



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

## **EVALUACIÓN DE CARGAS AERODINÁMICAS SOBRE UN GRAN EDIFICIO EN PUNTA DEL ESTE, URUGUAY**

### **EVALUATION OF AERODYNAMIC LOADS ON A GREAT BUILDING IN PUNTA DEL ESTE, URUGUAY**

Jorge O. Marighetti (1) (P); Mario E. De Bortoli (1); Adrián R. Wittwer (1); Sandra Udrizar Lezcano (1); Gisela Alvarez y Alvarez (1)

(1) Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina.  
Dirección para correspondencia: a\_wittwer@yahoo.es; (P) Presentador

#### **Resumen**

Existen estructuras cuya configuración arquitectónica presenta características particulares que dificultan la evaluación de las cargas aerodinámicas que definen el cálculo estructural. El edificio que se analiza en este trabajo fue construido en Punta del Este, Uruguay, tiene una altura aproximada de 80 m y presenta una estructura exterior cilíndrica con salientes que pueden provocar alteraciones de cargas difíciles de prever desde el punto de vista aerodinámico. En este estudio se presentan los resultados obtenidos en ensayos realizados en el Túnel de Viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE, sobre el modelo a escala 1/200 del mencionado edificio. Los ensayos fueron realizados utilizando una simulación de viento natural realizada a partir del método de Counihan. En el modelo a escala del edificio, se reprodujeron todos los detalles de relevancia aerodinámica; por otra parte, fue modelado el entorno edilicio hasta un radio de 200 m, incluyendo tres edificios muy próximos de altura similar al analizado. Las presiones fluctuantes locales en la superficie exterior de la torre fueron medidas para 24 direcciones de viento incidente. Se obtuvieron los valores medios, de pico máximo, mínimo y RMS de los coeficientes de presión local y los resultados fueron analizados y comparados considerando la situación de edificio aislado con el caso del entorno edilicio, que representa la situación real. Adicionalmente, fue realizado un análisis de los efectos del número de Reynolds para este tipo de estructuras.

*Palabras-clave: Efectos del entorno urbano, túnel de viento, coeficientes aerodinámicos.*

#### **Abstract**

Special buildings with particular architectural characteristics present difficulties to be evaluated aerodynamically. The building analyzed in this study was built in Punta del Este, Uruguay, it has a height of 80 m and presents a cylindrical external structure with discontinuities that can cause aerodynamic alterations. In this work the test results obtained in the “Jacek P. Gorecki” wind tunnel of the UNNE using a 1/200 scale model of the building are presented. Tests were realized using a simulated natural wind developed by the Counihan method. The scale model of the building reproduces all relevance aerodynamic details; moreover, it was modeled the urban environment to a radius of 200 m, including three very similar rise buildings. Local fluctuating pressures on the external surface of the tower were measured considering 24 incident wind directions. Maximum peak, minimum peak and RMS values of local pressure coefficients were obtained and the results were analyzed and compared considering the situation of isolated building with the case of the urban environment, which represents the real situation. Additionally, an analysis of the Reynolds number effects for such structures was made.

*Keywords: Urban environment effects, wind tunnel, aerodynamic coefficients.*



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos en túnel de viento para el análisis de cargas de viento sobre modelos de estructuras requieren la reproducción de la capa límite atmosférica (CLA) en la cámara de ensayos. Por medio de diversos métodos, desde los años '60 se implementaron estas simulaciones físicas de la CLA. Un poco antes, Jensen (1954) había llevado a cabo experimentos en escala natural con pequeños edificios midiendo las presiones medias, para su comparación con los resultados obtenidos en un túnel de viento. En estos estudios comparativos se emplearon varios tipos de escurrimientos de capa límite, que fueron caracterizados por la longitud de rugosidad, demostrando que cuando este parámetro es igual a la altura del edificio las mediciones coincidían.

Este trabajo y otros publicados a partir de entonces, permitieron establecer que la determinación de cargas de viento, considerando los criterios de semejanza entre modelo y prototipo, requiere la utilización de túneles de viento de capa límite cuyas características son diferentes de aquellos de uso aeronáutico. Para este tipo de túnel se han desarrollado técnicas de simulación de la CLA que permiten reproducir el perfil de velocidades medias y las características turbulentas del flujo atmosférico. Las normas de viento actualmente exigen que, en caso de realizar ensayos en túnel de viento para determinar las cargas aerodinámicas, estos deban incluir la simulación adecuada del flujo de CLA correspondiente.

Por otra parte, cuando en las proximidades de la estructura a analizar existen otras edificaciones de dimensiones importantes, estas ejercen una influencia en las cargas de viento que debe ser considerada en el estudio. De esta forma, los estudios actuales en túneles de viento requieren, además de la simulación del escurrimiento de CLA, el modelado del entorno edilicio hasta un radio determinado, en general, por las propias dimensiones de la estructura a analizar. Lo mismo ocurre en el caso de estructuras a construirse en terrenos topográficamente complejos, cuyas características también deben ser modeladas en la cámara de ensayos del túnel de viento.

Finalmente, la configuración del flujo en torno a una superficie curva depende de las características del viento incidente y, principalmente del Número de Reynolds ( $Re$ ). Estos factores determinan la posición del punto de separación, las características de la estela y la distribución de las presiones externas. Es decir, cuando las formas exteriores presentan curvaturas, los coeficientes de presión son influenciados por el valor de  $Re$ .

En este trabajo, se analiza un edificio construido en Punta del Este, Uruguay, que tiene una altura aproximada de 80 m y presenta una configuración exterior cilíndrica con salientes. Se presentan los resultados obtenidos en ensayos realizados en el Túnel de Viento "Jacek P. Gorecki" de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), sobre el modelo a escala 1/200 del edificio que reproduce todos los detalles de relevancia aerodinámica. Los ensayos fueron realizados utilizando una simulación del viento de CLA realizada a partir del método de Counihan. El modelo a escala incluye el entorno edilicio hasta un radio de 200 m, donde existen tres edificios muy próximos de altura similar al analizado. Las presiones fluctuantes locales en la superficie exterior de la torre fueron medidas para 12 y 24 direcciones de viento incidente, de acuerdo al tipo de ensayo, y a partir de estas mediciones, se obtuvieron los valores medios, de pico máximo, mínimo y RMS de los coeficientes de presión local.

