

IMPORTANCIA DE LA COHERENCIA ESPACIAL EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CAMPO DE VELOCIDADES DEL VIENTO PARA ANÁLISIS DINÁMICOS DE ESTRUCTURAS

Ing. Civil Hugo Guillermo Castro. Resistencia, Chaco. Grupo de investigación de Mecánica de los Fluidos (GIMEF), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia.

Magíster en Ciencias de la Ingeniería (UNNE). Alumno doctorando en la Carrera de Doctorado en Ingeniería en la Universidad Nacional del Litoral. Autor de publicaciones en Congresos Nacionales e Internacionales en el área de Ingeniería de Viento.

Ing. Civil Mario Eduardo De Bortoli. Resistencia, Chaco. Grupo de investigación de Mecánica de los Fluidos (GIMEF), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia.

Especialista en Ingeniería Estructural y Magíster en Ciencias de la Ingeniería (UNNE). Doctor en Ingeniería (UFRGS, Porto Alegre, Brasil). Autor de publicaciones en Congresos Nacionales e Internacionales en el área de Ingeniería de Viento y Trabajos de consultoría en dicha área.

Ing. Mecánico Jorge Omar Marighetti. Resistencia, Chaco. Grupo de investigación de Mecánica de los Fluidos (GIMEF), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia.

Magíster en Ciencias de la Ingeniería (UNNE). Autor de publicaciones en Congresos Nacionales e Internacionales en el área de Ingeniería de Viento y Trabajos de consultoría en dicha área.

Resumen

En estructuras de pequeña superficie sometidas a las cargas de viento es utilizada la hipótesis de cargas completamente correlacionadas, experimentando cada punto de la estructura las mismas fluctuaciones de velocidades del viento incidente. Para grandes estructuras la suposición de correlación completa no es realista y es necesario relacionar las fluctuaciones de velocidad espacial del campo de velocidades. La función de coherencia espacial es utilizada para correlacionar las velocidades, en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

En este trabajo se simula numéricamente el campo de velocidades mediante el método de descomposición espectral, representando vientos correspondientes a la capa límite atmosférica, neutralmente estable, relacionados con tormentas fuertes. Las series de velocidades simuladas son utilizadas para el análisis dinámico longitudinal de una estructura alta en el dominio temporal. Los resultados fueron comparados con los obtenidos en ensayo en túnel de viento simulando la capa límite atmosférica, modelo físico que reproduce las propiedades estadísticas espaciales y temporales de las componentes fluctuantes. El modelo reducido utilizado se construyó manteniendo las leyes de semejanza dinámica entre modelo y prototipo. Los resultados obtenidos experimental y numéricamente fueron comparados con resultados aportados por bibliografía de referencia, en forma adimensional, observándose una buena correspondencia.

Abstract

For small surface structures exposed to wind action, the loads are fully correlated and instantaneous loading fluctuates as the incident wind. For bigger structures the hypothesis that the correlated loads are fully correlated is unrealistic, the loads must be correlated to the velocity space. The coherency function is used for correlations in the spatiality and frequencies domain of the wind velocities.

This work the space velocity is numerically simulated using spectral decomposition method, for the representation of neutrally stable boundary layer wind, associated with strong storms.

For longitudinal dynamic structural analysis, time domain, are used simulated velocity series and they were confronted with the boundary layer wind tunnel test measurement, and the fluctuating component and spatially and temporal statistical property are adequately duplicated. The reduced scale structural model was built with consideration of the geometric and dynamic similarity laws.

Good correspondences are obtained between the numerical and experimental data with reference bibliography.

1. Introducción:

La estimación de la respuesta dinámica de las estructuras a la acción del viento es uno de los principales tópicos en el área de investigación desarrollada en la ingeniería de vientos en los últimos 40 años.

Desde 1961, cuando Alan G. Davenport formuló un modelo matemático para el análisis del comportamiento dinámico debido a las ráfagas aleatorias del viento atmosférico, se han aplicado y desarrollado diversos métodos, siguiendo principalmente tres aproximaciones: el análisis estático equivalente, el análisis en el dominio de la frecuencia y el análisis en el dominio del tiempo.

Sin embargo, los métodos analíticos utilizados para la determinación de la respuesta fluctuante inducida por la acción del viento generalmente conducen a resultados poco confiables cuando son aplicados a estructuras altas con geometrías no convencionales. Así, los ensayos en túnel de viento aún son una herramienta más precisa y robusta para el estudio del comportamiento dinámico de estructuras a través de ensayos con modelos reducidos verificando las leyes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, para extrapolar los resultados obtenidos al prototipo.

