

# EVALUACIÓN DE CARGAS DE VIENTO EN UN COMPLEJO EDIFICIO DE TRES TORRES MEDIANTE ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO

Mario E. De Bortoli (1) ; Jorge O. Marighetti (2); Adrián R. Wittwer (3)

(1) Dr. Ing., Facultad de Ingeniería, UNNE, Resistencia, Argentina.;(2) Msc. Ing., Facultad de Ingeniería, UNNE, Resistencia, Argentina.:(3) Dr. Ing., Facultad de Ingeniería, UNNE, Resistencia, Argentina.

[m\\_debortoli@yahoo.com.ar](mailto:m_debortoli@yahoo.com.ar)

## RESUMEN

Para estructuras grandes, con formas geométricas inusuales, el Reglamento Argentino de Acción del Viento Sobre las Construcciones, CIRSOC 102, propone estudios en túneles de viento. En este trabajo se presentan resultados obtenidos en ensayos en el Túnel de Viento de la UNNE, y análisis de cargas de viento en cada una de tres torres de edificios a construirse en la ciudad de Mar del Plata, Argentina. Se ensayó primeramente, con simulación del viento natural, reproduciendo el tipo de terreno circundante, la presencia de estructuras civiles cercanas y las tres torres edificios. El análisis se realizó considerando alteraciones del viento incidente, producto de la presencia de edificaciones y entorno, evaluada a partir de mediciones de velocidades medias y fluctuantes. Se establecieron modificaciones provocadas por interferencia del modelo en el viento incidente, comparándolo con valores medidos en simulaciones previas de capa límite. Un ensayo adicional permitió medir cargas de viento sobre una estructura aislada, conservando su ubicación en el modelo, sin la presencia del entorno cercano. Se utilizaron modelos rígidos, en escala 1:200, reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica. Para valorar cargas de viento eficazmente, la estructura principal debe ser considerada como un sistema conformado por las tres torres, topografía y edificios cercanos.

*Palabras-clave: Túnel de viento, Edificios torres, Coeficientes de cargas, Sistemas.*

## Abstract

*For large structures with unusual shapes, Argentine Regulation Wind Action on Buildings, CIRSOC 102, proposes studies in wind tunnels. This paper presents results of studies at UNNE's Wind Tunnel, and analysis of wind loads on each of three tower blocks built in the city of Mar del Plata, Argentina. The tests, first, are made with natural wind simulation, reproducing the surrounding terrain, the presence of civil structures and the three towers nearby buildings. The wind load analysis is performed considering the incident wind disturbances resulting from the presence of buildings and the environment, assessed from measurements of mean and fluctuating velocities..The changes caused by the interference pattern in the incident wind characteristics are established, comparing simulations with previous measured values in boundary layer. Similarly, to compare results, an additional test to measure wind loads on a structure isolated from one of the towers, retaining their place in the model without the presence of the nearby environment. Rigid models are used, built in 1:200 scale, reproducing aerodynamics relevant details. This assay allowed us to prove that to effectively assess wind loads, the main structure should be considered as a structural system, consisting of the three towers, topography and nearby buildings.*

*Keywords: Wind tunnel, tower buildings, Load factors, systems.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El Reglamento Argentino de Acción del Viento Sobre las Construcciones, CIRSOC 102 (2001), especifica coeficientes de carga de viento aplicables a estructuras de formas regulares y de pequeño porte. Aclarando, más adelante, 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 y su entorno cercano. Se sugiere, de esta manera, lograr un proyecto más seguro y económico desde el punto de vista de las acciones del viento en forma confiable.

Reproducir las características del viento incidente en estudios en túnel de viento sobre un modelo reducido de la estructura bajo análisis, debe considerar las escalas espaciales de los factores que producen alteraciones en el viento de fondo utilizado en el estudio. Se podrían clasificar, en función de escalas espaciales asociadas a los órdenes respecto a la estructura en estudio en: en primer lugar, el terreno natural, que se encuentran definidos en el reglamento de viento; luego, estructuras de edificios cercanos a la estructura principal, cuya escala espacial de influencia queda definida por las dimensiones de la estructura principal, y, por último, el modelo estructural, propiamente dicho. Desde este punto de vista, este conjunto de modelos reproducidos en un ensayo en túnel de viento, se adecúa a un concepto de sistema, donde el sistema principal puede estar conformada por una o varias estructuras, además del topografía cercana y los edificios vecinos.