En primer lugar, se realizaron mediciones sobre con el modelo aislado liso y con agregado de rugosidad artificial, para 12 direcciones de viento incidente, con el objeto de verificar posibles modificaciones de las presiones de viento producto de los efectos del número de Reynolds para este tipo de estructuras con superficies exteriores curvas. Finalmente, para

evaluar los efectos del entorno urbano, se realizó una comparación de los resultados obtenidos considerando la situación de edificio aislado con el caso que contempla el entorno edilicio y que representa la situación real.

## 2. EQUIPAMIENTO, INSTRUMENTAL Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Los ensayos fueron realizados sobre un modelo rígido a escala 1/200 en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Se midieron las presiones fluctuantes (instantáneas) en la superficie exterior del modelo a escala reducida por medio de tomas de presión estática conectadas a un sistema SCANIVALVE. Los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde 0 a 360°, a intervalos de 30° para el modelo aislado, y cada 15° cuando se consideran los efectos de vecindad provocado por el entorno urbano en las proximidades del edificio.

### 2.1. Túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE

El túnel “Jacek P. Gorecki” de la Universidad Nacional del Nordeste (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 × 1,8 m de alto × 22,8 m de largo (Figura 1). 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 and Möller, 2000). La regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico.



Figura 1. Túnel de viento “Jacek P. Gorecki”- Universidad Nacional del Nordeste.

## 2.2. Simulación física del viento en la CLA

La capa límite que se desarrolla cuando el escurrimiento de aire fluye sobre una superficie rugosa dispuesta en el piso del túnel de viento, a través del crecimiento natural del espesor de esta capa, requiere una excesiva longitud de rugosidad superficial hasta alcanzar las escalas adecuadas para el análisis de estructuras. Los métodos de rugosidad, barrera y dispositivos de mezcla, que reproducen parámetros medios y fluctuantes en el escurrimiento simulado, permiten superar esta limitación utilizando longitudes de rugosidad relativamente más cortas. Los métodos propuestos por Counihan y Standen permiten desarrollar simulaciones de espesor total, que permite escalas aceptables para algunas aplicaciones estructurales, como así también, simulaciones de espesor parcial, que reproducen la parte más baja de la CLA, y permiten obtener factores de escala mayores (Cook, 1978).

El factor de escala en el método de la simulación del espesor total puede ser determinado por la relación entre la altura gradiente de la CLA y el espesor de la capa límite simulada. Esta relación no puede ser obtenida en una simulación parcial, ya que no se reproduce la parte superior de la CLA. Entonces, para estimar el factor de escala, independientemente del espesor de la capa límite simulada, los parámetros característicos de la turbulencia medidos en el túnel son escalados y comparados con datos atmosféricos (Cook, 1982).

Para estos ensayos, la técnica de simulación implementada en el túnel de viento se encuentra comprendida dentro de los métodos de rugosidad, barrera y dispositivo de mezcla. La longitud de rugosidad superficial sobre el piso del túnel, durante los ensayos se modificó en función de la categoría de terreno a reproducir. A barlovento, se ubican cuatro generadores de vorticidad del tipo Counihan para generar un déficit inicial de cantidad de movimiento (Figura 2) y distribuirlo en altura para obtener características semejantes a las atmosféricas. 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. 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 de exponente  $n$  o la ley logarítmica (Cook, 1977). Los perfiles de velocidad media de los dos tipos de escurrimiento incidente utilizados en estos ensayos son indicados también en la Figura 3. El escurrimiento indicado como CL1 se aproxima al de una zona marítima ( $n = 0,09$ ), mientras que CL2 se puede asociar a una zona más próxima a la 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 referida a las categorías de terreno puede encontrarse en el trabajo de Blessmann (1995).

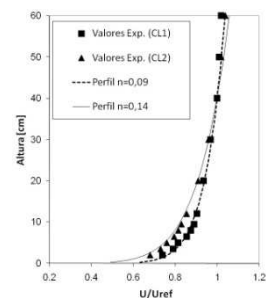
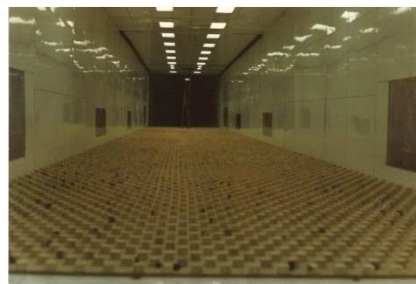


Figura 2. Generadores de Counihan, elementos de rugosidad para la simulación de la CLA y perfiles de velocidad característicos.



### 2.3. Descripción del modelo de la torre instrumental de medición

Para que los coeficientes de presión obtenidos sobre el modelo guarden correspondencia con la estructura real deben respetarse las condiciones de semejanza. En el caso de un modelo rígido, debe mantener la semejanza geométrica con la estructura real, con una escala geométrica que en este caso es 1:200, reproduciendo los detalles de relevancia aerodinámica. Para analizar los efectos del entorno urbano, se evaluaron dos situaciones: el modelo aislado y el modelo incluyendo los edificios cercanos de tamaño aerodinámicamente relevante, que modifican las características del viento atmosférico, reproducidos tal como se indica en la Figura 3.



Figura 3. Modelo del edificio torre aislado y con reproducción del entorno inmediato en la cámara de ensayos del túnel de viento.

En Figura 4 se indican la orientación de los ejes de referencia adoptados, la dirección de viento incidente correspondiente a  $0^\circ$  y el sentido de giro para las sucesivas rotaciones de  $15^\circ$  que determinan las 24 direcciones de viento analizadas. En el caso del modelo aislado, las rotaciones fueron de  $30^\circ$  determinándose 12 direcciones de viento incidente.

