

## EVALUACIÓN DE CARGAS GLOBALES Y LOCALIZADAS DEL VIENTO INCIDENTE EN UN EDIFICIO DE GRAN ALTURA MEDIANTE ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO

### EVALUATION AND WIND TUNNEL TESTING OF GLOBAL AND LOCAL WIND LOADS ON A HIGH RISE BUILDING

Mario E. De Bortoli (P) (1); Jorge O. Marighetti (2); Adrián R. Wittwer (3), Gisela M. Alvarez y Alvarez (4)

- (1) Dr. Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, UNNE, Argentina.  
(2) M. Sc. Ing. Mecánico, Facultad de Ingeniería, UNNE, Argentina.  
(3) Dr. Ing. Mecánico, Facultad de Ingeniería, UNNE, Argentina.  
(4) Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, UNNE, Argentina.  
m\_debortoli@yahoo.com.ar

#### Resumen

Para determinar la carga sobre estructuras civiles de cierta magnitud con fachadas superficiales de *curtain wall* es relevante analizar las cargas superficiales de corta duración producidas por el viento. Las máximas cargas localizadas de viento usualmente están asociadas a fluctuaciones de corta duración y pequeñas áreas tributarias, cuyo valor no es previsto por el método cuasi-estático, procedimiento utilizado por normas y códigos de viento.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en estudios solicitados por MNS S. A. realizados en el Túnel de Viento de la Universidad Nacional del Nordeste, sobre el modelo a escala 1/200 del edificio a construirse en la ciudad de Posadas (Argentina) de 85 m de altura aproximadamente. Primero se determinan los valores medios de los coeficientes de presión local, picos máximos, mínimos y desvío estándar y luego las cargas globales.

Los ensayos fueron realizados con una simulación de viento natural de espesor total, con exponente de la ley potencial de velocidades medias de 0,21. Los registros de presiones fluctuantes, para el análisis de valores extremos, fueron obtenidos con una frecuencia de adquisición de 428,28 Hz. En el modelo a escala del edificio, se reprodujeron los detalles de relevancia aerodinámica. Las mediciones de presiones locales para la torre, se realizaron considerando el efecto de vecindad por el entorno edilicio con viento incidiendo desde 0° a 360°, a intervalos de 15°.

*Palabras-clave: Edificios altos, Presiones estáticas fluctuantes, Túnel de Viento.*

#### Abstract

Wind superficial loads of short duration must be analyzed on load determination in high rise building with curtain wall outer covering. Usually highest local wind loads are associated with short duration fluctuations and small tributary areas, whose values are not contemplated in the quasi-static method, procedure used in wind codes.

The results obtained from studies in the Universidad Nacional del Nordeste wind tunnel requested by MNS S. A. are presented. The tests were realized using a 1/200 scale model of the 85 m height building that will be built in Posadas city (Argentina). Local mean, maximum and minimum and standard deviation pressure coefficients are determinate, then global loads are calculated.

A full depth natural wind simulation, with a 0,21 mean velocity power law exponent was employed in the experiments. Fluctuating pressures data, for extreme values analysis, were obtained by a 488,28 Hz acquisition frequency. Aerodynamic details were reproduced in the building model. Local pressure measurements on the tower were realized considering the effect of vicinity with incident wind from 0° to 360°.

*Keywords: high-rise buildings, fluctuating static pressures, wind tunnel.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El Reglamento Argentino de Acción del Viento Sobre las Construcciones, CIRSOC 102 (2001), especifica coeficientes de carga aplicables a estructuras de formas regulares y de pequeño porte. El reglamento aclara que cuando la estructura posee grandes dimensiones, formas geométricas inusuales o efectos de vecindad por la presencia de edificios cercanos es necesario estudiar más detalladamente la estructura en túnel de viento. Esto además permite lograr un proyecto más seguro desde el punto de vista de las acciones del viento.

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

El Reglamento especifica en el Capítulo 6 que las condiciones mínimas a cumplir en los ensayos en túnel de viento con modelos reducidos son: que la capa límite atmosférica natural ha sido modelada para tener en cuenta la variación de la velocidad del viento con la altura, las escalas de la componente longitudinal de la turbulencia atmosférica están modeladas aproximadamente a la misma escala que la usada para modelar el edificio u otra estructura, el edificio u otra estructura modelada, las estructuras y topografía circundantes son geoméricamente similares a sus contrapartes en escala natural, entre otras.

El presente estudio fue realizado por el Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) para determinar las acciones provocadas por viento atmosférico sobre una torre a construirse en la ciudad de Posadas, provincia de Misiones, mediante análisis experimental en túnel de viento sobre un modelo a escala reducida. Se reprodujo el entorno edilicio para considerar el efecto de vecindad y se determinaron los coeficientes de presión local y coeficientes de fuerza global para 24 direcciones de viento incidente.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Los ensayos fueron realizados sobre un modelo rígido a escala reducida considerando 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. Fue construido un modelo reducido del edificio-torre, con su entorno natural y artificial reproducido hasta aproximadamente una distancia de 2,5 veces la altura de la torre, en escala geométrica 1/200, compatible con la escala del viento atmosférico simulado en el túnel de viento (Cook, 1977/1978). 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.