Indiscutiblemente, la carga más desfavorable que se podría esperar en una estructura sometida a la viento se genera cuando el sistema principal es la estructura civil, el edificio, es único modelo reproducido. Considerando la profusa bibliografía aerodinámica de estructuras, el ensayo de estructuras como modelo aislado, sin la reproducción del entorno cercano, representa la condición más desfavorable de los efectos por cargas de viento. Solamente en este caso es válida la consideración de que la estructura ensayada aislada será la condición más desfavorable. Para un ensayo en túnel de viento, donde el sistema principal está conformada por estructuras civiles agrupadas, como es el caso del presente trabajo, un análisis de una estructura civil aislada, permite evidenciar máximas solicitaciones, pero sin manifestar modificaciones o inversión de los estados de carga; ensayos de estructuras civiles de edificios agrupadas, con reproducción de la topografía cercana y otros edificios aerodinámicamente relevantes, mostraron cambios en signo y magnitudes, tanto en las cargas de viento globales y localizadas.

En los años 50`de siglo pasado, Jensen (1954) en un trabajo de comparación, mostró resultados de mediciones de presión en túnel de viento, realizadas sobre una estructura civil de pequeño porte en escala natural y sobre una reproducción de la misma, a escala reducida. Los ensayos en túnel comprendían mediciones con el modelo sometido a flujo uniforme y suave y con el modelo inmerso en la capa límite desarrollado sobre diferentes placas rugosas. Posteriores trabajos, desarrollados al inicio de la década del ´60, permitieron establecer criterios de semejanza entre modelo y prototipo, tenga en cuenta no solo los parámetros del modelo geométrico de la estructura civil, sino también los parámetros del modelo de viento incidente simulado; la evaluación de cargas de viento en este tipo de estudios, en consecuencia, demandó un particular tipo de túnel de viento conocido como túnel de capa límite, de baja velocidad, diferente de aquellos de uso aeronáutico. Para estos, 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.

Los reglamentos de viento aportan coeficientes globales de fuerza y momentos para estructuras civiles regulares de formas simples, consideradas aisladas, incorporando modificaciones introducidas por el terreno natural o la presencia de otros edificios, de manera que las cargas son evaluadas en forma segura. Las cargas, expresadas a través de coeficientes, permiten determinar las máximas cargas de viento, cuando el sistema principal puede reducirse a la condición de estructura civil aislada, pero que no se corresponden con alteraciones de estas para cargas reales en condiciones de prototipo. En el cálculo estructural de estructuras civiles determinar las condiciones más desfavorables conducen al análisis estructural del lado de la seguridad, aunque se asume que existe un alto grado de incertidumbre en las alteraciones que pueda sufrir la configuración durante la vida útil de la estructura; de manera que, la utilización de técnicas de medición y análisis de túnel de viento de estructuras civiles, se presenta como un eficaz herramienta para evaluar el rango de incerteza de la mediciones, derivado de la modificación de la configuración de las cargas de viento.

El presente estudio en túnel de viento <sup>[1]</sup>, realizado por el Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), determinó acciones provocadas por viento atmosférico sobre un grupo de tres estructuras civiles, edificios torres TI, TII y TIII, a construirse en un predio de la ciudad de Mar del Plata, provincia de Buenos Aires. Similarmente, a efectos de comparación, en un ensayo en túnel de viento, se midieron las acciones de viento sobre uno de los edificios torres, Torre I, en forma aislada; en este, el sistema principal se redujo a la Torre I, sin reproducir la presencia de los otros dos edificios ni los edificios cercanos. Mediante análisis experimental en túnel de viento sobre modelos a escala reducida, se detectaron modificaciones de la configuración de las cargas.

Se determinaron para cada 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 doce direcciones de viento incidente <sup>[2]</sup>. Complementariamente, fue evaluada la interferencia de las propias edificaciones a partir de las modificaciones del viento incidente en las proximidades de las torres.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Los ensayos fueron realizados sobre el sistema principal, conformado por un grupo de tres edificios torres, las torres TI, TII y TIII, su entorno superficial cercano y la reproducción de estructuras aerodinámicamente relevantes, modelos ciegos, posibles de provocar efectos de vecindad. Los modelos de edificios torres son rígidos a escala reducida conforme al Capítulo 6 del Reglamento Cirsoc 102 (2001), utilizando la Torre I como elemento de comparación para los dos tipos de ensayos previstos. 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. Fueron

construidos tres modelos reducidos de torres edificios, con su entorno natural y artificial reproducido hasta aproximadamente seis veces la altura promedio de las torres, 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 25 m/s.