El factor de bloqueo, determinado por la relación entre el área total expuesta y el área de la sección transversal de la cámara de ensayos del túnel, fue obtenido para las direcciones de viento correspondientes a  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . El área expuesta fue calculada haciendo la proyección de los modelos del edificio principal y los adyacentes sobre el plano normal a la dirección correspondiente. El valor del factor de bloqueo calculado para estas direcciones es aproximadamente 8 %.

### 2.4. Instrumental de medición

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 micro-manómetro de Betz. Para el análisis de las velocidades fluctuantes se utilizó un anemómetro de hilo caliente Dantec 56C con una placa de adquisición PCI-DAS 1602/16.

Los registros de presiones fluctuantes de las tomas de presión ubicadas sobre la superficie de la torre, fueron obtenidos mediante un sistema de medición de presiones simultáneas Scanivalve Corp. de 128 canales. Cada registro contiene 8192 valores por canal a una frecuencia de adquisición de 488,28 Hz. La presión dinámica de referencia  $q$  se obtuvo en forma simultánea a los registros de presiones conectando un tubo de Pitot-Prandtl a uno de los canales del sistema

de medición, que se ubicó a barlovento del modelo (zona no perturbada) a la altura de referencia, equivalente a la altura máxima del modelo.

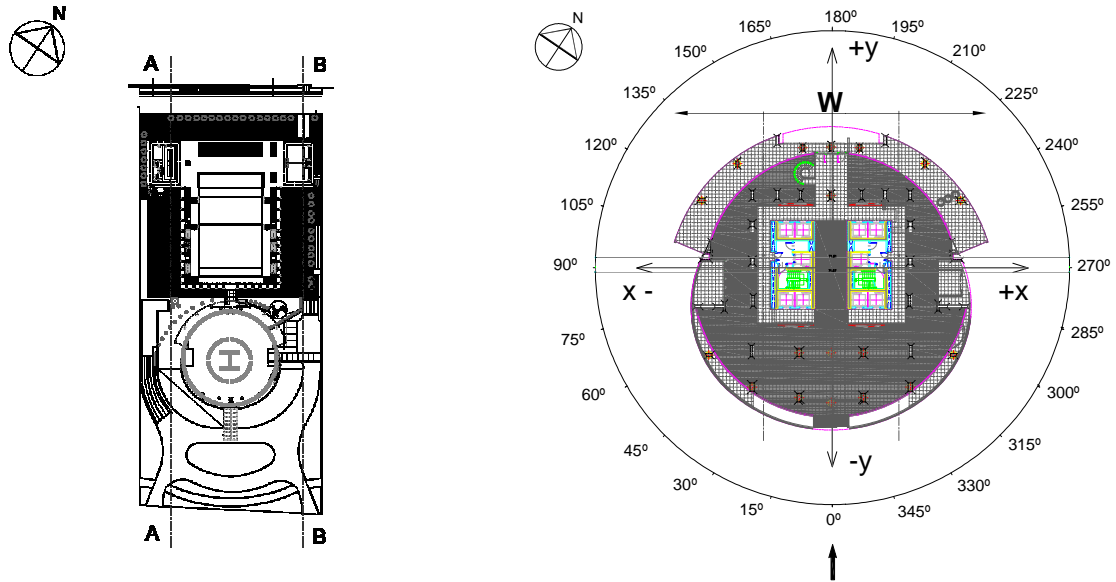


Figura 4. Esquema de ubicación del modelo, ejes de referencia adoptados e indicación de las direcciones de viento incidente.

## 2.5. Efecto del Número de Reynolds

En las superficies curvas, la capa límite que se desarrolla presenta características particulares que influye en la distribución de presiones. Específicamente, se define un punto de separación cuya localización depende de las características de viento incidente y del número de Reynolds ( $Re$ ) basado en el radio de curvatura. Para estudios con modelos a escala reducida es de fundamental importancia tener en cuenta el punto de separación para obtener distribuciones de presión semejantes a las del prototipo (Blessmann, 2011).

Existen trabajos experimentales sobre cilindros lisos y rugosos que permiten localizar con bastante precisión el punto de separación en este tipo de cuerpos en función de  $Re$ . El aumento de la rugosidad superficial, así como la utilización de hilos transversales al escurrimiento permiten modificar la ubicación del punto de separación para obtener condiciones de semejanza más próximas al prototipo. En la recopilación realizada por Blessmann (2009) se incluyen datos experimentales y resultados para diferentes coberturas curvas ensayados en túneles de viento que significan un gran aporte al momento de tener que definir nuevos experimentos o analizar estructuras de este tipo.

Con base en el trabajo desarrollado por Blessmann (1987) en el túnel de viento de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) con simulación de la CLA, considerando el efecto de  $Re$  para modelos con superficies curvas de diferentes relaciones geométricas, y la posterior investigación de la influencia ejercida por marquesinas en la acción del viento sobre techos curvos de pabellones industriales que realizó Paluch (1993), se simuló artificialmente la rugosidad en la superficie curva exterior del modelo. Con este fin, se dispusieron pequeñas bandas metálicas verticales sobre la superficie curva del modelo principal. Este análisis se llevó a cabo únicamente para el caso de los ensayos con el modelo aislado.

## 2.6. Distribución de tomas de presión estática

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.

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. Se caracteriza porque las tomas se ubican en las áreas expuestas directamente a la acción del viento, y comprende aquellas ubicadas en los pisos 2, 7, 11, 16, 22 y el Nivel B del helipuerto. En la Figura 5, se aprecian las vistas laterales y ubicación de las tomas de presión estática en los distintos niveles. En Figura 6 se presenta la distribución de las mismas en planta.