Se midieron las presiones fluctuantes en la superficie exterior del modelo reducido por medio de tomas de presión estática, utilizando un sistema de medición scanivalve de  $2 \times 64$  canales simultáneos. Posteriormente se determinaron coeficientes de presión local correspondientes a las tomas de presión. Los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , a intervalos de  $15^\circ$ . Con los datos de las mediciones, para cada dirección de viento analizada, se determinaron los coeficientes de fuerza global.

### 3. TÉCNICA DE SIMULACIÓN DE CAPA LÍMITE EN EL TUNEL DE VIENTO

El túnel "Jacek P. Gorecki" de la UNNE es un túnel de capa límite de circuito abierto, con una cámara de ensayo de 2,4 m de ancho  $\times$  1,8 m de alto  $\times$  22,8 m de largo (Wittwer and Möller, 2000). 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 (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 estableció en función de la categoría de terreno a reproducir. A barlovento, se ubican dos generadores de vorticidad del tipo de Counihan (Cook, 1982) para generar un déficit inicial de cantidad de movimiento y distribuirlo en altura para obtener características semejantes a las atmosféricas (Figura 1).



Fig. 1. Equipamiento de simulación de viento natural.

Los reglamentos de viento clasifican al flujo atmosférico en función de la rugosidad superficial donde será construida la estructura, que para el caso de referencia se corresponde a la categoría de terreno suburbano. El reglamento CIRSOC 102 adopta como valor característico de los distintos tipos de terreno, el exponente de la ley potencial de velocidades medias,  $n$ .

La Figura 2 muestra las principales características del escurrimiento incidente utilizado en estos ensayos; perfil de velocidades medias y perfil de intensidad turbulencia. El escurrimiento se puede asociar al de una zona suburbana ( $n = 0,21$ ). Una discusión más detallada de estas simulaciones puede ser encontrada en la referencia De Bortoli *et. al.* (2002).

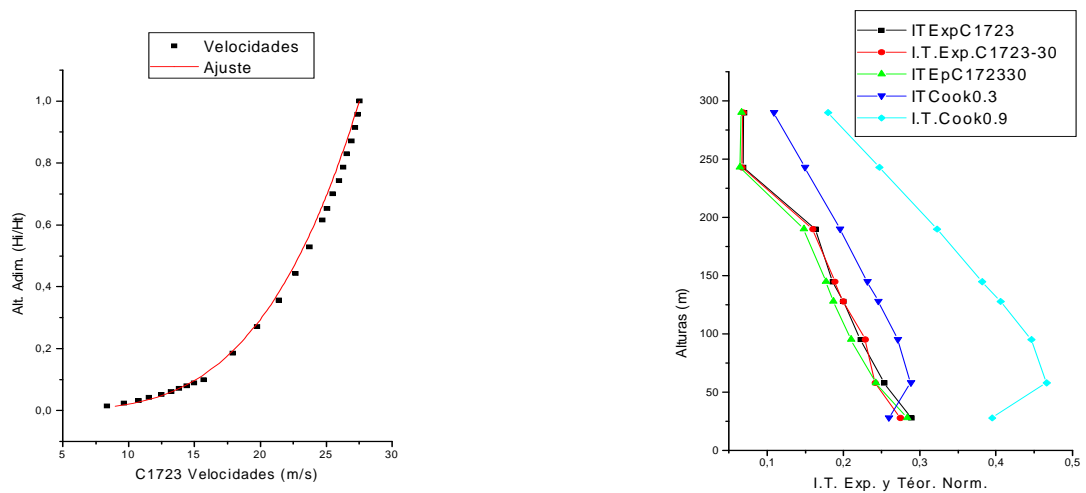


Fig. 2. Perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia.

### 3. DESCRIPCION DEL MODELO UTILIZADO

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. El modelo de la torre fue construido con una escala geométrica de 1:200, reproduciéndose los detalles de relevancia aerodinámica (Figura 3). Para cada una de las direcciones de viento analizadas se reprodujeron la rugosidad y los edificios cercanos. En Figura 4 se indican la orientación de los ejes de referencia, la dirección de viento incidente correspondiente a 0° y el sentido de giro para las sucesivas rotaciones de 15° que determinan las 24 direcciones de viento analizadas.



Fig. 3. Modelo del edificio mostrando la reproducción del entorno inmediato en la cámara de ensayos del túnel de viento.

