

INFLUENCIA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO EN LAS ACCIONES DE VIENTO: EL CASO DE LAS TORRES COSTANERA SUR

De Bortoli, Mario E.^{a, b}; Wittwer, Adrián R.^{a, b}; Marighetti, Jorge O.^{a, b}; Rabadan, Osvaldo^a

^aFacultad de Ingeniería, Laboratorio de Aerodinámica - Universidad Nacional del Nordeste

^bInstituto de Modelado e Innovación Tecnológica IMIT (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Nordeste)

Palabras clave: cargas aerodinámicas, edificios altos, túnel de viento.

RESUMEN

En proyectos de obras civiles y edificios de cierta envergadura es necesario prever las acciones del viento de acuerdo con los procedimientos del Reglamento CIRSOC 102. En el caso del Proyecto Costanera Sur, en Corrientes, se utilizó el procedimiento de ensayos en túnel de viento. El proyecto incluye dos torres muy próximas cuyas alturas son 124 m y 93 m, respectivamente, y los estudios en túnel de viento se realizaron mediante un modelo que incluía la instrumentación de ambas torres, el modelado del entorno cercano y la simulación física del viento atmosférico. No obstante, el proceso constructivo fue modificado durante la ejecución de la obra y actualmente se ha realizado la construcción casi completa de la torre más elevada, mientras que la segunda torre prácticamente no se ha iniciado. Esto modifica las condiciones de carga aerodinámica previstas en los ensayos y este trabajo propone una reevaluación de las mismas previendo la alteración del proceso constructivo previsto. El estudio además se presenta como un llamado de atención a la influencia que pueden tener las modificaciones de los procedimientos constructivos en las de cargas previstas.

ABSTRACT

In civil engineering and building projects of a certain scale, it is necessary to anticipate wind loads in accordance with the procedures of the CIRSOC 102 Code. In the case of the Costanera Sur Project in Corrientes, the wind tunnel procedure was used. The project includes two closely spaced towers, 124 m and 93 m tall, respectively. The wind tunnel studies were conducted using a model that included instrumentation for both towers, modeling of the surrounding environment, and physical simulation of atmospheric wind. However, the construction process was modified during execution, and currently, the construction of the taller tower is almost complete, while the second tower has barely begun. This alters the aerodynamic load conditions predicted in the tests, and this work proposes a re-evaluation of these conditions, taking into account the changes to the planned construction process. The study also serves as a reminder of the influence that modifications to construction procedures can have on the predicted loads.

INTRODUCCIÓN

El Proyecto Costanera Sur, en la ciudad de Corrientes, incluye dos torres enfrentadas, muy próximas entre sí, con voladizos a diferentes niveles. Las torres tienen una orientación en falsa escuadra, con un leve ángulo de inclinación de una respecto a la otra, y las alturas son de 124 m para la torre 1 y de 93 m para la torre 2. En la Figura 1 es posible visualizar las características del Proyecto en estudio.

Sobre el proyecto inicial, se practicaron estudios, diseños y ajustes, que incluyeron ensayos en Túnel de Viento, como un modelo integral, no presentando comentarios de parte del comitente respecto al proceso constructivo. Normalmente, en este tipo de proyecto, la construcción de ambas torres se realiza en forma paralela. No obstante, se determinó que el proceso constructivo implementado para la ejecución de la obra se realice desarrollando primero la torre de mayor magnitud, denominada torre principal, con el edificio de 5 niveles de cocheras, complementarias. Actualmente se ha realizado la construcción casi completa de esta primera torre, mientras que la obra del Edificio de menor altura todavía no se ha iniciado. Esto modifica las condiciones de carga aerodinámica previstas en los ensayos realizados, dejando expuesta a la torre construida a situaciones de cargas de viento diferentes a las que se producirían en el conjunto.

En el presente trabajo se evalúan los resultados obtenidos derivados de 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 y coeficientes de fuerza global. En virtud del proceso constructivo implementado por la empresa, se realiza una evaluación de los coeficientes obtenidos de la aplicación del Reglamento Argentino de Vientos CIRSOC 102 [1] sobre la torre principal actualmente construida casi en su totalidad. Finalmente, se establecen comparaciones de los resultados obtenidos para 4 direcciones de viento incidente sobre la torre principal del edificio.