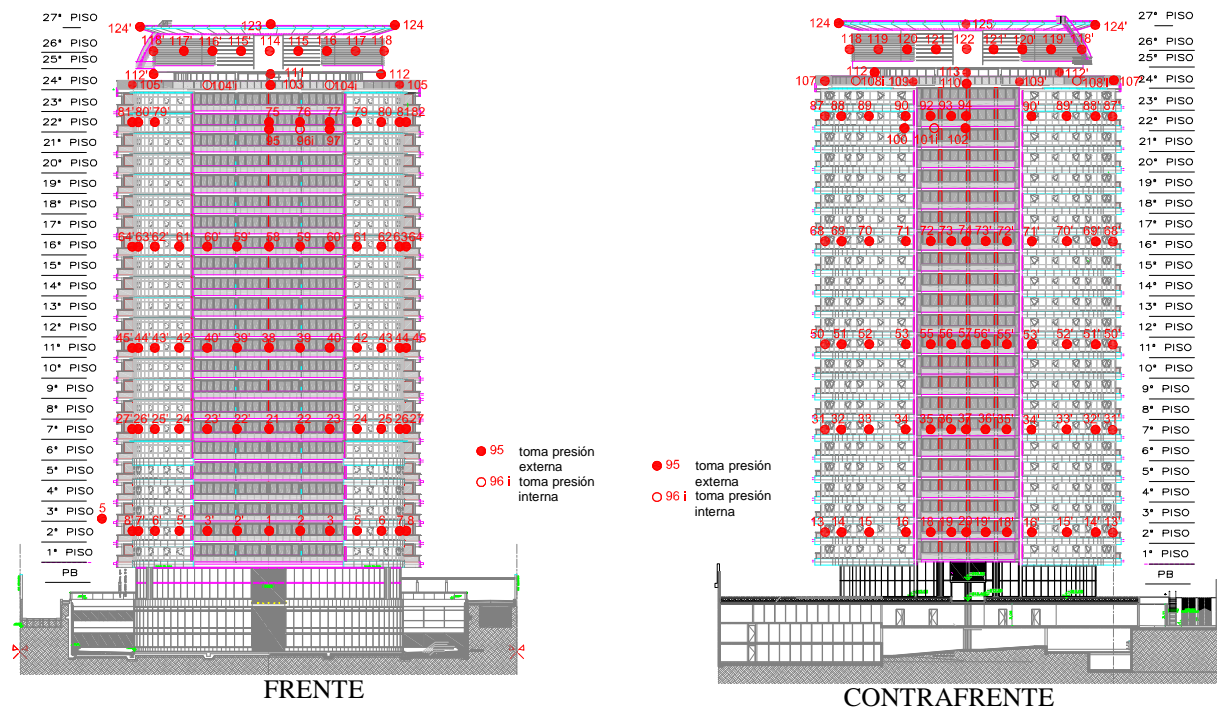


Figura 5. Esquema de ubicación del modelo, ejes de referencia adoptados e indicación de las direcciones de viento incidente.

El segundo grupo, como se observa en Figura 7, corresponde a la zona de balcones abiertos, barandas de terraza y niveles A y C del helipuerto, las que se instrumentaron con tomas de presión estática externas e internas. Asimismo, sólo se agregaron tomas de presión en los balcones aerodinámicamente representativos. En estos puntos sólo se consignan valores de coeficientes ya que están referidas a elementos estructurales específicos e individuales, o bien no reciben la incidencia directa del viento.



# XXXVII JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL

02 AL 04 NOV 2016 / ASUNCIÓN-PARAGUAY

*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

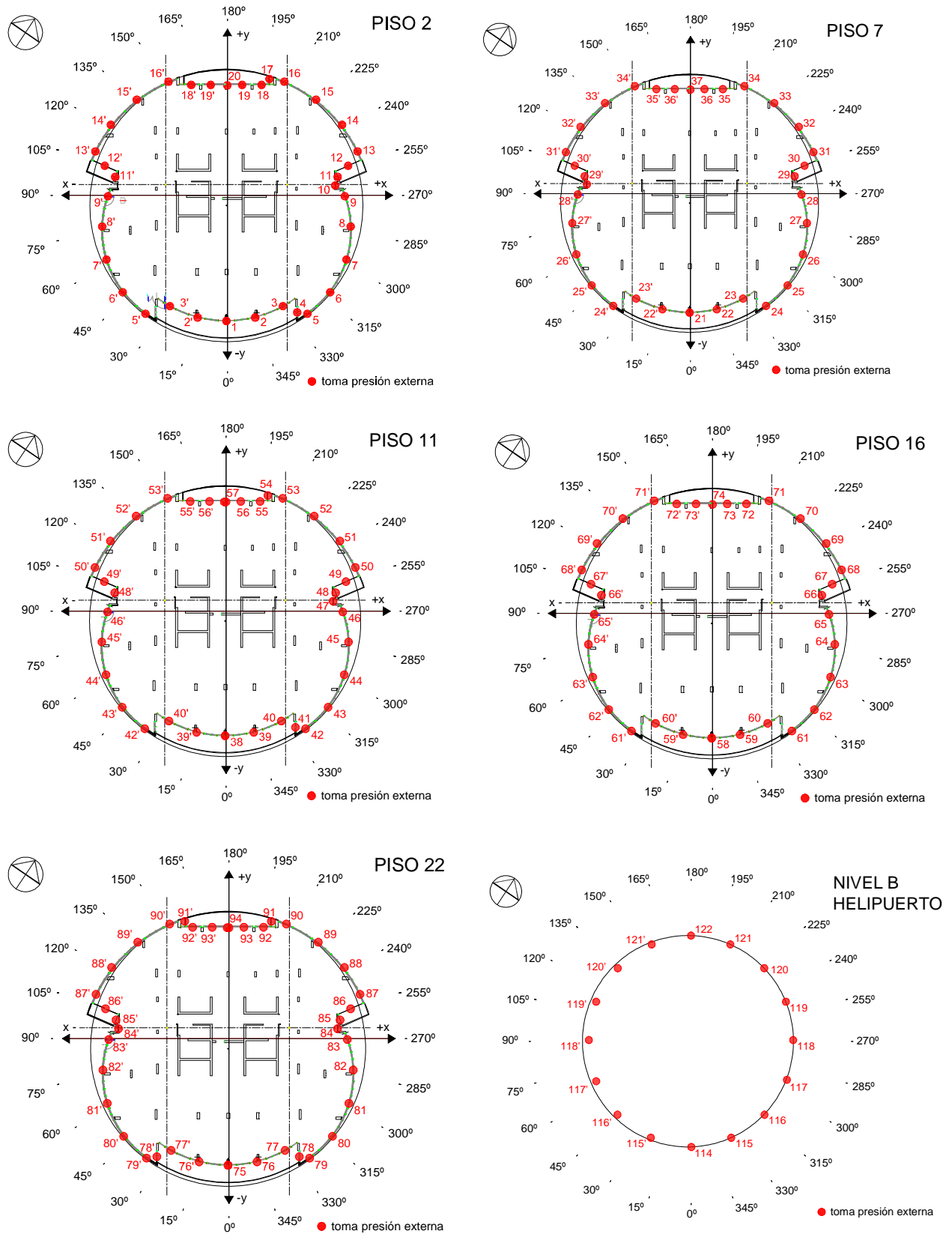


Fig. 6: Ubicación de las tomas de presión sobre la estructura vista en planta.



