientes de presión local medio, máximo, mínimo y desvío estándar en algunas tomas, cara III de la Torre 2, $\alpha_v = 90^\circ$.

Torre 2, $\alpha_v = 90^\circ$				
Toma	CP_{Med}	CP_{Max}	CP_{Min}	CP_{RMS}
113	-0,85	-1,98	0,09	0,12
114	0,06	-0,77	0,50	0,14
115	0,01	-0,32	0,25	0,12
116	0,06	-0,26	0,32	0,11
123	0,11	-0,84	0,65	0,20
133	-0,63	-1,38	0,11	0,10
134	-0,21	-1,17	0,47	0,10
135	-0,01	-0,82	0,30	0,15
136	-0,03	-0,47	0,20	0,18
155	-0,64	-1,30	-0,04	0,11
156	-0,57	-1,62	0,39	0,11
157	-0,25	-1,22	0,34	0,13
158	-0,27	-0,95	0,05	0,17
171	-0,64	-1,29	0,02	0,15
172	-0,57	-1,41	0,44	0,13
173	-0,33	-1,36	0,23	0,13
174	-0,30	-0,99	-0,01	0,13
187	-0,64	-1,88	0,30	0,13
188	-0,43	-1,56	0,55	0,13
189	-0,26	-0,99	0,08	0,13

Torre 2, $\alpha_v = 90^\circ$				
Toma	CP _{Med}	CP _{Max}	CP _{Min}	CP _{RMS}
190	-0,23	-1,27	0,23	0,11

Tabla 5 - Coeficiente de presión local medio, máximo, mínimo y desvío estándar en cara II de la Torre 2, $\alpha_v = 90^\circ$.

Con viento incidente a 90° los valores obtenidos en la cara III de la Torre 2, muestra altos coeficientes de succión para una situación de viento incidiendo casi a barlovento para esa cara.

Conclusiones

El presente trabajo desarrolla una descripción de los ensayos en túnel de viento de capa límite de circuito abierto, para la determinación de cargas aerodinámicas actuantes sobre un modelo de un complejo de edificios con configuración aerodinámica particular. El modelo reducido utilizado incluye la reproducción del entorno edilicio y topografía circundante, donde los coeficientes de presión local permiten determinar las condiciones de carga de viento. Dos categorías de terreno se utilizaron en el estudio, considerando la dirección del viento incidente, una para flujos de capa límite proveniente de río, y la otra, sobre un terreno suburbano típico; por último, la reproducción del entorno urbano y topográfico configura las características del viento incidente reales.

El análisis de cargas de viento, los coeficientes globales sobre el edificio permiten establecer que las máximas cargas se producen en la torre cuando ésta queda ubicada con las caras de mayor superficie expuestas frontalmente, es decir, las caras III de ambas torres para direcciones de viento incidente 0, 15 y 345 grados. Los coeficientes locales de presión son presentados mediante sus valores medio, mínimo, máximo y RMS. Estos muestran que, por las características geométricas del complejo de edificios, presentan valores localizados muy altos, tanto de succión como de presión, principalmente en la zona de circulación entre las dos torres o en zonas de desprendimiento.

Para el cálculo de cargas de viento mediante el reglamento CIRSOC 102, podrá ser utilizado el valor medio afectado por un coeficiente de ráfaga. En zonas localizadas, sin embargo, podrá complementarse el análisis mediante el empleo de valores fluctuantes de presión obtenidos en estos ensayos.

Los resultados obtenidos muestran claramente la importancia de realizar ensayos en túnel de viento con modelos reducidos en estructuras con fachadas compuestas por elementos livianos que cubren amplias superficies de vidrio. La reproducción del entorno superficial inmediato adquiere relevancia al analizar las cargas localizadas

sobre estos elementos, ya que de otra manera no es posible deducir el comportamiento de las cargas y su magnitud.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] 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, Bs. As., Noviembre de 2001.
- [2] M. Jensen, "The model law for phenomena in natural wind", *Ingenioren* (International edition), 2 (4), 1954.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] N. J. Cook, "Simulation techniques for short test-section wind tunnels: roughness, barrier and mixing-device methods", *Wind tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*, pp. 126-136.
- [6] N. J. Cook, "Determination of the Model Scale Factor in Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2, pp. 311-321, 1977/1978.
- [7] J. Blessmann, "O vento na engenharia estrutural", Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 1995.
- [8] M. De Bortoli, B. Natalini, M. J. Paluch, M. B. Natalini, "Part-Depth Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Boundary Layer", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90, pp. 281-291, 2002.