Tanto para los ensayos de los edificios torres en grupos, así como para el estudio de la Torre I aislada, se midieron presiones medias (temporales) en la superficie exterior del modelo reducido por medio de tomas de presión estática. Posteriormente se determinaron coeficientes de presión local correspondientes a las tomas de presión. Los ensayos son realizados con viento incidiendo desde 0 a 360°, a intervalos de 30° para cada una de las torres. Complementariamente, se determinaron coeficientes de presión neta sobre elementos estructurales específicos. Con los datos de las mediciones, para cada dirección de viento analizada, se determinaron coeficientes de fuerza global, momento de volcamiento, momento torsor, punto de aplicación y dirección de la fuerza resultante. Finalmente, el análisis de modificaciones que provocan efectos de interferencia del propio modelo en las características del viento incidente. Se miden velocidades medias y fluctuantes con anemómetro de hilo caliente y magnitudes experimentales obtenidos se compararon con magnitudes medidas en simulaciones de capa límite utilizadas.

## 2.1. Túnel de viento de la UNNE

El túnel “Jacek P. Gorecki” de la UNNE 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 x 1,8 m de alto x 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 (Wittwer & Möller, 2000). La regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico.

## 2.2. Simulación de la capa límite atmosférica

La técnica de simulación <sup>[4]</sup> 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 (Cook, 1978), 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 modificó desde 10,50 a 12,26 metros, en función de la categoría de terreno a reproducir. A barlovento, se ubican dos agujas truncadas del tipo de Irwin (1981) para generar un déficit inicial de cantidad de movimiento con el fin de obtener una mayor escala de simulación, y a la vez distribuir en altura el déficit de cantidad de movimiento introducido, para obtener características semejantes a las atmosféricas (Figura 1).

Conforme la clasificación que aparece en los reglamentos de viento, los flujos atmosféricos simulados corresponden a las categorías de mar abierto y terreno suburbano, en función de la longitud de rugosidad superficial a barlovento del modelo (10,50 m a 12,26 m). El perfil de viento correspondiente, de acuerdo al tipo de terreno simulado, debe ser descrito en términos de alguna de las dos leyes de

distribución de velocidades medias más usadas; la ley potencial o la ley logarítmica (Cook, 1977). El reglamento CIRSOC 102<sup>[3]</sup> adopta como valor característico de los distintos tipos de terreno, el exponente de la ley potencial de velocidades medias,  $n$ .

Las principales características de los dos tipos de escurrimiento incidente utilizados en estos ensayos (perfil de velocidades medias y perfil de intensidad turbulencia) son indicadas en la Figura 7 del punto 4. El escurrimiento indicado como CL1 se aproxima al de una zona marítima ( $n = 0,09$ ), mientras que CL2 se puede asociar a una zona suburbana ( $n = 0,14$ ). Para las direcciones de viento incidiendo desde el mar se utilizó CL1, en tanto que para las restantes se utilizó CL2. Una discusión más detallada de estas simulaciones puede ser encontrada en la referencia (Blessmann, 1995). Por otra parte, un análisis de las modificaciones que provocan las propias torres y su entorno en las características del viento incidente, se presenta en el punto 4.

### 2.3. Descripción del modelo

Para que los coeficientes de presión obtenidos sobre el modelo guarden correspondencia con la estructura real deben respetarse ciertas 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<sup>[5]</sup>. Los modelos de las torres fueron construidos con una escala geométrica de 1:200, reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica (Figura 2), así como para cada una de las doce direcciones de viento analizada para cada torre, se representaron la rugosidad y los edificios cercanos de tamaño aerodinámicamente relevante<sup>[6]</sup>.

El proceso de cálculo implementado exige la determinación de la ubicación del centro de gravedad. Este fue determinado en forma simplificada considerando la rigidez aportada por los tabiques estructurales. La convención adoptada para los signos de los ejes que pasan por el centro de gravedad y el sentido positivo del ángulo  $\beta$  generado entre la fuerza normal a la superficie de la torre con el eje Y positivo adoptado, se indican en la Figura 3.



Figura 1. Simulación de viento natural en el túnel de viento.