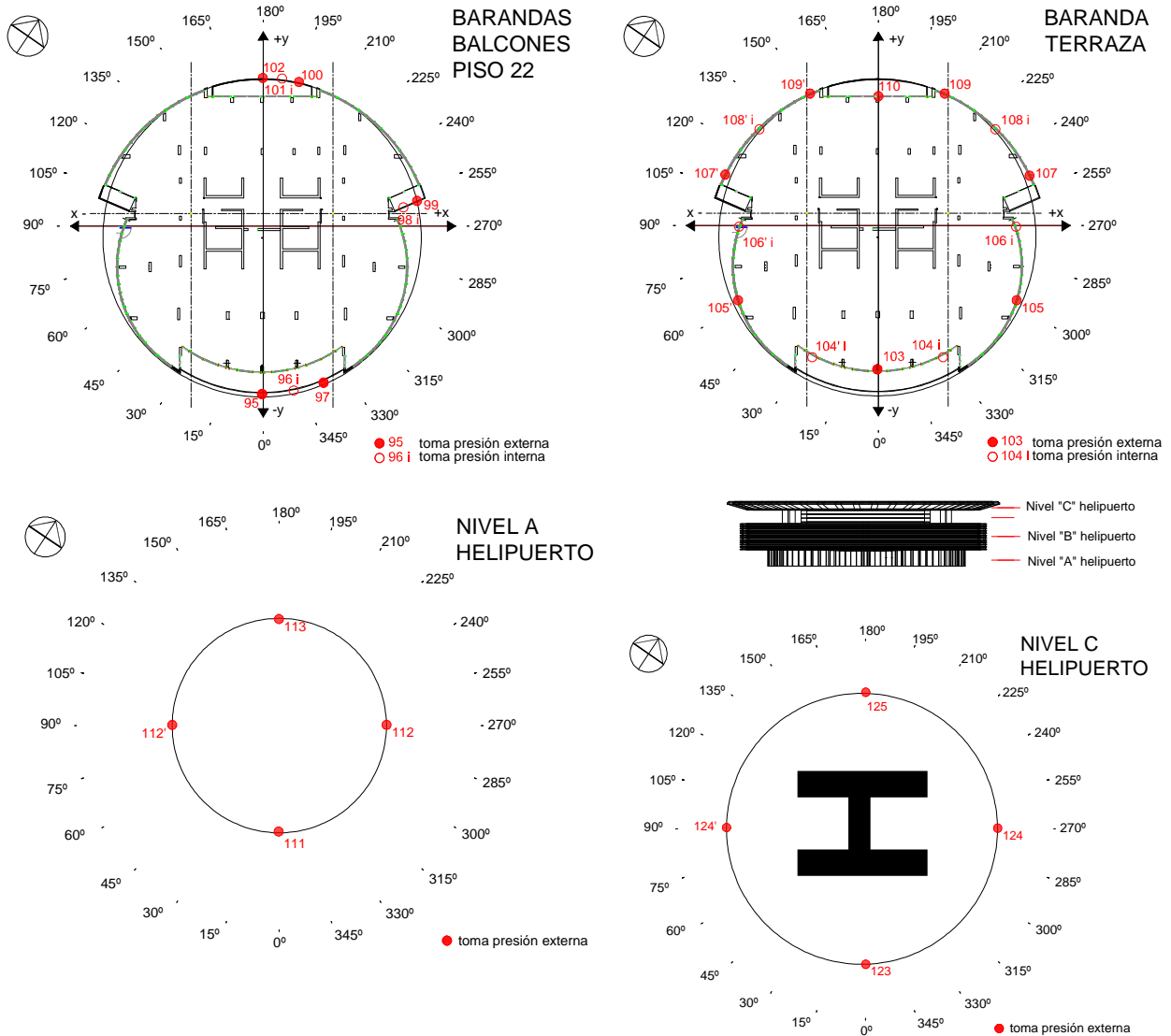


Fig. 7: Ubicación en Planta de tomas de presión sobre elementos estructurales específicos.

### 3. COEFICIENTES DE CARGA AERODINÁMICA

#### 3.1. Coeficientes de presión local

A partir de los registros temporales de las presiones de viento, fueron calculados los coeficientes de presión externa en las fachadas del modelo. El coeficiente de presión media se determina mediante,

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

el coeficiente del valor RMS de presión,

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

y los coeficientes de pico máximo y mínimo,

$$\hat{c}_p = \frac{P_{max}}{q} \quad (3)$$

$$\tilde{c}_p = \frac{P_{min}}{q} \quad (4)$$

siendo:

$p(t)$  presión instantánea (fluctuante) en la superficie del edificio, medida con respecto a la presión estática de referencia;

$\bar{p}$  valor medio de  $p(t)$  para el tiempo de muestreo  $T$ ;

$p_{max}$  valor máximo de  $p(t)$  para el tiempo de muestreo  $T$ ;

$p_{min}$  valor mínimo de  $p(t)$  para el tiempo de muestreo  $T$ ;

$t$  variable tiempo;

$T$  el tiempo de muestreo;

$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2$  presión dinámica de referencia;

$\rho$  densidad del aire;

$\bar{V}$  la velocidad media de referencia a una altura de referencia.

### 3.2. Coeficientes de fuerza global

La fuerza normal a la superficie de la torre, provocada por la presión estática local en relación a las áreas tributarias superficiales, se proyectaron en los ejes ortogonales  $x$  e  $y$ .