En este trabajo se presenta un procedimiento numérico y la metodología experimental para la determinación de la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas bajo la acción de vientos pertenecientes a la capa límite atmosférica, neutralmente estable. Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del equipamiento y la validez de los resultados numéricos, se implementó los procedimientos numéricos y experimentales sobre un modelo del edificio del CAARC Standard Tall Building, ampliamente estudiado por otros investigadores.

El procedimiento numérico consiste en simular un campo de series temporales de velocidad, las cuales definen el campo de velocidades de viento incidente y que son posteriormente transformadas en fuerzas nodales fluctuantes mediante un modelo de carga, considerándose en este trabajo la hipótesis de carga cuasi-estática. El

cálculo de la respuesta dinámica longitudinal es llevado a cabo en el dominio del tiempo mediante un programa comercial de elementos finitos. Las velocidades fluctuantes de viento son correlacionadas en el tiempo y espacialmente. Para verificar la influencia se realizaron dos simulaciones numéricas: la primera sin considerar la correlación espacial y la segunda admitiéndola con la función de coherencia.

Para determinar la respuesta dinámica a través de modelos reducidos en ensayos en túnel de viento, el campo de velocidades de viento atmosférico es reproducido en el túnel sin considerar efectos de vecindad y suponiendo que el viento incidente al sitio de emplazamiento de la estructura se desarrolla sobre obstáculos sobre la superficie terrestre que en ningún caso superan los 10 metros de altura. En estas condiciones la simulación física del túnel de viento incorpora la correlación temporal y espacial en el campo de velocidades.

Para la evaluación experimental se construyó un soporte flexible para ensayos de modelos aeroelásticos, mediante el cual es posible determinar la componente fluctuante de la respuesta longitudinal y transversal a la acción del viento en el primer modo fundamental.

Por último se comparan los resultados obtenidos para la misma estructura por los procedimientos numéricos, ensayo en túnel de viento y los publicados en las revistas especializadas, corroborando que la respuesta media a la acción del viento no es modificada al no incluir las correlaciones espaciales del campo de velocidades fluctuantes. Sin embargo, para que la respuesta fluctuante provocada por las ráfagas del viento incidente represente adecuadamente las máximas cargas es necesario incluir las correlaciones espaciales y temporales del campo de velocidades de viento atmosférico.

2. Cargas dinámicas provocadas por el viento atmosférico

Simplificadamente se describe la acción del viento sobre una estructura como una carga estática equivalente, dividiéndose esta carga en dos términos, una estática y otra fluctuante (dinámica). La velocidad media del viento es el término de carga que genera en la estructura efectos puramente estáticos, y la respuesta a esta acción es designada como respuesta media. Se admite que esta velocidad media se mantiene aproximadamente constante por un intervalo de tiempo igual o superior a 10 minutos. La componente fluctuante que corresponde a las ráfagas está asociada a este término estático correspondiente a la velocidad media del viento, siendo la respuesta total de la estructura la superposición de la respuesta media y dinámica.

Debido a que el movimiento longitudinal resulta principalmente de las fluctuaciones contenidas en el flujo incidente, sus efectos han sido adecuadamente estimados utilizando las teorías cuasi-estática y de elementos lineales (strip theory), las cuales implican que el campo de presiones fluctuantes es relacionado linealmente con el campo de fluctuaciones de velocidades en cualquier punto de la estructura. Luego, las cargas aerodinámicas, $F(t)$, considerando sólo la componente longitudinal, son expresadas en términos de las fluctuaciones de velocidad por :

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho A C_D [\bar{U} + u(t)]^2 \cong \frac{1}{2} \rho A C_D \bar{U}^2 + \rho A C_D \bar{U} u(t) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire, A es el área cargada por el viento, C_D es el coeficiente de arrastre.