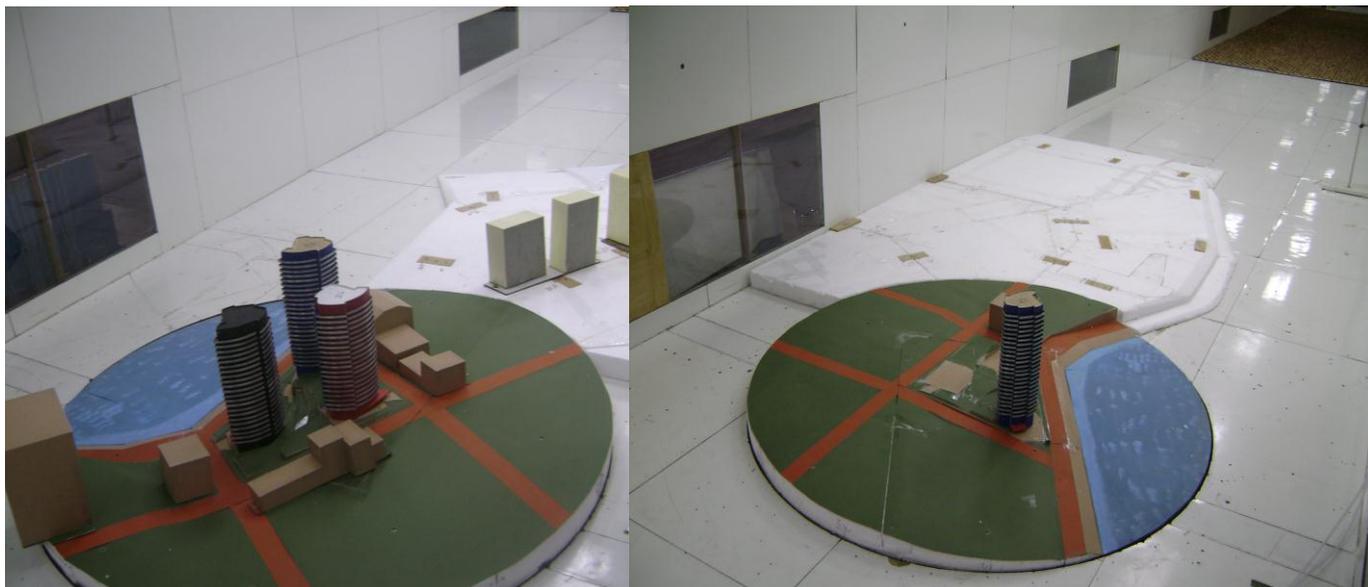


Figura 2. Modelo en el sistema principal y modelo aislado en los ensayos en túnel de viento.

#### 2.4. 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 fluctuaciones de velocidad. 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 [7].

Los registros de presiones medias, de las tomas de presión ubicados sobre la superficie de las tres torres, fueron medidas en diferentes configuraciones de escurrimientos y direcciones de viento medio incidente. Se verifican que los estados de carga debido al viento, determinadas para la estación aislada, no son alteradas desfavorablemente al colocar barreras cortavientos. Las 78 tomas de presión sobre cada torre, se conectaron al multimanómetro de alcohol por medio de mangueras de PVC, medidas por imágenes. El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo con el programa Imagen, versión 1.42.

En todos los ensayos se registraron las velocidades del escurrimiento medio en condición no perturbada, a barlovento del modelo para evitar interferencias, a la altura de referencia, equivalente a 71 metros en escala real (altura del de la torre más alta, Torre T1) con tubo Pitot-Prandtl conectado a micromanómetro de Betz 2500, de 1 Pa de apreciación.

La presión dinámica de referencia,  $q_z$ , se midió en forma simultánea a las mediciones de las presiones estáticas sobre las torres. La presión estática no perturbada se obtuvo del mismo tubo, en tanto que los valores de las presiones externas locales en cada punto de medición por diferencia de alturas con un multimanómetro. Las lecturas fueron procesadas con un computador personal.

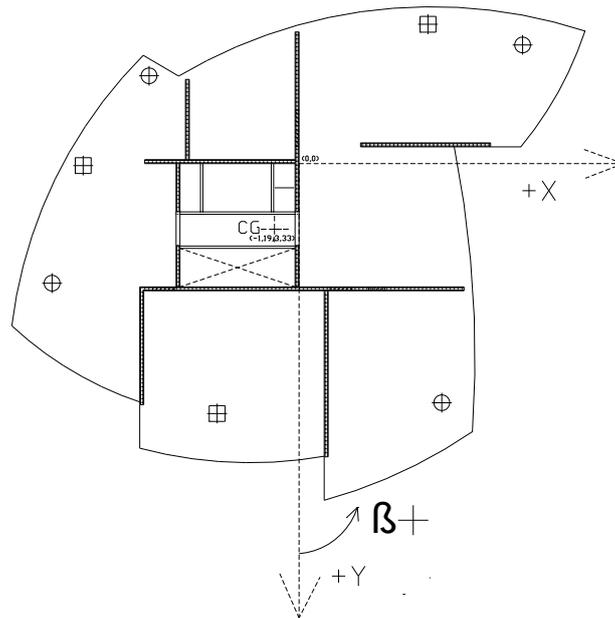


Figura 3. Ubicación del centro de gravedad simplificado y de los ejes de referencia.