Los coeficientes de fuerza para cada eje son:

$$C_{fx} = \frac{F_x}{q_z A_M}; C_{fy} = \frac{F_y}{q_z A_M} \quad (5)$$

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, medida a la altura de referencia.



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

El área de referencia,  $A_R$ , definida como:

$$A_R = B_I H_I \quad (6)$$

donde,

$B_I$ : ancho de la fachada I correspondiente al frente de la torre.

$H_I$ : altura total de la fachada I correspondiente al frente de la torre.

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:

$$C_{f_x} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \operatorname{sen} \beta_j}{A_R}; \quad C_{f_y} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \operatorname{cos} \beta_j}{A_R} \quad (7)$$

donde,

$n$ : es el número de tomas de la torre.

$c_{p_j}$ : es el coeficiente de presión neta o total correspondiente a la toma  $j$ .

$A_j$ : es el 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.

$A_R$ : área maestra de referencia.

### 3.3. 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:

$$C_{V_x} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \operatorname{cos} \beta_j h_j}{A_R H_I}; \quad C_{V_y} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \operatorname{sen} \beta_j h_j}{A_R H_I} \quad (8)$$

donde,

$n$ : es el número de tomas de presión de la torre.

$c_{p_j}$ : es el coeficiente de presión neta o total correspondiente a la toma  $j$ .

$A_j$ : es el 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.

$h_j$ : altura de toma de presión  $j$  medida desde nivel del suelo.

$H_I$ : altura total de la fachada I correspondiente al frente de la torre.

$A_R$ : área maestra de referencia.

### 3.4. Coeficientes de momento Torsor ( $C_{Mt}$ )

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:

$$C_{M_{zy}} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \cos \beta_j x_j}{A_R B_I} ; \quad C_{M_{zx}} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \operatorname{sen} \beta_j y_j}{A_R B_I} \quad (9)$$

donde,

$x_j$  e  $y_j$  son las distancias desde la toma a el centro de rigidez de la sección transversal.

El coeficiente de momento torsor resultante, es definido como  $C_{Mt} = C_{M_{zx}} + C_{M_{zy}}$

## 4. RESULTADOS

A continuación se describen los resultados obtenidos en los ensayos realizados con el modelo aislado para el caso del modelo “liso” y para el caso en que se simula el efecto del número de  $Re$ , y finalmente, aquellos que se obtuvieron considerando el modelo con el entorno edilicio en las proximidades del edificio principal. En primer lugar se presentan los coeficientes de carga globales, incluyendo coeficientes de fuerza, de volcamiento y de momento torsor, luego los coeficientes locales medios, y finalmente, los coeficientes locales de valor RMS, máximo y mínimo. En el caso de los coeficientes locales, en cada caso, se presenta un conjunto de valores seleccionados con el fin de ilustrar algunos comportamientos que pudieron registrarse en los ensayos.

### 4.1. Coeficientes de carga aerodinámica globales

En las Tablas 1 y 2 se presentan los coeficientes globales obtenidos para el caso de modelo aislado liso y con elementos de rugosidad para evitar el efecto del número de  $Re$ , respectivamente. Se incluyen coeficientes de fuerza en las direcciones  $x$  e  $y$ , y resultante, de volcamiento y de momento torsor. Debido a la simetría del modelo, se analizaron solamente las direcciones que van de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , en este caso cada  $30^\circ$  definiendo 7 direcciones de viento incidente.

La comparación de los coeficientes globales para ambas situaciones, liso y con rugosidad artificial, permite verificar una gran semejanza de los valores. Esta similitud puede justificarse por el efecto localizado que provocan los balcones y las aristas que interrumpen la curvatura externa, actuando aerodinámicamente como elementos de rugosidad. Por otro lado, es importante mencionar que, si bien no se presentan los coeficientes locales, estos indican una distribución de presiones que se mantiene con pocas alteraciones en ambos casos.



Tabla 1. Coeficientes Globales para el modelo aislado.

	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
$C_{fx}$	0.01	0.60	0.51	0.64	0.39	0.16	0.00
$C_{fy}$	0.52	0.63	0.50	0.08	-0.41	-0.46	-0.63
$C_{fr}$	0.52	0.87	0.71	0.65	0.56	0.48	0.63
$C_{Vx}$	0.43	0.51	0.41	0.05	-0.33	-0.35	-0.49
$C_{Vy}$	0.00	0.49	0.41	0.54	0.31	0.12	0.00
$C_{Vr}$	0.43	0.71	0.58	0.55	0.45	0.37	0.49
$C_{Mt}$	0.00	-0.28	-0.25	-0.01	0.27	0.31	0.00

Tabla 2. Coeficientes Globales para el modelo aislado con agregado de rugosidad artificial.

	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
$C_{fx}$	0.01	0.59	0.51	0.65	0.48	0.22	0.00
$C_{fy}$	0.54	0.67	0.52	0.09	-0.36	-0.48	-0.69
$C_{fr}$	0.54	0.89	0.73	0.66	0.60	0.53	0.69
$C_{Vx}$	0.45	0.54	0.42	0.06	-0.29	-0.38	-0.55
$C_{Vy}$	0.00	0.48	0.42	0.55	0.39	0.17	0.00
$C_{Vr}$	0.45	0.72	0.59	0.55	0.49	0.41	0.55
$C_{Mt}$	0.00	-0.28	-0.25	-0.02	0.24	0.29	0.00

En la Tabla 3 se indican los coeficientes globales obtenidos con el modelo del edificio incluyendo el entorno urbano próximo. Los valores incluyen los mismos coeficientes de fuerza, volcamiento y torsor obtenidos para el modelo aislado, pero en este caso se obtienen cada 15° y, dado que el entorno no es simétrico, desde 0° a 360°, determinando 24 direcciones de viento incidente. La comparación de los coeficientes de fuerza y volcamiento entre modelo aislado y con el entorno indica un aumento definido de valores del orden del 30 % para los casos en que los edificios del entorno se disponen lateral u oblicuamente al modelo principal (0°, 30°, 150° y 180°) y una disminución superior al 50 % en las direcciones en que los modelos están alineados con el escurrimiento (90°). Respecto a los coeficientes de momento torsor, la tendencia es similar pero como se podía esperar los valores de estos coeficientes así como las diferencias entre ambos casos son relativamente pequeñas. Es importante señalar que, dada la semejanza entre los valores de los coeficientes globales para modelo aislado liso y con rugosidad artificial, la comparación con los valores que incluyen el modelo del entorno se realizó utilizando solo modelo liso.