La expresión anterior supone implícitamente que las fluctuaciones de velocidad incidentes a la estructura están completamente correlacionadas sobre toda su superficie. Esta suposición puede ser válida para estructuras muy pequeñas, no así para estructuras de grandes dimensiones espaciales y conduce a una sobrestimación de las cargas. En esos casos, el efecto de la correlación imperfecta es introducida convenientemente a través de lo que se denomina como función de admitancia aerodinámica, $\chi^2(n)$. Este proceso de carga es fácilmente relacionado en el dominio de la frecuencia, donde la ecuación (1) es transformada según:

$$S_F(n) = (\rho C_D)^2 \chi^2(n) S_u(n) \quad (2)$$

donde $S_F(n)$ y $S_u(n)$ son la densidad espectral de potencia de las cargas de viento y de las fluctuaciones del viento, respectivamente. Idealmente, $\chi^2(n)$ representa la falta de correlación en el flujo incidente y además considera las desviaciones con respecto a la teoría cuasi-estática que pueda acontecer debido a interacciones complejas entre la estructura y el viento, fundamentalmente en relación a las formas geométricas.

3. Turbulencia atmosférica. Consideraciones generales.

La velocidad media del viento es la responsable de la acción estática, y las ráfagas, dependiendo de la energía cinética y de como esa energía se distribuye en las distintas frecuencias, de la acción dinámica.

En los casos de interés práctico, y específicamente para determinar la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas a la acción del viento, las componentes de las fluctuaciones de velocidad ortogonales a la dirección media del escurrimiento pueden ser despreciadas sin provocar distorsiones significativas en la respuesta analizada. En esta situación, la velocidad de viento instantánea es simplificada a una componente unidireccional, escalar, expresada por la relación:

$$U(M;t) = \bar{U}(z) + u(M;t) \quad (3)$$

donde z es la altura del punto M y $u(M;t)$ es la componente longitudinal de las fluctuaciones de velocidad, función aleatoria del tiempo y el espacio. Para completar la descripción de la estructura del viento se debe definir la función de densidad espectral cruzada de las fluctuaciones longitudinales, $S_u(M;M';n)$, la cual es posible simplificar limitando su evaluación al plano ortogonal a la dirección media del viento y despreciando la parte imaginaria del espectro cruzado. Bajo esta hipótesis la expresión de la función de densidad espectral cruzada puede escribirse

$$S_u(y;z;y';z';n) = \sqrt{S_u(z;n)S_u(z';n)} \text{Coh}(y;z;y';z';n) \quad (4)$$

donde $S_u(z;n)$ y $S_u(z';n)$ son las densidades espectrales de la componente longitudinal de las fluctuaciones de velocidad en los puntos de altura z y z' ,

respectivamente; $Coh(y; z; y'; z'; n)$ es la función de coherencia, definida mas adelante.

4. Modelado numérico del campo de velocidades del viento atmosférico

El análisis de la respuesta de estructuras a las cargas de viento requiere de un cuidadoso modelado del campo de viento donde, en el análisis dinámico, la simulación de la turbulencia adquiere una importancia fundamental. En la bibliografía existen diferentes métodos para simular registros de la componente fluctuante de la velocidad del viento en un determinado número de puntos obtenidos de la discretización del espacio.

A continuación se presenta un método para la simulación numérica del campo de velocidades de viento atmosférico considerando sólo la componente fluctuante longitudinal, coincidente con la dirección media del escurrimiento atmosférico. El campo de velocidades es discretizado espacialmente en una dimensión, suponiendo una variación espacial vertical de velocidades medias a las que son superpuestas las fluctuaciones de velocidad, obtenidas por un procedimiento que contempla la correlación espacial y temporal mediante la descomposición de la matriz de densidad espectral. El método se basa en la suposición de que las componentes fluctuantes longitudinales del campo de velocidad pueden ser idealizadas como un proceso gaussiano con valor medio igual a cero.

$$g_j(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^N |H_{jk}(\omega_n)| \sqrt{2\Delta\omega} \cos(\omega_n t + \phi_{kn}) \quad (5)$$

donde $\Delta\omega$ es el intervalo de frecuencia, $\omega_n = \Delta\omega(n-1)$, N es el numero de intervalos de frecuencia y ϕ_{kn} son los ángulos de fase aleatorios independientes, uniformemente distribuidos entre 0 y 2π .

Para implementar el método primero es necesario obtener numéricamente los espectros de la componente longitudinal de la turbulencia en los m puntos considerados. Esto se realiza discretizando el espectro de potencia en intervalos

$\Delta\omega$, cuyo valor es una fracción de la frecuencia de corte ω_c $\Delta\omega = \omega_c / N$.

Subdividiendo el rango de frecuencias en N segmentos y la representación espacial del campo de flujo en m puntos, es obtenida la matriz de densidad espectral cruzada de $m \times m$ para cada valor de la frecuencia ω_n ($n = 1 : N$).