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS EN EL TÚNEL DE VIENTO

Los ensayos fueron realizados sobre un modelo rígido a escala reducida conforme a lo establecido en el Reglamento CIRSOC 102. 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 proyecto del complejo con las dos torres, con su entorno natural y artificial reproducido hasta aproximadamente 2,5 veces la altura de la torre, en escala geométrica 1/200. 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.



Figura 1. Características principales del Proyecto Costanera Sur en la ciudad de Corrientes.

Durante los ensayos, se midieron las presiones medias y fluctuantes en la superficie exterior del modelo por medio de tomas de presión estática, utilizando un sistema de 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° y, complementariamente, se determinaron coeficientes de presión local sobre elementos estructurales específicos. Para cada dirección de viento analizada, se determinaron los coeficientes de fuerza global por integración de las presiones en su área tributaria, el momento de volcamiento, el momento torsor, el punto de aplicación y la dirección de la fuerza resultante.

Los ensayos se realizaron en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE, que es un túnel de capa límite de circuito abierto, cuya 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 y posee dos mesas de ensayos giratorias de 1,2 m de diámetro, una al inicio de la cámara y la otra a 19,4 m. 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 [2] y la regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico.

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

El modelo de las torres fue construido con una escala geométrica de 1/200, reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica (Figura 2). El modelo, en su estructura completa, está compuesto por las Torres 1 y 2, y una base común a ambas, que se denomina edificio base y que se desarrolla en forma no paralela, ya que presenta un quiebre de 26° , como se mencionó anteriormente. Tomando como referencia las dimensiones del prototipo que, para el edificio base son la altura de 17,40 m y la profundidad de 17m, los frentes son de 47 m y de 39 m y las alturas son de 105,9 m (34 pisos) y de 76,80 m (24 pisos) para las Torres 1 y 2, respectivamente.

En ambas torres, la sección transversal se mantiene constante en la parte inferior, pero a una cierta altura aumenta la profundidad manteniéndose constante el ancho como puede verse en Figura 2. En la Figura 3 se indica la orientación de los ejes de referencia adoptados, la dirección de viento incidente correspondiente a 0° y las 24 direcciones de viento evaluadas en los ensayos. Para las direcciones de viento de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 300° , 315° , 330° y 345° , la categoría de terreno corresponde a campo abierto, en tanto que para las restantes direcciones se considera una categoría

de viento suburbano, lo que indica un perfil vertical de velocidades con exponentes de 0,09 y 0,21 respectivamente.

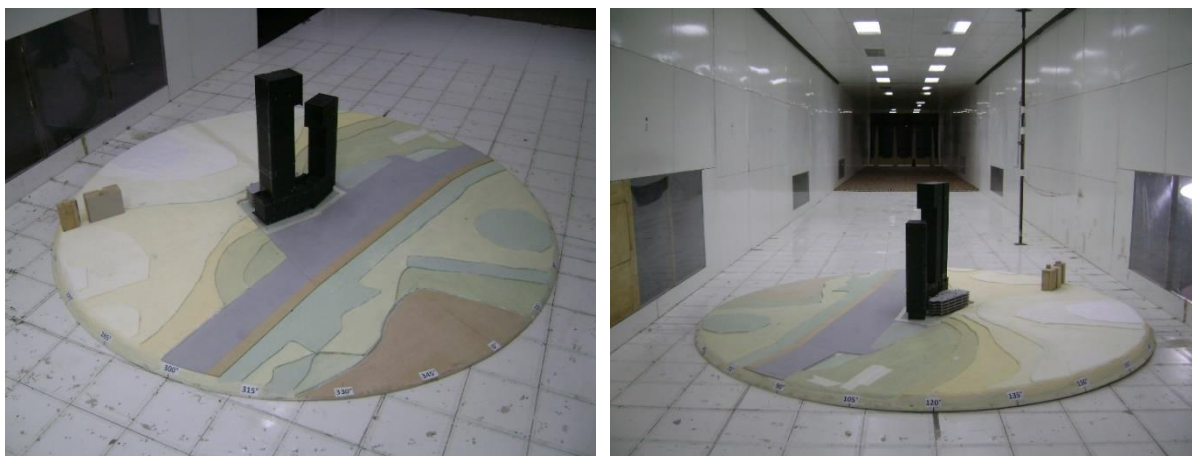


Figura 2. Modelo a escala 1:200 del complejo de edificios Costanera Sur.