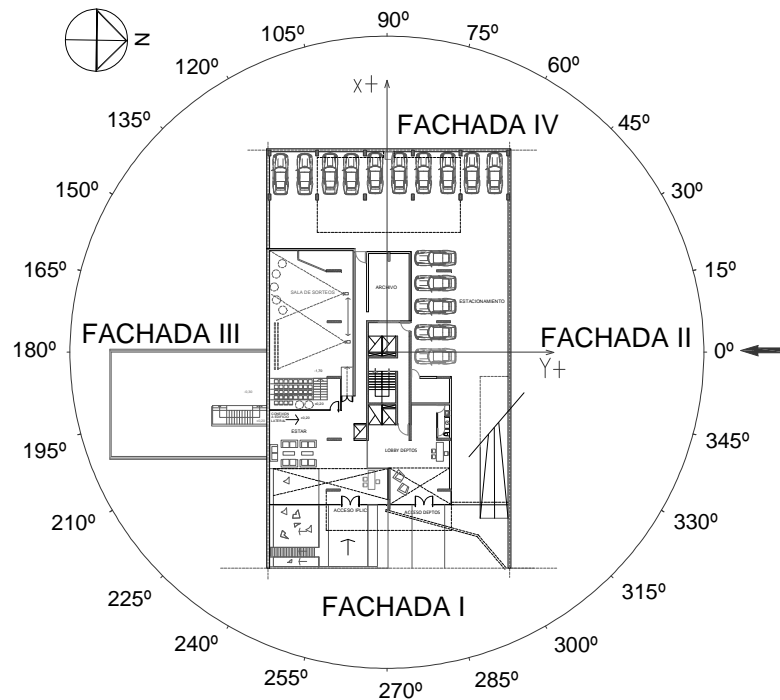


Fig. 4. Ejes de referencia adoptados e indicación de ángulo (dirección viento incidente).

#### 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. 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 la altura máxima del modelo, utilizando un tubo de Pitot-Prandtl. Esto permite obtener la presión dinámica de referencia,  $q_z$ , en forma simultánea a las mediciones de las presiones fluctuantes sobre la torre. La presión estática no perturbada se obtuvo del mismo tubo de Pitot-Prandtl. 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 un software desarrollado en este laboratorio. Mediante el procesamiento de datos se obtuvieron intensidades de turbulencia y espectros de potencia.

Los registros de presiones fluctuantes de las tomas de presión ubicadas sobre la superficie de la torre, fueron obtenidos mediante un sistema de medición de presiones simultáneas scanivalve de 128 canales.

#### 5. DISTRIBUCIÓN DE TOMAS DE PRESIÓN ESTÁTICA

La distribución de tomas de presión sobre el modelo presenta diferentes configuraciones de acuerdo a aspectos geométricos y de diseño estructural. Así, es posible considerar 4 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 aerodinámicos localizados de viento no necesariamente asociados a cargas locales.

El primer conjunto de tomas se denomina grupo A y 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, es decir, sobre las fachadas I, II, III y IV respectivamente. En las figuras 5 y 6 se muestran las fachadas I, II, III y IV con la correspondiente distribución de las tomas de presión. De acuerdo a la configuración en planta de la torre, teniendo en cuenta las 4 fachadas (I, II, III y IV) y las tomas se distribuyen perimetralmente considerando 8 niveles definidos por la altura respecto al suelo. En correspondencia con cada nivel se definieron la ubicación de las tomas de presión estática superficial y las áreas tributarias (ancho  $\times$  alto) para cada toma de presión. Sobre la Fachada I (Figura 5) se indican las tomas 4 y 5 que no serán usadas para el análisis de cargas globales y, estrictamente, no pertenecen al grupo A. Las mismas fueron implementadas para evaluar efectos localizados en función de las características de la estructura principal y de los edificios que conforman el entorno inmediato, que podrían generar efectos de ráfaga a nivel de superficie.