Luego, se aplica la descomposición de Cholesky, de tal manera que $S(\omega_n)$ pueda escribirse como el producto de la matriz triangular inferior $H(\omega_n)$ por su transpuesta.

Utilizando la ecuación (5), puede simularse el proceso temporal $g_j(t)$ que para el caso estudiado corresponde a la componente longitudinal de la turbulencia atmosférica, para cada punto j del espacio.

El intervalo de tiempo requerido es dado por $\Delta t \leq 2\pi / (2\omega_c)$, de tal manera de evitar el fenómeno conocido como aliasing. La frecuencia de corte adoptada en este trabajo fue de $\omega_c = 15,71$ rad/seg, por lo que se trabajó con un $\Delta t = 0,20$ seg.

Las demás ecuaciones utilizadas se resumen a continuación:

$$S_u(z; z'; n) = \sqrt{S_u(z; n) S_u(z'; n)} \text{Coh}(z; z'; n) \quad (6)$$

$$L_u(z) = 300 \left(\frac{z}{200} \right)^\nu \quad \text{siendo } \nu = 0,67 + 0,65 \ln(z_0) \quad (7)$$

$$\text{Coh}(z; z'; n) = \exp \left\{ - \frac{C_z |z - z'|}{\bar{U}(z) + \bar{U}(z')} \right\} \quad (8)$$

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (10)$$

La velocidad media fue fijada en función del supuesto emplazamiento de la estructura, para lo cual se consideró que la misma estaría emplazada en la ciudad de Resistencia, Chaco. Así, la velocidad media fue de $\bar{U} = 44\text{m/seg}$, de acuerdo con el reglamento CIRSOC 102, (INTI, 2001). Esta velocidad media corresponde a una velocidad de ráfaga de 3 segundos a una altura de referencia de 10 metros, sobre un terreno de categoría de exposición C (campo abierto plano y terrenos agrícolas) y asociada a una probabilidad anual de 0,2. Como los registros simulados representan velocidades de 10 minutos de duración, fue necesario adecuar esta velocidad media, con la ecuación propuesta por Blessmann, (ABNT, 1998).

$$S_2 = \frac{\bar{U}_t(z)}{\bar{U}} = b F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (11)$$

donde $\bar{U}_t$ es la velocidad media sobre t segundos, a una altura z sobre el nivel del terreno, para la categoría i según la norma brasilera NBR-6123 (NB-599), b, Fr y p son parámetros para distintos intervalos de tiempo y las diversas categorías del entorno. Para la categoría IV (entorno suburbano) y un intervalo de tiempo de 10 minutos, se obtienen $b = 0,71$, $Fr = 0,69$ y $p = 0,23$, con lo cual:

$$\bar{U}_{10} = 0,489(44\text{m/seg}) = 21,56\text{m/seg} \quad (12)$$

Para representar la distribución de velocidades medias en altura se utilizó la ley potencial:

$$\frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_{10}} = \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (13)$$

siendo p es un coeficiente que depende de las características del terreno, tomándose en este caso $p = 0,26$, en correspondencia con el perfil de velocidades reproducido en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la UNNE (Natalini et al., 1998), obteniéndose una velocidad de $45,71\text{ m/seg}$ en el tope del edificio ($z = 180\text{ m}$).

La intensidad de turbulencia normalizada, y la escala integral de turbulencia se asimilaron a los valores obtenidos en la simulación de capa límite del túnel de viento. El campo de velocidades del viento y la estructura fueron discretizados verticalmente en 10 partes iguales, desde $z = 18$ m hasta $z = 180$ m. En la Figura 1 se observan tres registros simulados de velocidad, para $z = 18$, 90 y 100 m y en la tabla 1 se comparan las intensidades de turbulencia locales correspondientes a una simulación con las representativas del viento adoptado.

Para verificar la simulación se comparó el espectro de potencia obtenido al aplicar la transformada discreta de Fourier a los registros de velocidad simulados, mediante la aplicación de la transformada rápida (FFT), con respecto al espectro teórico adoptado.