### 3. COEFICIENTES DE CARGA

#### 3.1. Coeficientes de presión local

Para la comparación de resultados, se seleccionó la torre T1, que es el edificio torre de mayor cota en el terreno donde está ubicados las torres. Los valores locales de los coeficientes de presión media se determinaron en 78 puntos distribuidos radialmente en el perímetro de las torres. De esta manera, para cada dirección de viento, se procesaron 244 coeficientes de presión local media. Conceptualmente, los coeficientes son cargas adimensionalizadas mediante parámetros de referencia. Conforme a los usos más extendidos en la literatura especializada, se dan las siguientes definiciones, compatibles con el reglamento CIRSOC 102. El coeficiente de presión local exterior está definido por <sup>[8]</sup>:

$$c_e = \frac{\Delta p_e}{q_z} \quad (1)$$

donde:

$\Delta p_e$  = diferencia de presión estática exterior 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).

$q_z$  = presión dinámica medida a la altura de referencia (tubo Pitot-Prandtl), en el caso de este ensayo, medido a la altura de la torre más alta (altura torre T1).

Dada la configuración geométrica en planta de las torres, se divide a estas en once caras superficiales reconocibles en el recubrimiento perimetral de las torres, distribuyendo perimetralmente las tomas de presión por niveles definidos por la

altura respecto al suelo. En correspondencia con cada nivel y cara superficial se definieron las ubicaciones de la toma de presión estática superficial y las áreas tributarias para cada toma de presión. Los coeficientes de presión local obtenidos fueron medidos para doce direcciones de viento incidente, identificadas en Figura 4, así como la ubicación de los ejes baricéntricos calculados.

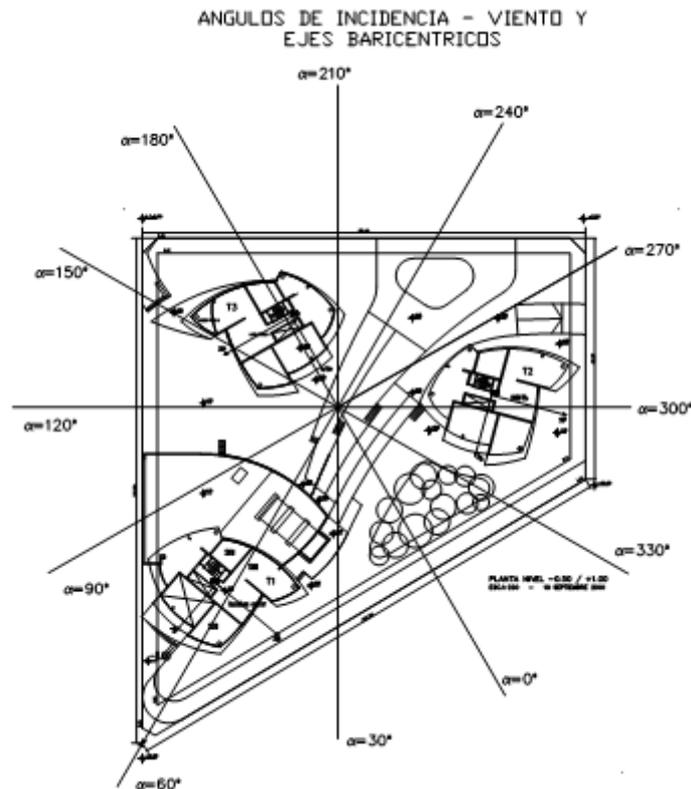


Figura 4. Direcciones de viento incidente y ubicación de los ejes baricéntricos.

Adicionalmente se midieron las presiones netas resultantes sobre tres balcones, ubicados en todos los casos, en el nivel superior de la torre y en la marquesina de ingreso en el nivel inferior de cada torre.

### 3.2. Coeficientes de fuerza global

La fuerza normal a la superficie de las torres, provocada por las presión estática local en relación a las áreas tributarias superficiales, se proyectaron en los ejes ortogonales X e Y, definidas por el centro de gravedad de la sección transversal en planta (Figura 4).

Los coeficientes de fuerza para cada eje son:

$$C_{f_x} = \frac{F_x}{q_z A_M}; \quad C_{f_y} = \frac{F_y}{q_z A_M} \quad (2)$$

donde:

$F_x$  = componente de la fuerza

actuante en la dirección X sobre el modelo.

$F_y$  = componente de la fuerza actuante en la dirección Y sobre el modelo.

$q_z$  = presión dinámica de referencia.

$A_M$  = área maestra de referencia, definida como  $A_M = L_R A_T$ , siendo  $L_R$  la dimensión transversal del área maestra de referencia, única para las tres torres, se observa en Figura 5 y  $H_T$  altura total de la torre analizada medida desde el nivel del suelo.