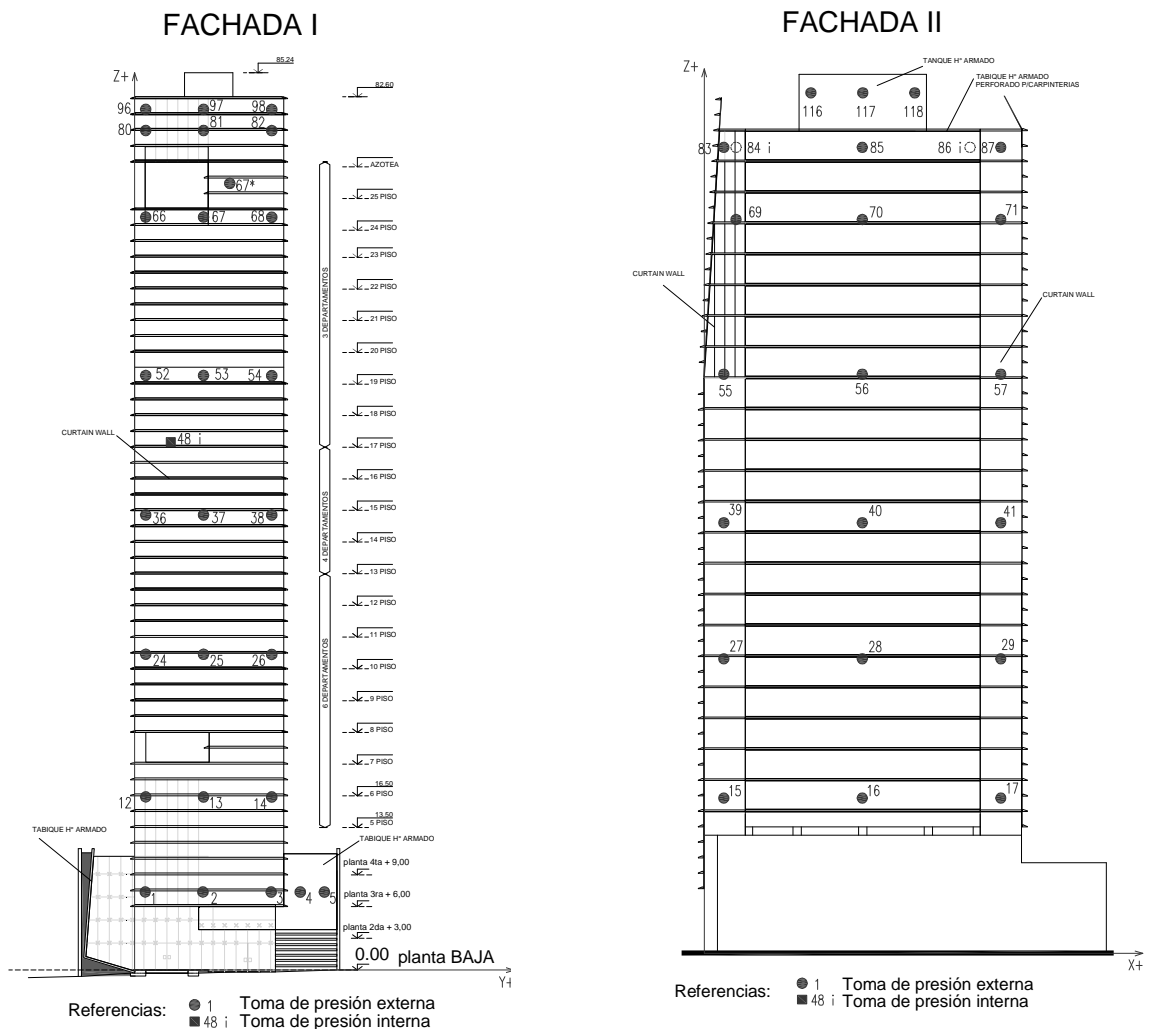


Fig. 5. Ubicación de tomas de presión en fachadas I y II (Grupo A)..

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”

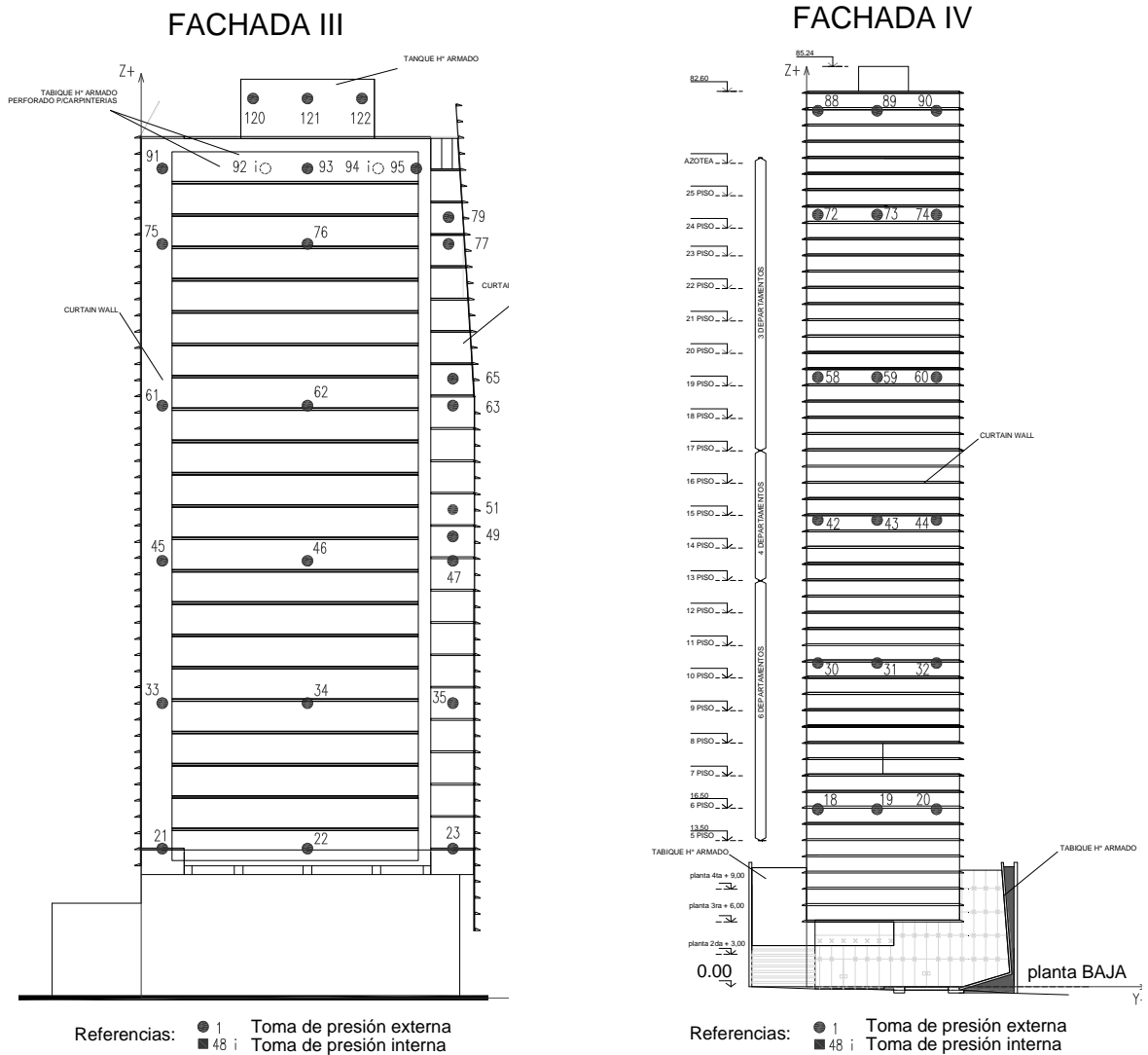


Fig. 6. Ubicación de tomas de presión en fachadas III y IV (Grupo A).