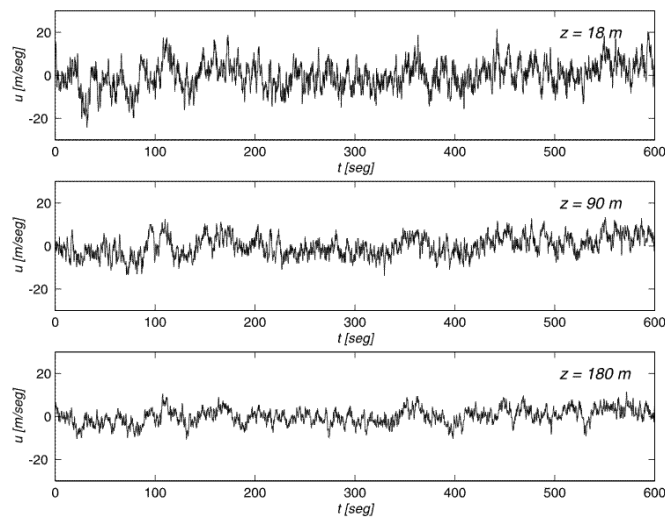


Fig. 1: Registros de velocidad simulados en tres alturas diferentes.

Tabla 1: Comparación de las intensidades de turbulencia para una muestra.

Z (m)	$I(z)_{\text{objetivo}}$	$I(z)_{\text{simulación}}$
18	0,275	0,2546
90	0,1299	0,1264
180	0,0802	0,0788

En la Figura 2 se puede observar el ajuste de los espectros de potencia para 3 puntos. La figura 4.15 muestra la correlación cruzada entre los puntos $z = 18$ m y $z = 90$ m (R15), $z = 18$ m y $z = 180$ m (R110), $z = 90$ m y $z = 180$ m (R510), junto con la función de correlación teórica.

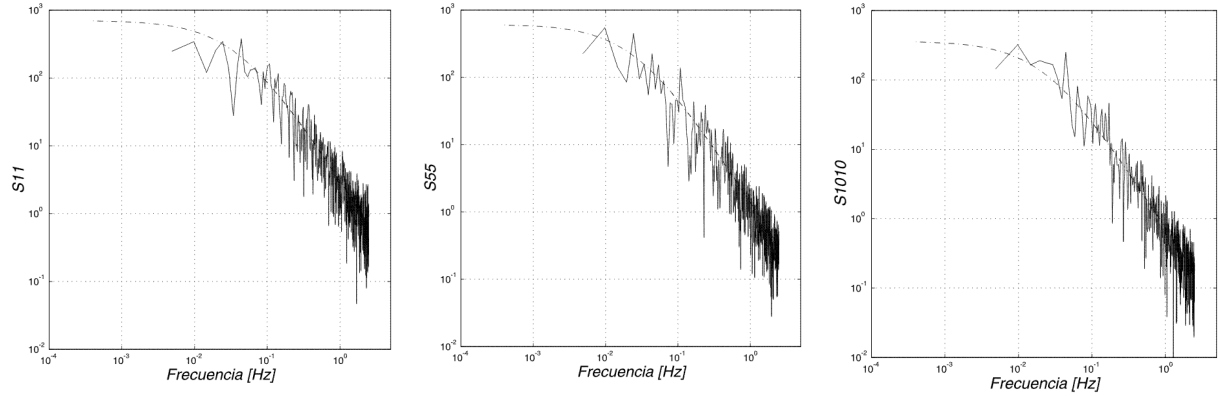


Fig. 2: Comparación de los espectros de las series de velocidad (línea continua) con la expresión teórica (línea de trazos).

Así como para la descripción espacio-temporal del campo de velocidades es necesaria la inclusión de la función de coherencia, ecuación (8), los efectos de carga sobre las áreas tributarias en cada nodo correspondiente a los elementos en que se discretiza la estructura (cuya división coincide con la efectuada al campo de velocidades), deben ser convenientemente considerados a través de un filtro sobre los registros de carga que refleje el promediado espacial introducido por el área de incidencia de las velocidades obtenidas mediante la simulación numérica, tal como fue sugerido por Chen y Kareem (2002). En el dominio de la frecuencia este filtro debe reproducir tanto como sea posible el efecto de atenuación del espectro de potencia de las fuerzas dado por la función de admitancia aerodinámica, $\chi(z, n)^2$, cuya relación con el espectro de velocidades está dada por:

$$S_F(z; n) = \left| \rho C_D \overline{AU}(z) \right|^2 \chi(z; n)^2 S_u(z; n) \quad (14)$$

donde ρ es la densidad del aire, C_D es el coeficiente medio de arrastre y A es el área tributaria correspondiente al nodo analizado. Una de las ecuaciones mas utilizadas para la representación de la admitancia aerodinámica es la propuesta por Vickery, (Tsukagoshi et al., 1993):

$$\chi(z; n)^2 = \left[1 + \left(\frac{2n\sqrt{A}}{\overline{U}(z)} \right)^{4/3} \right]^{-7/6} \quad (15)$$