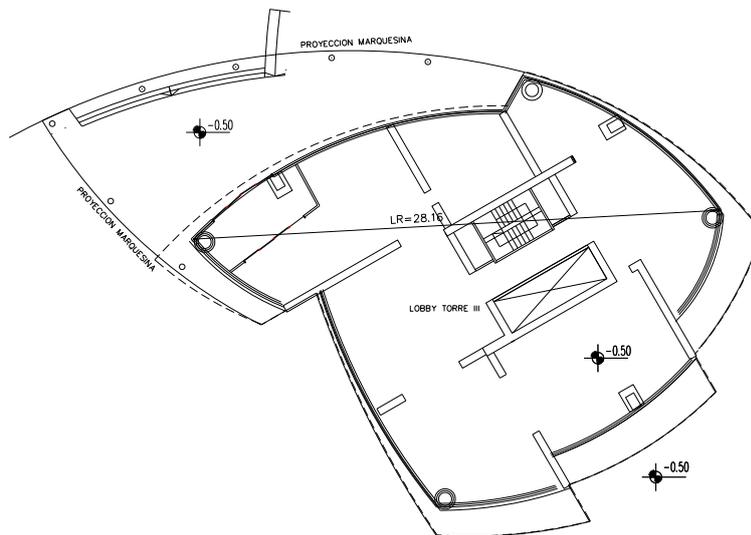


Figura 5. Dimensión transversal del área maestra de referencia adoptado.

En este ensayo, los coeficientes de fuerza se determinaron a partir de los coeficientes de presión, integrando las acciones sobre cada área tributaria conforme a la siguiente expresión:

$$C_{f_x} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} S_j \operatorname{sen} \beta_j}{A_M}; \quad C_{f_y} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} S_j \operatorname{cos} \beta_j}{A_M} \quad (3)$$

donde:

$n$  = número de tomas de la torre.

$c_{ij}$  = coeficiente de presión neta o total correspondiente a la toma  $j$ .

$S_j$  = área tributaria de la toma  $j$ .

$\beta_j$  = ángulo que forma la fuerza normal superficial respecto al eje  $y$  positivo en sentido contrario a la agujas del reloj.

$A_M$  = área maestra de referencia.

### 3.2. Coeficientes de momento de volcamiento

Con las componentes de las fuerzas proyectadas en los ejes X e Y se determinaron los momentos de volcamiento respecto a los ejes respectivos, determinando coeficientes adimensionales de momento de volcamiento para cada torre y dirección de viento incidente. Las expresiones empleadas resultan:

$$C_{M_x} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{pj} S_j \cos \beta_j h_j}{A_M H_{T_i}}; \quad C_{M_y} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{pj} S_j \operatorname{sen} \beta_j h_j}{A_M H_{T_i}} \quad (4)$$

donde:

$n$  = número de tomas de la torre.

$c_{ij}$  = coeficiente de presión neta o total correspondiente a la toma  $j$ .

$S_j$  = área tributaria de la toma  $j$ .

$\beta_j$  = ángulo que forma la fuerza normal superficial respecto al eje  $y$  positivo en sentido contrario a la agujas del reloj.

$A_M$  = área maestra de referencia.

$h_j$  = altura de toma de presión  $j$ .

$H_T$  = altura total de la torre analizada medida desde nivel del suelo.

Con los valores de momentos de volcamiento y las componentes de la resultante, para cada torre y dirección de viento incidente, se determinó la altura ( $H_R$ ) y la dirección de la resultante,  $\theta$ , medido respecto al eje  $Y$  positivo (Figura 3).

### 3.2. Coeficientes de momento torsor

Con las componentes de fuerzas, proyectadas en cada eje, y el centro de gravedad, se determinó adicionalmente el coeficiente de momento torsor para cada torre y dirección analizada definido como:

$$C_{M_{z_y}} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{pj} S_j \cos \beta_j e_{xj}}{A_M L_R} \quad C_{M_{z_x}} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{pj} S_j \operatorname{sen} \beta_j e_{yj}}{A_M L_R} \quad (5)$$

El coeficiente de momento torsor resultante será:

$$C_{M_T} = C_{M_{z_x}} + C_{M_{z_y}} \quad (6)$$

En Tabla 1 y 2 se muestran los coeficientes de fuerza, coeficientes de momento de volcamiento para las direcciones ortogonales baricéntricas, coeficiente de momento torsor, altura para la Torre T1 en el sistema principal y la Torre T1 en forma aislada. Se muestran también, la dirección de la resultante de fuerza respecto al eje  $X$  e  $Y$  y la excentricidad en planta para cada torre y dirección de viento incidente.

Tabla 1.: Coeficientes de fuerza, momento de volcamiento, torsor, altura, dirección y excentricidad de la fuerza resultante en Torre I, para las direcciones de viento analizadas.