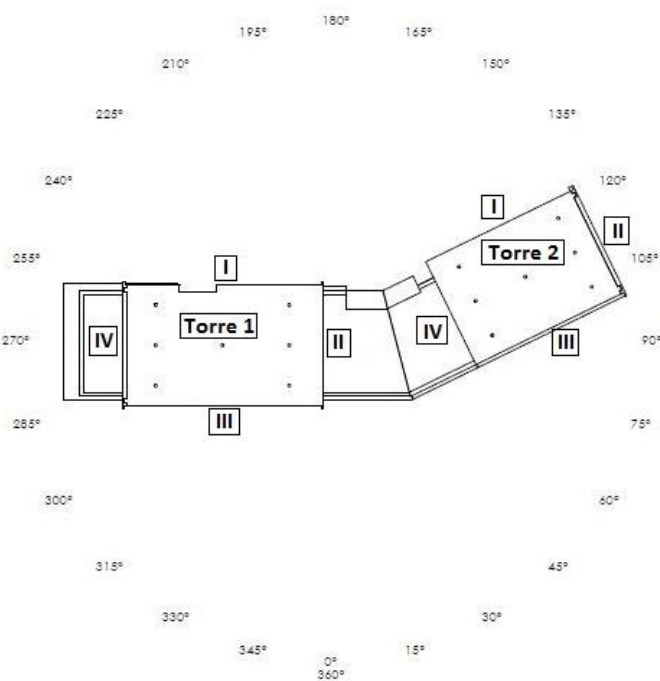


Figura 3. Ubicación del modelo del edificio torre en planta y direcciones viento incidente.

Para determinar el baricentro de cada una de las torres, se determinaron los momentos estáticos correspondientes considerando que la rigidez permanece constante en altura, evidenciando que las modificaciones en las dimensiones geométricas de la sección transversal no modifican la hipótesis planteada.

Los registros de las presiones fluctuantes en las tomas de presión ubicadas sobre la

superficie de la torre fueron obtenidos mediante un sistema 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 utilizando un tubo Pitot-Prandtl. Esto permite obtener la presión dinámica de referencia no perturbada q_z , en forma simultánea a las mediciones de las presiones fluctuantes sobre la torre.

La distribución de tomas de presión sobre el modelo presenta diferentes configuraciones de acuerdo a los aspectos geométricos de diseño de la estructura. Las tomas de presión sobre las torres 1 y 2 se distribuyeron sobre las superficies designadas I, II, III y IV (Figura 3). 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. 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. El segundo grupo corresponde a la zona de balcones, azotea y edificio base donde sólo se consignan valores de coeficientes local de presión que refieren a efectos locales dados por detalles geométricos de diseño.

Los coeficientes de presión local se determinaron en 279 tomas de presión distribuidas sobre las superficies exteriores de las torres. Conceptualmente, los coeficientes son cargas adimensionalizadas mediante parámetros de referencia, conforme a la literatura especializada y lo que indica el reglamento CIRSOC 102. Como los coeficientes de presión local se determinan a partir de registros de presiones fluctuantes en cada toma, es posible obtener valores del coeficiente de presión medio, RMS, mínimo y máximo, para cada ángulo de incidencia del viento. Los valores positivos de los coeficientes de presión local corresponden a acciones dirigidas hacia la superficie. Los valores negativos indican succiones.

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 . Estos ejes se definieron para cada torre de acuerdo a la orientación sección transversal siendo el eje x paralelo a la mayor dimensión y el eje y paralelo a la menor. Los coeficientes de fuerza para cada eje, C_{Fx} y C_{Fy} , se determinaron a partir de la integración de los coeficientes de presión local por sus áreas tributarias que luego se divide por área maestra de referencia A_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 siendo definidos sobre cada eje como C_{Vx} y C_{Vy} .