5. CAARC Standar Tall Building

Esta estructura está ampliamente estudiada en la bibliografía, (Melbourne, 1980; Miguel, 2003; Thepmongkorn et al., 1999; Chen y Letchford, 2004), y es un modelo propuesto para comparar las mediciones experimentales entre diversos túneles de viento. El edificio es un prisma rectangular de dimensiones 30 m x 45 m x 180 m de altura, de paredes lisas y cuyo techo es horizontal, plano y sin parapetos, como puede observarse en la Figura 3.

El edificio esta emplazado en un entorno urbano y el exponente de la ley potencial de velocidades medias propuesto es $\alpha = 0,28$. Sólo es considerado el primer modo

de vibración, considerándose que el edificio pivotea según un punto fijo a nivel del suelo y el modo de deformación es lineal, con amortiguamiento dado por $\xi = 1\%$. Las frecuencias naturales en ambas direcciones principales es de 0, 2Hz y su distribución de masa en altura es uniforme e igual a 160kgm^{-3} .

Para el modelado por elementos finitos de la estructura se utilizó un programa comercial, mediante elementos uniaxiales de 2 nodos para modelos estructurales tridimensionales. La estructura fue considerada empotrada al nivel del suelo y en el análisis dinámico se consideró sólo su modo fundamental, respetándose todas las demás características del CAARC mencionadas anteriormente.

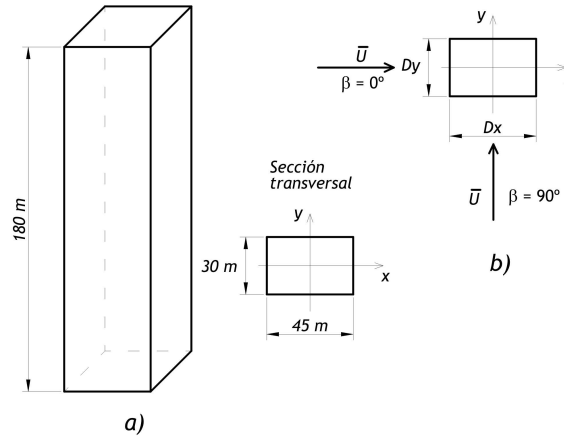


Fig. 3: a) Edificio estándar del CAARC, b) direcciones de carga de viento consideradas.

Para la determinación de la inercia de los elementos que conformaban el modelo se utilizó la siguiente relación, (Chen y Letchford, 2004):

$$n_0 = \frac{(1,875)^2}{2\pi H^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (16)$$

donde m es la masa por unidad de longitud, H es la altura del edificio, E es el modulo de Young (considerado en este trabajo como igual a 2100 tn/cm^2). La frecuencia natural obtenida mediante el modelo numérico fue de $0,1991 \text{ Hz}$, considerándose una buena aproximación a la frecuencia natural del prototipo.

El efecto del viento se consideró mediante el promediado espacial de las cargas de viento sobre las áreas de incidencia correspondientes a cada nodo mediante la función de admitancia aerodinámica, en forma de filtro sobre los registros de velocidades simulados numéricamente.

Para ello se aplicó la ecuación (6) en el dominio de la frecuencia, obteniendo nuevamente los registros de velocidad en el dominio del tiempo, a través de la IFFT.

Una vez simulados los registros de velocidad se procedió a obtener los correspondientes registros de carga. La carga de viento sobre la estructura está compuesta por una parte media y una fluctuante superpuesta a la anterior cuyas ecuaciones son:

$$\bar{F}_i(t) = \frac{1}{2} \rho C_D A_i \bar{U}^2 \quad (17)$$

$$\bar{F}_i(t) = \rho C_D A_i \bar{U} u^*(t) \quad (18)$$

donde ρ es la densidad del aire (1,25kg/m³), A_i área tributaria del nodo considerado, C_D es el coeficiente de arrastre y $u^*(t)$ es el registro de velocidades fluctuantes previamente filtrado.

En la Figura 4 se presenta como ejemplo los registros de carga de una simulación para los puntos $z = 18$ m, $z = 90$ m y $z = 180$ m.