El grupo B corresponde a la zona de balcones abiertos en la que, por cada balcón instrumentado, se colocaron 3 tomas de presión. Asimismo, no se instrumentaron todos los balcones sino que se eligieron tres considerados los más representativos. Este grupo corresponde a la zona de balcones donde, como se indica en el detalle 1 de la Figura 7, se colocaron 3 tomas de presión por cada balcón instrumentado. Se eligieron tres balcones; uno ubicado en la parte inferior, otro en la zona intermedia y otro en la parte superior.

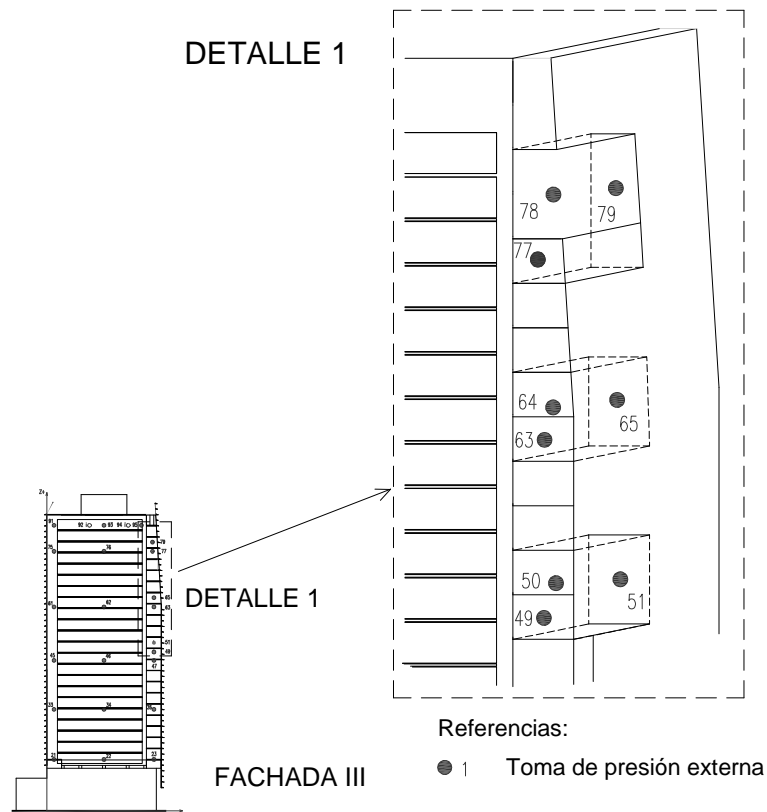


Fig. 7. Detalle ubicación de tomas de presión del grupo B (balcones).

Existe un conjunto de tomas asociado al área de estacionamiento vehicular (piso IV) que constituye el grupo C. El estrangulamiento que se genera producto de la estructura principal y la superficie abierta de este nivel, donde además se ubican las columnas de soporte de las cargas superiores, así como el uso al que se destina, podría requerir el análisis de efectos localizados. Es decir, ráfagas de viento combinados con escurrimientos medios intensos (efecto Venturi). La Figura 8 muestra la ubicación de las tomas de presión estática en el área de estacionamiento.

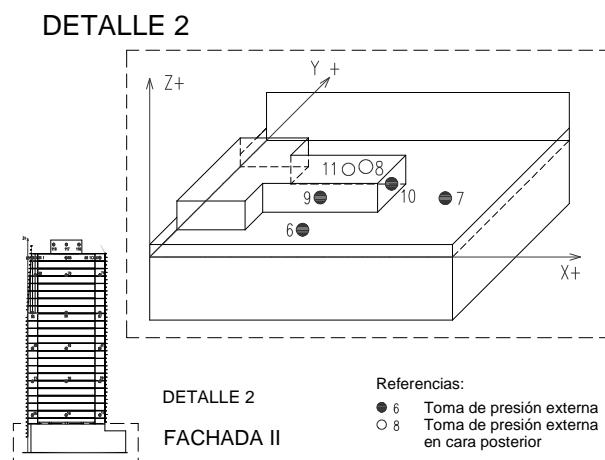


Fig. 8. Detalle ubicación de tomas de presión del grupo C.

El grupo D está conformado por tomas ubicada en la parte superior del edificio (zona de terraza). En este espacio, por un lado, se debe considerar criterio de uso siendo que constituye



fundamentalmente un área de esparcimiento. Es importante, entonces, prever el análisis de efectos de ráfagas que pueden alterar actividades previstas en el diseño original del proyecto, no obstante lo cual se requeriría un estudio complementario de confort con relación al viento. Simultáneamente, esta zona presenta características estructurales particulares, como los “parasoles” laterales constituidos por prolongaciones superiores de los “curtain-wall”, que requieren un análisis específico de las cargas aerodinámicas por su alta exposición al viento. En Figura 9 se muestra la ubicación de las tomas de presión estática del grupo D que corresponde a la zona de terraza.