Finalmente, 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. De esta manera, los momentos de giro de cada componente de fuerza respecto al eje z se definen como C_{Mz_x} y C_{Mz_y} . La composición de ambos permite obtener el coeficiente de momento torsor resultante.

RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS EN EL TÚNEL DE VIENTO

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 para las situaciones más desfavorables que se producen para las direcciones de viento $\alpha_v = 0^\circ$ y 15° . Específicamente, se indican los valores del coeficiente de fuerza C_F , ángulo de la resultante α_R , coeficiente de volcamiento C_{MV} , coeficiente de momento torsor C_{MT} , y la excentricidad EXC de la resultante en cada dirección de viento α_v analizada. El análisis permitió establecer que los valores máximos para la Torre 1 ocurren para la dirección de viento $\alpha_v = 0^\circ$ ($C_F = 1,95$ y $C_{MV} = 4,55$), mientras que para la Torre 2, se producen para $\alpha_v = 15^\circ$ ($C_F = 2,02$ y $C_{MV} = 4,18$).

α_v	C_F	α_R	C_{MV}	C_{MT}	EXC
0°	1,95	80°	4,55	-0,24	-0,013

Tabla 1 – Coeficientes globales y excentricidad de la Resultante para la Torre 1 en la dirección de viento $\alpha_v=0^\circ$.

α_v	C_F	α_R	C_{MV}	C_{MT}	EXC
15°	2,02	105°	4,18	-0,290	-0,012

Tabla 2 – Coeficientes globales y excentricidad de la Resultante para la Torre 2 en la dirección de viento $\alpha_v=0^\circ$.

Con respecto al momento torsor, también se evaluaron los valores máximos de C_{MT} que se producen para ambas torres, sin embargo, se concluyó que no son relevantes para la verificación y comparación que se pretende en este trabajo.

Asimismo, se analizaron los valores de los coeficientes de presión local, especialmente sobre la cara II de la Torre 1 con viento en dirección $\alpha_v = 0^\circ$. Para esta dirección de viento, además, son obtenidos los valores de succión más elevados entre las dos torres, es decir, en la cara II de la Torre 1 y en la cara IV de la Torre 2. En la dirección de viento $\alpha_v = 195^\circ$, prácticamente opuesta a la anterior, el fenómeno se repite para las tomas ubicadas en la cara IV de la Torre 2, y finalmente, con viento incidente $\alpha_v = 90^\circ$ los valores obtenidos en la cara III de la Torre 2, también son elevados.

VERIFICACIÓN DE CARGAS PARA EL PROCESO CONSTRUCTIVO ADOPTADO

De acuerdo al proceso desarrollado por la empresa constructora, es necesario realizar una verificación de las cargas de viento sobre la Torre 1, dado que la misma deberá soportar las fuerzas que se generan sin la influencia de la torre 2. Para ello se recurre a los coeficientes obtenidos de la aplicación directa del procedimiento establecido en el Reglamento Argentino de Vientos CIRSOC 102 sobre la torre principal, que actualmente construida casi en su totalidad (Figura 4). Por sus características geométricas y su condición prácticamente aislada, puede ser analizada a través de los coeficientes de carga propuestos en el Reglamento.