Ángulo de Incidencia Viento ( $\alpha$ )	Torre I								
	CF <sub>X</sub>	CF <sub>Y</sub>	CM <sub>VY</sub>	CM <sub>VX</sub>	CM <sub>T</sub>	H <sub>R</sub> (m)	$\theta$ (eje $y$ )	Re <sub>x</sub>	Re <sub>y</sub>
0	-1,02	-0,29	-0,50	-0,09	0,002	0,186	-105,9	-0,001	-0,052
30	-0,90	-0,67	-0,44	-0,31	0,002	0,187	-126,7	0,004	-0,026

60	-0,47	-0,76	-0,20	-0,40	0,001	0,194	-148,6	0,001	-0,010
90	0,09	-0,49	0,08	-0,28	0,0002	0,230	169,3	0,090	0,015
120	0,45	-0,32	0,23	-0,18	0,00001	0,207	125,5	0,023	0,031
150	0,62	-0,08	0,31	-0,03	0,001	0,192	97,5	0,001	-0,067
180	0,51	0,14	0,22	0,10	-0,001	0,177	74,9	-0,015	0,096
210	0,03	0,26	0,04	0,22	-0,0003	0,326	7,3	-0,008	-0,007
240	-0,09	0,81	-0,03	0,41	-0,002	0,195	-6,4	0,020	-0,016
300	-0,32	0,15	-0,18	0,10	0,0004	0,231	-64,8	-0,0094	-0,0005
330	-0,96	-0,05	-0,47	-0,01	0,003	0,199	-93,3	-0,0091	-0,1722

Tabla 2.: Coeficientes de fuerza, momento de volcamiento, torsor, altura, dirección y excentricidad de la fuerza resultante en Torre I, aislada, para las direcciones de viento analizadas.

Ángulo de Incidencia Viento ( $\alpha$ )	Torre I								
	CFX	CFY	CMVY	CMVX	CMT	HR (m)	$\theta$ (eje y)	Rex	Rey
0	-1,06	-0,22	-0,54	-0,08	0,002	0,196	-101,6	-	-0,071
30	-0,97	-0,46	-0,48	-0,25	0,0004	0,200	-115,5	0,006	-0,019
60	-0,30	-0,89	-0,16	-0,45	0,001	0,198	-161,2	-0,008	-0,006
90	0,18	-0,72	0,09	-0,34	-0,0002	0,188	166,1	0,073	0,020
120	0,47	-0,49	0,24	-0,24	0,00004	0,194	136,2	0,033	0,032
150	0,63	-0,06	0,31	-0,01	0,001	0,192	97,5	0,004	-0,015
180	0,57	0,25	0,27	0,14	0,001	0,192	66,1	-0,008	0,038
210	0,35	0,81	0,17	0,41	-0,001	0,197	23,2	-0,015	-0,002
240	0,15	0,97	0,08	0,49	-0,003	0,197	8,8	-0,020	-0,016
270	0,11	0,91	0,06	0,45	-0,003	0,194	6,7	-0,035	-0,020
300	-0,61	0,38	-0,31	0,20	0,001	0,200	-57,8	-0,007	0,004
330	-0,89	-0,20	-0,45	-0,06	0,003	0,195	-102,5	-0,009	-0,052

La comparación se realiza sobre la torre T1, ubicada en el sistema principal, donde se reproducen la topografía cercana, los edificios cercanos y el grupo de tres torres, con la torre T1 aislada, sin la presencia de las otras dos torres.

Para las direcciones de viento que inciden directamente sobre la torre TI, desde  $330^\circ$ , a  $150^\circ$ , los valores de los coeficientes globales de fuerza ( $C_F$ ), momento de volcamiento ( $C_{MV}$ ) y momento torsor ( $C_{MT}$ ) son del mismo orden de magnitudes, sin cambios apreciables en el sentido de los esfuerzos; sin embargo se detectan, para la dirección de viento de  $90^\circ$ , una inversión en el coeficiente de momento torsor, manteniendo magnitud, y una apreciable reducción de la altura del punto de aplicación de la resultante. Observando la Figura 4, en este rango de variación de las direcciones de viento, con características de rugosidad suburbana, la torre presenta un aspecto aerodinámico a viento incidente similar al mostrado en los ensayos de los tres edificios torres agrupados en el predio. El aspecto aerodinámico que presentan la presencia de las torres TI y T II, para estas direcciones, detrás y lateralmente del edificio en estudio, no parece ser relevante para modificaciones de las cargas, principalmente en la región de la estela.