#### 4.2. Coeficientes locales de presión media para el caso de modelo aislado y modelo completo

Para complementar el análisis de las diferencias entre los valores de coeficientes globales en el caso del modelo completo que incluye el entorno próximo y el caso de modelo aislado se analizaron los coeficientes locales para dos direcciones diferentes: 0° y 90°. La Tabla 4 indica un conjunto de tomas características de zonas puntuales y los correspondientes valores de los coeficientes para el modelo completo y aislado respectivamente, siempre con viento incidente a

0°. Verificando la posición de los puntos en la Figura 6 es posible analizar porqué de acuerdo a la ubicación respectiva de la toma en algunos casos la variación de los coeficientes es significativa o no. Como ejemplo de variación significativa, podemos mencionar el aumento de los valores para modelo completo en las tomas 6 y 7, y la disminución o constancia en las tomas 6' y 7'. La comparación de los valores locales, analizados en su conjunto, se condice con los resultados de la comparación de valores de los coeficientes globales mostrada anteriormente.

Tabla 3. Coeficientes Globales para el modelo incluyendo el entorno urbano.

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
$C_{fx}$	0,22	0,59	0,77	0,70	0,57	0,36	0,23	0,18	0,18	0,27	0,24	0,06
$C_{fy}$	0,75	0,62	0,66	0,63	0,51	0,34	0,00	-0,19	-0,37	-0,50	-0,64	-0,85
$C_{fr}$	0,78	0,86	1,02	0,94	0,77	0,49	0,23	0,26	0,41	0,56	0,68	0,85
$C_{Vx}$	0,58	0,48	0,53	0,52	0,43	0,29	-0,01	-0,19	-0,33	-0,40	-0,50	-0,67
$C_{Vy}$	0,16	0,48	0,62	0,57	0,49	0,33	0,19	0,13	0,13	0,20	0,19	0,03
$C_{Vr}$	0,61	0,68	0,82	0,77	0,65	0,44	0,19	0,23	0,35	0,45	0,53	0,67
$C_{Mt}$	-0,06	-0,24	-0,32	-0,28	-0,22	-0,16	0,02	0,18	0,25	0,31	0,32	0,21

Tabla 3. (Continuación).

	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
$C_{fx}$	0,07	-0,02	-0,04	-0,17	-0,15	-0,06	-0,19	-0,28	-0,49	-0,59	-0,60	-0,27
$C_{fy}$	-0,90	-0,91	-0,79	-0,52	-0,35	-0,16	-0,05	0,37	0,48	0,64	0,73	0,83
$C_{fr}$	0,90	0,91	0,79	0,55	0,38	0,17	0,19	0,46	0,68	0,87	0,94	0,87
$C_{Vx}$	-0,71	-0,71	-0,62	-0,42	-0,29	-0,14	-0,05	0,30	0,39	0,52	0,57	0,63
$C_{Vy}$	0,03	-0,04	-0,06	-0,15	-0,12	-0,05	-0,15	-0,24	-0,42	-0,50	-0,52	-0,25
$C_{Vr}$	0,71	0,72	0,62	0,44	0,32	0,15	0,15	0,39	0,57	0,72	0,77	0,68
$C_{Mt}$	0,04	-0,12	-0,27	-0,33	-0,29	-0,23	-0,09	0,19	0,25	0,31	0,35	0,18

Tabla 4. Comparación de coeficientes locales de presión para modelo completo y aislado - dirección de 0°.

Tomas	Completo	Aislado	Tomas	Completo	Aislado	Tomas	Completo	Aislado
2	0,45	0,57	14	-0,95	-0,57	25	-1,28	-0,81
3	0,46	0,49	15	-0,94	-0,60	26	-1,42	-0,97
2'	0,50	0,57	14'	-0,82	-0,57	25'	-0,54	-0,81
3'	0,56	0,49	15'	-0,85	-0,60	26'	-0,92	-0,97
6	-0,98	-0,71	22	0,68	0,66	32	-0,95	-0,58
7	-1,29	-0,94	23	0,53	0,58	33	-0,99	-0,60
6'	-0,47	-0,71	22'	0,72	0,66	32'	-0,84	-0,58
7'	-0,93	-0,94	23'	0,64	0,58	33'	-0,85	-0,60

La Tabla 5 muestra la comparación de los coeficientes locales de presión en tomas puntuales para el modelo completo y aislado respectivamente, en este caso para la dirección correspondiente a 90°. De la misma forma, analizando la posición de los puntos en la Figura 6 es posible justificar la variación de los coeficientes de acuerdo a la ubicación respectiva de la toma. Por ejemplo, en las tomas 9, 11, 12, 13 y 14 se verifica una disminución de la succión para modelo completo, mientras que en las tomas 9', 11', 12', 13' y 14', el modelo completo indica succiones muy bajas y el aislado indica sobrepresiones. Para esta dirección de viento incidente, el análisis de los valores locales en su conjunto, se condice con los resultados de la comparación de valores de los coeficientes globales para el modelo aislado y para el modelo completo.

Tabla 5. Comparación de coeficientes locales de presión para modelo completo y aislado - dirección de 90°.