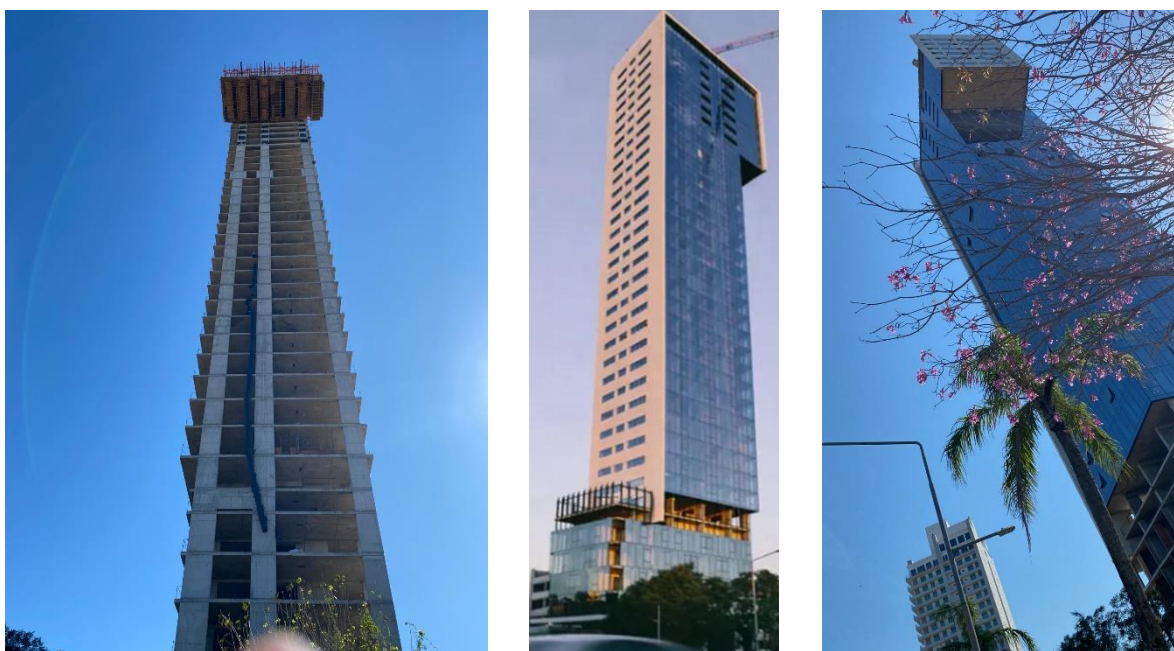


Figura 4. Proceso constructivo de la Torre 1.

Para el cálculo de las cargas de viento se empleó el Procedimiento Analítico del Reglamento CIRSOC 102-2005, Capítulo 5. De acuerdo a la ubicación del edificio torre, se definieron y consideraron dos direcciones de viento incidente en relación a los ejes x (90°- 270°) e y (0°- 180°) de referencia geométricos de la estructura. Se analizó el edificio Torre 1 de 34 pisos, planta baja y pisos mirados, con una altura total de 128,7 metros respecto al piso.

La velocidad básica de viento para la ciudad de Corrientes fue establecida en 46.0 m/s. La categoría de uso es III, la categoría del terreno es D y la orografía corresponde a terreno llano en ambas direcciones. También se definieron y los anchos de banda de cada planta en cada nivel. Para la orografía no se contempló la diferencia de cota respecto de la playa, teniendo en cuenta que la misma se encuentra a más de 150m, de la ubicación del edificio. Los anchos de banda son las longitudes de la fachada expuesta en dirección perpendicular a la acción del viento (Figura 5).

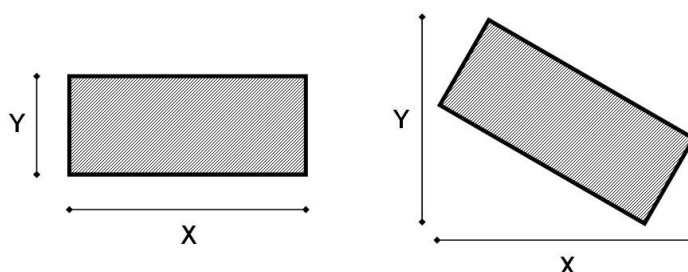


Figura 5. Esquema de definición de los anchos de banda.

La presión dinámica q_z a la altura z , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_z = 0,613 \cdot k_z \cdot k_{zt} \cdot k_d \cdot V_0^2 \cdot I \quad (1)$$

donde V_0 es la velocidad básica de viento, I es el factor de importancia, K_d es el factor de direccionalidad y K_{zt} es el factor topográfico. El factor de exposición K_z se calculó para cada planta. Finalmente, mediante la ecuación (1) se calculó la presión dinámica q_z por planta y la presión dinámica q_h a la altura máxima del edificio h .