### DETALLE 3

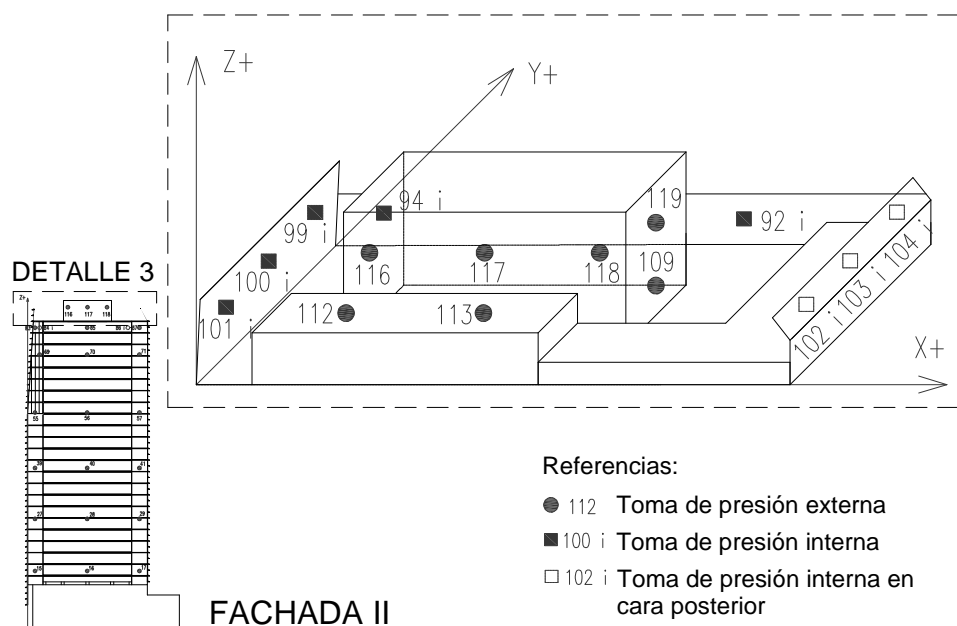


Fig. 9. Detalle en perspectiva de la ubicación de tomas de presión del grupo D (fachada II).

## 6. COEFICIENTES DE PRESIÓN LOCAL, DE FUERZA Y DE MOMENTO GLOBAL

### 6.1. Coeficientes de presión local

Los coeficientes de presión local se determinaron en 127 puntos distribuidos sobre las superficies exteriores de la torre, en la zona de balcones, en el área de estacionamiento y en la zona de terraza. Conceptualmente, los coeficientes son cargas adimensionalizadas mediante parámetros de referencia. Conforme a la literatura especializada, se dan las siguientes definiciones que son compatibles con las que indica el reglamento CIRSOC 102. El coeficiente de presión local exterior está definido por:

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

Donde,

$\Delta p_e$ : es la 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).

$q_z$ : es la presión dinámica medida a la altura de referencia.

Valores positivos de  $c_e$  corresponden a acciones dirigidas hacia la superficie.

En Tablas 1, 2, 3 y 4 se muestran los coeficientes de presión local mínimo, máximo, medio y RMS obtenidos en cada toma y para cada dirección de viento analizada.

Tabla N° 1. Coeficiente de presión local mínimo

T	Dirección de viento incidente ( $\alpha$ )									
	0	15	30	45	----	285	300	315	330	345
1	-2.01	-2.07	-2.43	-2.72	----	-0.72	-0.48	-1.28	-1.44	-1.90
2	-2.38	-2.67	-2.50	-3.10	----	-0.53	-0.57	-0.99	-2.01	-2.11
3	-1.46	-2.03	-1.93	-1.92	----	-0.34	-0.33	-0.59	-0.91	-1.56
4	-2.04	-2.28	-2.36	-2.60	----	-0.99	-0.75	-0.84	-1.13	-2.08
5	-2.92	-4.62	-2.86	-4.46	----	-1.04	-1.96	-1.61	-1.33	-1.87
6	-0.22	-0.35	-0.16	-0.38	----	-0.72	-0.36	-0.36	-0.28	-0.29
7	-1.74	-1.62	-1.77	-0.78	----	-1.13	-1.21	-1.38	-1.60	-1.59
8	-1.35	-1.47	-1.34	-1.16	----	-0.99	-1.15	-1.15	-1.33	-1.26
9	-0.55	-0.61	-0.56	-0.53	----	-0.68	-0.73	-0.80	-0.49	-0.45
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
121	-1.13	-1.39	-1.21	-1.39	----	-1.90	-1.29	-1.28	-1.22	-1.44
122	-1.46	-1.78	-1.46	-1.56	----	-1.40	-1.62	-1.12	-1.25	-1.35
123	-2.39	-1.65	-1.26	-1.06	----	-0.05	-0.13	-1.39	-3.28	-3.44
124	0.07	-0.02	-0.01	-0.01	----	-0.15	-0.11	-0.06	-0.09	-0.05
125	0.12	0.06	0.05	0.06	----	-0.10	-0.08	-0.01	-0.04	0.00
126	0.08	-0.01	0.00	0.01	----	-0.13	-0.12	-0.06	-0.08	-0.03
127	0.08	-0.02	-0.01	-0.02	----	-0.15	-0.14	-0.07	-0.11	-0.06
128	1.00	1.00	1.00	1.00	----	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla N° 2. Coeficiente de presión local máximo