Para direcciones de viento superiores a los  $150^\circ$ , donde la rugosidad del terreno puede caracterizarse como de campo abierto, alguno de los coeficientes de carga de viento modifican en magnitud y sentido; en este sentido, en la dirección de viento de  $180^\circ$  el momento torsor de la torre TI cambia de sentido, manteniendo su magnitud, y la situación de la fuerza resultante. En esta dirección, el viento

incidiendo directamente sobre la torre T3, provoca estelas que inciden sobre la torre T1, ubicada a una distancia de tres órdenes de distancia respecto a las dimensiones en planta de las torres. El caso más relevante es la dirección de viento de  $210^\circ$ , donde los valores de los coeficientes de fuerza, volcamiento y la excentricidad de la fuerza resultantes cambian notablemente; la magnitud y sentido del momento de volcamiento transversal (eje y), aún para la dirección de viento de  $240^\circ$ , disminuyendo abruptamente el ángulo de excentricidad (eje y) a valores muy pequeños.

La situación más comprometida, en cuanto a cargas de viento, para la torre T1 es a partir de la dirección de viento de  $150^\circ$  a  $300^\circ$ ; estas direcciones, ubicación a las torres TII y TIII adelante de la torre T1 provocando las mayores alteraciones en los estados de carga, variando en magnitud de algunos coeficientes o bien, cambiando el sentido de aplicación de las cargas.

## 5. CONCLUSIONES

El trabajo presenta el proceso de obtención de las cargas provocadas por el viento sobre un complejo de tres torres mediante ensayos en túnel de viento con modelos reducidos, considerando el efecto de vecindad provocado por las propias torres, la topografía y el entorno edilicio inmediato. El análisis de los resultados muestra la importancia de simular correctamente las características del viento incidente, verificándose además la influencia del entorno y los efectos de vecindad. Dada la configuración de las torres, es posible observar la influencia de las características geométricas en relación a la exposición de cada torre respecto viento incidente.

Este estudio demuestra, en primer término, la importancia de simular adecuadamente las características del viento incidente sobre los modelos estructurales. En este estudio, el viento incidente proviene de dos categorías de terreno, de  $150^\circ$  a  $300^\circ$  de dirección de viento presentaba característica de campo abierto (mar abierto), y en otras, el viento presentaba características correspondientes a terreno suburbano, proveniente de la ciudad.

Por otro lado, la comparación realizada en las cargas de viento sobre un grupo de tres edificios torres y una de las torres (torre T1) aislada, se verifica la fuerte influencia del entorno cercano a la estructura en estudio, por la propia interacción del viento con las tres torres del grupo de estructuras y otros elementos que provocan efectos de vecindad.

Efectos locales de coeficientes de presiones locales en las caras de la estructura, principalmente en niveles inferiores, evidenciándose la influencia de las estructuras que conforman el entorno superficial y la presencia de las otras estructuras cercanas, los otros dos edificios torres, que componen el sistema principal en estudio.

Coefficientes de presiones locales sobre caras del modelo aislado mantenían una variación espacial similar a la obtenida considerando la estructura o sistema completo, solamente variando valores absolutos pero manteniendo el signo. A alturas más bajas de la estructura principal podrían ocurrir modificaciones en el campo de velocidades que podrán desembocar en efectos de ráfagas localizadas a nivel de peatón.

Respecto al efecto de las cargas de viento medio o global, las modificaciones se evidenciaron en los sentidos de aplicación de las cargas y en

valores de los coeficientes globales de los momentos torsores. La modificación cuantitativa y cualitativa de los coeficientes de fuerza, momento de volcamiento y momento torsor se produjeron consecuencia del sistema principal.

Este estudio permitió comparar, en este caso particular donde la estructura principal está conformada por un sistema estructural de tres torres y otros elementos relevantes aerodinámicamente cercanos, los criterios empleados en el cálculo estructural por cargas de viento de edificios civiles. Generalmente las estructuras son calculadas por medio de reglamentos en la peor condición, aislados y a máxima velocidad de viento; sin embargo, aunque es la condición más segura, no se consideran comportamientos de carga variables en sentido o magnitud, derivadas de la interferencia con otros edificios cercanos y los cambio de características de terreno cercano..

## 6. Referencias bibliográficas

1. Mario E. De Bortoli (1) (A); Jorge O. Marighetti (2); Adrián R. Wittwer, Ensayos em Túnel de Viento de Estructuras Altas Considerando Efectos de Interferencia”, XXXVI Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 19-21 de Septiembre de 2012, Rio de Janeiro, Brasil.
2. Blessmann, J. (1995), *O vento na engenharia estrutural*, Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
3. CIRSOC 102 (2001). Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, *Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones*, INTI, Bs. As.
4. Cook, N. J. (1977), “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.
5. Cook, N. J. (1978), “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.
6. Irwin, H. P. A. H. (1981), “The design of spires for wind simulation”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 7, pp. 361-366.
7. Jensen, M. (1954), “The model law for phenomena in natural wind”, *Ingenioren (International edition)*, 2 (4).
8. Wittwer, A. R., Möller, S. V. (2000), “Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 84 (3), pp. 307-320.