Las presiones de diseño para el sistema principal resistente a la fuerza del viento se determinan mediante la siguiente expresión:

$$p = (q_z C_{p,bv} - q_h C_{p,sv}) \cdot G \quad (2)$$

donde q_z es la presión dinámica evaluada a la altura z , q_h es la presión dinámica evaluada a la altura h , $C_{p,bv}$ es el coeficiente de presión a barlovento, $C_{p,sv}$ es el coeficiente de presión a sotavento y G es el factor de efecto de ráfaga. Los valores del coeficiente $C_{p,bv}$ es 0,80, mientras que $C_{p,sv}$ varía levemente de acuerdo a la dirección de viento considerada (90° - 270°) y (0° - 180°) entre -0,42 y -0,50.

El factor de efecto de ráfaga para una estructura rígida se determina mediante la expresión:

$$G = 0,925 (1 + 1,7g_Q I_z Q / 1 + 1,7g_v I_z) \quad (3)$$

siendo I_z la intensidad de la turbulencia a la altura z , donde z es la altura equivalente de la estructura, g_Q es el factor de pico para la respuesta base, g_v es el factor de pico para la respuesta al viento y Q es la respuesta base que, a su vez, depende de características geométricas del edificio y de la escala de longitud integral de turbulencia. Una vez que se determinan todos estos valores se calcula la presión de diseño por planta aplicando la expresión (2).

Finalmente, a partir de las presiones de diseño en cada planta, se obtienen las cargas de viento por planta que se utilizan para el diseño del sistema principal resistente a la fuerza del viento. Estas cargas se determinan multiplicando el área de la planta por la correspondiente presión de diseño y por un coeficiente aplicado a la acción de viento. Es decir, las fuerzas que genera el viento en cada planta indican la distribución vertical de cargas sobre el edificio y permite la verificación estructural.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y NORMATIVOS

Finalmente, se hizo un análisis comparativo a partir de los resultados obtenidos en los ensayos en túnel y los valores determinados con los coeficientes que brinda el Reglamento CIRSOC 102. Para esta comparación fue necesario tener en cuenta que en el caso del estudio experimental se determinaron coeficientes globales en todas las direcciones de viento, cada 15° , mientras que la verificación de acuerdo a la normativa considera solamente dos direcciones perpendiculares a las caras expuestas al viento. El procedimiento de determinación de cargas del CIRSOC 102 considera la aplicación de coeficientes de presión por cada planta y no aplica coeficientes globales de carga para la verificación estructural.

Para efectuar la comparación de resultados, en el caso de los valores experimentales solamente se analizaron las direcciones perpendiculares a las caras de la Torre 1 a partir de los coeficientes globales de fuerza. Para la aplicación directa de los coeficientes del CIRSOC 102, los resultados de la fuerza por planta fueron

considerados integralmente. Debido a las condiciones de flujo que impone la configuración completa de ambos edificios, los resultados obtenidos a partir de los ensayos muestran fuerzas globales levemente mayores que los que resultan de aplicar valores de la normativa, al menos en las direcciones frontales a las caras I y III de la torre analizada.

Las mayores diferencias, sin embargo, se producen a partir del análisis de las cargas de presión localizadas ya que el estudio en túnel de viento permite detectar situaciones específicas producto de la interacción aerodinámica entre edificios que no se pueden prever utilizando los coeficientes que brinda el reglamento.

CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo presenta, por un lado, los resultados obtenidos derivados de un estudio realizado en el Túnel de Viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE para el Proyecto Costanera Sur y el análisis de los coeficientes de fuerza global que surgen de este estudio experimental. Luego, en virtud de la modificación del proceso constructivo habitual en este tipo de emprendimiento, se realiza una evaluación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de los coeficientes que indica el Reglamento CIRSOC 102 sobre la torre principal solamente. Finalmente, la comparación de los resultados obtenidos para 4 direcciones de viento incidente sobre la torre principal del edificio empleando los dos procedimientos indica cargas globales apenas mayores para la evaluación con datos experimentales. Este resultado, en términos de la verificación estructural, es coherente con las condiciones de escurrimiento que se generan con la presencia de la segunda torre. Sin embargo, el mayor cuidado debe ser puesto en el análisis de las cargas localizadas que muestran los estudios experimentales pero que, en general, para este tipo de configuración edilicia no pueden ser previstas a partir de la aplicación directa de la normativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Reglamento CIRSOC 102: Acción del Viento sobre las Construcciones, INTI, Buenos Aires. 2005.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.

-
- [5] 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.