T	Dirección de viento incidente ( $\alpha$ )									
	0	15	30	45	----	285	300	315	330	345
1	0,35	-0,12	-0,02	-0,05	----	1,15	1,19	0,80	1,03	0,64
2	0,18	-0,31	-0,32	-0,22	----	1,09	1,19	0,69	0,57	0,22
3	-0,21	-0,45	-0,46	-0,38	----	0,75	1,05	0,51	0,14	-0,01
4	0,26	-0,22	-0,14	0,08	----	1,01	1,38	0,79	0,72	0,06
5	0,32	0,30	-0,01	-0,10	----	0,96	1,11	0,69	0,53	0,19
6	2,84	2,77	2,09	2,23	----	0,94	1,03	1,61	1,98	2,93
7	0,15	0,10	0,52	1,90	----	-0,08	-0,23	0,03	-0,11	-0,05
8	-0,25	-0,25	-0,27	0,04	----	0,31	0,08	-0,02	-0,06	-0,17
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
120	-0,22	-0,19	-0,15	-0,25	----	-0,23	-0,04	-0,16	-0,37	-0,38
121	-0,32	-0,31	-0,21	-0,28	----	-0,29	-0,32	-0,34	-0,37	-0,39
122	-0,28	-0,28	-0,26	-0,26	----	-0,45	-0,32	-0,40	-0,34	-0,34
123	-0,23	-0,26	-0,24	-0,26	----	1,87	1,68	1,20	0,77	0,04
124	0,47	0,40	0,35	0,36	----	0,26	0,30	0,35	0,30	0,34

"Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social"

125	0,52	0,44	0,37	0,41	-----	0,25	0,30	0,35	0,32	0,34
126	0,50	0,42	0,36	0,40	-----	0,26	0,30	0,37	0,33	0,34
127	0,49	0,42	0,35	0,38	-----	0,22	0,26	0,35	0,32	0,31
128	1,00	1,00	1,00	1,00	-----	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla N° 3. Coeficiente de presión local medio

T	Dirección de viento incidente ( $\alpha$ )									
	0	15	30	45	-----	285	300	315	330	345
1	-0.61	-0.83	-0.90	-0.80	-----	0.10	0.25	-0.10	-0.32	-0.56
2	-0.78	-1.08	-1.09	-1.03	-----	0.07	0.22	-0.14	-0.42	-0.69
3	-0.64	-0.91	-0.97	-0.98	-----	0.10	0.27	-0.10	-0.37	-0.55
4	-0.58	-0.86	-0.97	-0.94	-----	0.07	0.22	-0.11	-0.37	-0.53
5	-0.61	-0.94	-0.98	-0.91	-----	0.05	0.18	-0.10	-0.33	-0.54
6	0.55	0.60	0.56	0.50	-----	0.04	0.16	0.35	0.50	0.50
7	-0.61	-0.57	-0.43	0.16	-----	-0.49	-0.63	-0.64	-0.66	-0.72
8	-0.67	-0.76	-0.74	-0.50	-----	-0.30	-0.54	-0.54	-0.64	-0.71
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
120	-0.67	-0.66	-0.61	-0.70	-----	-1.01	-0.84	-0.72	-0.74	-0.76
121	-0.69	-0.70	-0.66	-0.73	-----	-0.89	-0.75	-0.74	-0.77	-0.80
122	-0.68	-0.70	-0.69	-0.75	-----	-0.86	-0.73	-0.72	-0.75	-0.77
123	-0.79	-0.70	-0.62	-0.60	-----	0.94	0.76	0.36	-0.82	-1.25
124	0.27	0.21	0.16	0.16	-----	0.06	0.09	0.14	0.09	0.13
125	0.32	0.26	0.21	0.22	-----	0.06	0.10	0.18	0.12	0.16
126	0.29	0.23	0.18	0.19	-----	0.05	0.09	0.16	0.10	0.14
127	0.29	0.23	0.17	0.18	-----	0.03	0.07	0.13	0.08	0.11
128	1.00	1.00	1.00	1.00	-----	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla N° 4. Coeficiente RMS de presión local

T	Dirección de viento incidente ( $\alpha$ )									
	0	15	30	45	-----	285	300	315	330	345
1	0.25	0.24	0.23	0.25	-----	0.18	0.22	0.20	0.24	0.25
2	0.26	0.28	0.27	0.32	-----	0.16	0.21	0.21	0.27	0.28
3	0.15	0.17	0.16	0.20	-----	0.13	0.21	0.14	0.13	0.16
4	0.19	0.23	0.23	0.29	-----	0.19	0.24	0.18	0.17	0.19
5	0.22	0.34	0.23	0.28	-----	0.18	0.21	0.17	0.16	0.20
6	0.30	0.31	0.28	0.33	-----	0.16	0.15	0.22	0.22	0.26
7	0.21	0.21	0.21	0.30	-----	0.12	0.13	0.16	0.16	0.19
8	0.13	0.13	0.13	0.15	-----	0.14	0.15	0.14	0.12	0.13
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
120	0.12	0.12	0.12	0.14	-----	0.24	0.18	0.13	0.11	0.12
121	0.11	0.12	0.12	0.14	-----	0.16	0.12	0.11	0.11	0.11
122	0.12	0.13	0.14	0.15	-----	0.13	0.13	0.11	0.12	0.12
123	0.19	0.13	0.11	0.10	-----	0.30	0.28	0.24	0.67	0.41
124	0.06	0.06	0.05	0.05	-----	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05
125	0.06	0.05	0.05	0.05	-----	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
126	0.06	0.06	0.05	0.06	-----	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05
127	0.06	0.06	0.05	0.06	-----	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06

128	1.00	1.00	1.00	1.00	-----	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
-----	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	------

Los coeficientes de presión local se determinaron a partir de las presiones fluctuantes medidas en cada toma, de forma tal que fue posible obtener el coeficiente local medio, mínimo, máximo y RMS, respectivamente.