Tomas	Completo	Aislado	Tomas	Completo	Aislado	Tomas	Completo	Aislado
9	-0,38	-0,54	32	-0,37	-0,70	68	-0,41	-0,64
11	-0,35	-0,59	33	-0,39	-0,70	69	-0,42	-0,62
12	-0,32	-0,50	28'	-0,23	0,71	70	-0,42	-0,62
13	-0,41	-0,70	29'	-0,21	0,68	68'	-0,23	0,43
14	-0,38	-0,69	30'	-0,21	0,72	69'	-0,04	0,05
9'	-0,13	0,63	31'	-0,16	0,34	70'	0,02	-0,59
11'	-0,19	0,56	32'	-0,05	-0,01	87	-0,46	-0,60
12'	-0,17	0,66	33'	-0,04	-0,50	88	-0,44	-0,59
13'	-0,05	0,31	50	-0,38	-0,70	87'	-0,07	0,56
14'	-0,07	0,02	51	-0,40	-0,68	88'	0,12	0,08
28	-0,33	-0,56	52	-0,35	-0,67	106	-0,43	-0,52
29	-0,32	-0,53	50'	-0,21	0,37	107	-0,43	-0,60
30	-0,32	-0,54	51'	-0,09	0,01	106'	0,44	-0,25
31	-0,37	-0,71	52'	-0,05	-0,55	107'	0,03	0,48

#### 4.3. Coeficientes locales de valor máximo, mínimo y RMS de presión

Finalmente, en la Tabla 6 se presenta la comparación de los coeficientes locales de valor máximo, mínimo y RMS de presión, considerando el modelo completo y aislado, respectivamente, para la dirección de viento incidente de 0°. En general, los coeficientes de valor RMS son mayores en el caso del modelo completo. Por otro lado, los coeficientes de valor máximo y mínimo muestran coherencia con los respectivos valores medios y RMS.

## 5. CONCLUSIONES

A través de una serie de ensayos en el Túnel de Viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE fueron analizadas las cargas aerodinámicas en un edificio construido en Punta del Este, Uruguay, que tiene una altura aproximada de 80 m y presenta características particulares que podrían dificultar la evaluación de la acción del viento. Los ensayos fueron realizados utilizando una

simulación de viento natural realizada a partir del método de Counihan y un modelo a escala 1/200, donde se reprodujeron todos los detalles de relevancia aerodinámica. Se obtuvieron los valores medios, de pico máximo, mínimo y RMS de los coeficientes de presión local, como así también los coeficientes de carga globales.

El análisis de los efectos del número de Reynolds, a través de la comparación de los coeficientes globales para el modelo liso y con rugosidad artificial, permite verificar que los balcones y las aristas actúan como elementos de rugosidad en sí mismos, de forma tal que los valores en ambos casos resultan muy semejantes. La comparación de los resultados obtenidos con el edificio aislado y el caso que considera el entorno edilicio indica un aumento definido de valores para los casos en que los edificios del entorno se ubican lateralmente y provocan mayor bloqueo, y por el contrario, una disminución bastante marcada ocurre para las direcciones en que los modelos están alineados con el escurrimiento. Si bien no fue verificado experimentalmente, los valores de las coeficientes locales alternando valores positivos y negativos a uno y otro lado del eje de simetría, para la dirección en que los modelos se alinean con el escurrimiento, estarían indicando la generación de un vórtice vertical entre el edificio principal y uno de los adyacentes.

Los coeficientes de presión máximos, mínimos y RMS indican valores mayores para el caso en que se incluye el entorno urbano. Este dato resulta importante al momento de la evaluación de efectos localizados que actualmente se pueden calcular por métodos que incluyen valores RMS o directamente valores máximos y mínimos. El uso de una aproximación cuasi-estática, por ejemplo, implica definir coeficientes locales de presión asociados a diferentes tiempos de ráfaga que dependen de la estructura o componente a analizar y permiten cálculos más aproximados de las cargas locales (Wittwer et al., 2014).

Tabla 6. Comparación de coeficientes locales de valor máximo, mínimo y RMS de presión - dirección de 0°.

Tomas	Modelo Completo				Modelo Aislado			
	Medio	Máximo	Mínimo	RMS	Medio	Máximo	Mínimo	RMS
2	0,45	1,47	-0,13	0,19	0,57	1,54	-0,04	0,19
3	0,46	1,76	-0,14	0,20	0,53	1,45	-0,02	0,19
6	-0,98	0,37	-2,14	0,32	-0,71	0,21	-1,47	0,21
7	-1,29	-0,33	-2,26	0,24	-0,94	-0,39	-1,64	0,18
6'	-0,47	0,63	-1,41	0,22	-0,71	0,21	-1,47	0,21
7'	-0,93	-0,05	-1,66	0,18	-0,94	-0,39	-1,64	0,18
14	-0,95	-0,50	-1,44	0,13	-0,57	-0,22	-1,07	0,09
15	-0,94	-0,52	-1,48	0,13	-0,60	-0,27	-1,19	0,10
14'	-0,82	-0,34	-1,34	0,12	-0,57	-0,22	-1,07	0,09
15'	-0,85	-0,42	-1,34	0,12	-0,60	-0,27	-1,19	0,10

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE: Beatriz Iturri, Julián Ortiz y Amadeo Arrieta. Para el desarrollo del trabajo experimental se contó con el apoyo de la Facultad de Ingeniería y la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNNE.





*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blessmann, J. (1987), Ação do vento em coberturas curvas, Cadernos Técnicos 1a e 2a parte, CT-88, CT-94, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil-UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Blessmann, J. (1995). O vento na engenharia estrutural. Porto Alegre. Ed. Universidade. UFRGS.
- Blessmann, J. (2009). Ação do Vento em Telhados. Editora da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Blessmann, J. (2011). Aerodinâmica das Construções. Editora da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- 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.
- 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.
- Cook, N. J. (1982). Simulation techniques for short test-section wind tunnels: roughness, barrier and mixing-device methods. *Wind tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*, Cambridge university press, pp. 126-136.
- Jensen, M. (1954). The model law for phenomena in natural wind. *Ingenioren (International edition)*, 2 (4).
- Paluch, M. J. (1993) Influência da Presença de Marquises na Distribuição de Pressões Exercidas pelo Vento na Cobertura Curva de Pavilhões Industriais, Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- 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.
- Wittwer, A. R., Loredo-Souza, A. M., Oliveira, M. K., De Bortoli, M., Marighetti J. (2014). Análisis Experimental de Cargas de Viento Localizadas en un Edificio de gran Altura, Memorias de XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Montevideo, Uruguay.