Respecto a los coeficientes de presión interna local, estos se definen como:

$$c_i = \frac{\Delta p_i}{q_z} \quad (2)$$

Donde,

$\Delta p_i$ : es la diferencia de presión estática interior entre el punto de medición y la presión estática de referencia (toma estática tubo Pitot-Prandtl).

$q_z$ : es la presión dinámica medida a la altura de referencia.

El coeficiente de presión neta o total,  $c$ , es la diferencia entre los coeficientes de presión exterior e interior, resulta  $c = c_e - c_i$ .

## 6.2. 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  $Y$  (Figura 6).

Los coeficientes de fuerza para cada eje son:

$$C_{f_x} = \frac{F_x}{q_z A_M}; \quad C_{f_y} = \frac{F_y}{q_z A_M} \quad (3)$$

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.

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

$$A_R = B_I H_I$$

Donde,

$B_j$ : 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:

$$C_{f_x} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \sen \beta_j}{A_R}; \quad C_{f_y} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \cos \beta_j}{A_R} \quad (4)$$

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.

### 6.3. 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:

$$C_{M_x} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \cos \beta_j h_j}{A_R H_I}; \quad C_{M_y} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{p_j} A_j \operatorname{sen} \beta_j h_j}{A_R H_I} \quad (5)$$

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.

En Tabla 5 se muestran los coeficientes de fuerza y coeficientes de momento de volcamiento para las direcciones de viento analizadas ( $\alpha$ ).

Tabla 5. Coeficientes de fuerza y momento de volcamiento para las direcciones de viento analizadas.

$\alpha$	CF <sub>X</sub>	CF <sub>Y</sub>	CM <sub>X</sub>	CM <sub>Y</sub>
0	0.05	-2.70	0.03	-1.64
15	0.28	-2.88	0.19	-1.72
30	-0.03	-2.74	-0.01	-1.62
45	-0.67	-2.12	-0.40	-1.30
60	-0.86	-1.47	-0.53	-0.96
75	-0.88	-0.61	-0.55	-0.48
90	-0.86	0.57	-0.53	0.27
105	-0.92	0.76	-0.56	0.44
120	-0.90	1.40	-0.54	0.85
135	-0.61	1.97	-0.36	1.24
150	-0.20	2.57	-0.08	1.57
165	0.20	2.90	0.17	1.77
180	0.03	2.90	0.04	1.76
195	-0.18	2.89	-0.12	1.75
210	0.29	2.48	0.16	1.55
225	0.81	2.10	0.49	1.30
240	0.93	1.35	0.57	0.86
255	0.97	0.90	0.61	0.55
270	0.84	-0.09	0.54	-0.03

285	0.91	-1.48	0.56	-0.87
300	0.94	-1.96	0.54	-1.13
315	0.64	-2.33	0.39	-1.37
330	0.06	-2.75	0.04	-1.62
345	-0.14	-2.85	-0.10	-1.69

## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con relación a las cargas de viento, es posible establecer que las máximas cargas se producen en la torre cuando ésta queda ubicada con las caras de mayor superficie expuestas frontalmente, es decir, las fachadas II y III para direcciones de viento incidente 0, 15, 165, 180, 195 y 345 grados. En este primer análisis, los coeficientes locales de presión son presentados mediante sus valores medio, mínimo, máximo y RMS. Para el cálculo de cargas de viento mediante el reglamento CIRSOC 102, podrá ser utilizado el valor medio afectado por un coeficiente de ráfaga. No obstante, en zonas puntuales podrá complementarse el análisis mediante la utilización de los valores fluctuantes de presión que fueron registrados en este estudio. El valor RMS multiplicado por tres y sumado al valor medio podría resultar una estimación válida, pero no se puede asegurar que la distribución de las muestras sea gaussiana. Por otro lado, el uso de los valores máximos y mínimos no contemplan ningún análisis estadístico, ya que estos constituyen picos absolutos que se generan en forma instantánea, por lo que no pueden ser asociados a un área determinada para generar una carga global. Por este motivo resulta conveniente analizar las cargas por el método cuasi estático, que considera un análisis probabilístico basado en el promediado de los registros en tiempos de ráfaga de uno, cuatro y dieciséis segundos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Reglamento CIRSOC 102 (2001): "Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones", INTI, Bs. As.
- 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.
- Cook, N. J. (1977/1978). "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,
- De Bortoli, M. E.; Natalini, B.; Paluch, M. J. and Natalini, M. B. (2002). "Part-Depth Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Boundary Layer", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90, pp. 281-291.
- Jensen, M. (1954). "The model law for phenomena in natural wind", *International edition*, 2 (4).
- Wittwer, A. R. and Möller, S. V. (2000). "Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 84 (3), pp. 307-320.