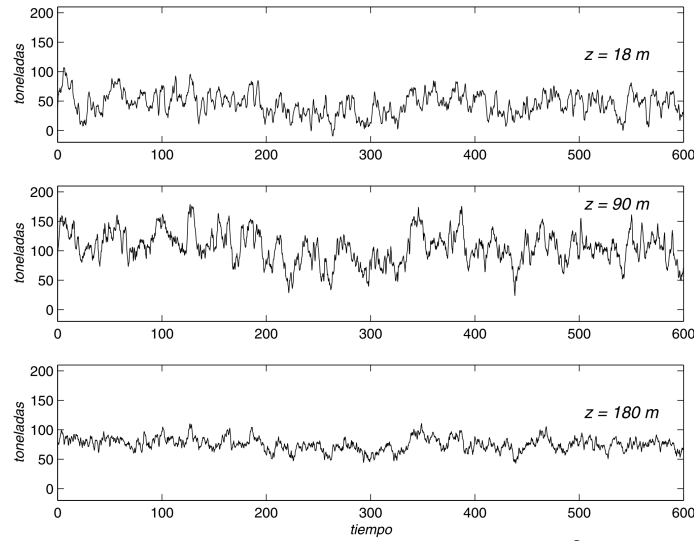


Fig. 4: Registro de cargas nodales para $\beta = 90^\circ$, en tres puntos.

Para calibrar el método numérico se utilizó datos reportados en bibliografía. Los resultados obtenidos se muestran en Figura 5 donde se observa que la respuesta media no es modificada al no incluir la correlación espacial de las velocidades fluctuantes, pero la respuesta máxima resultó sensiblemente inferior.

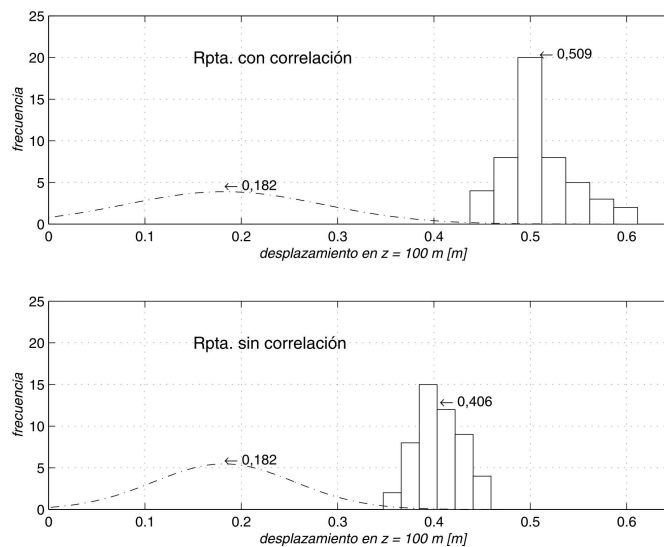


Fig. 5: Distribución de probabilidad y frecuencias de los valores de la respuesta para cargas correlacionadas.

Para la adopción de los valores del coeficiente de arrastre se tomaron los utilizados por Miguel (2003), extraídos de la norma brasilera de vientos NBR 6123, los cuales fueron $C_D = 1,25$ para $\beta = 0^\circ$ y $C_D = 1,25$ para $\beta = 90^\circ$.

En la Tabla 2 se resumen los principales resultados del análisis dinámico de la respuesta longitudinal, teniendo en cuenta que para un ángulo $\beta = 0^\circ$ de incidencia del viento el desplazamiento resultante está dado en la dirección x, y para $\beta = 90^\circ$ en la dirección y. Se adoptó la siguiente simbología: $\bar{x}$, σ_x , valor medio y desvío estándar, respectivamente, del desplazamiento del nodo superior de la estructura, $z = 180$ m, y $\bar{x}_{\max}$, $\sigma_{x\max}$, valor medio y desvío estándar, respectivamente, de los 30 valores máximos extraídos de cada registro de respuesta dinámica. Las mismas consideraciones se realizaron para $\beta = 90^\circ$.

El factor de pico, dado por la relación $g = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma_x}$, fue de 2,96 para $\beta = 0^\circ$ y de 2,99 para $\beta = 90^\circ$. En la Figura 6 se pueden observar en forma gráfica los valores de la Tabla 3.

A efectos de comparar los resultados obtenidos con datos experimentales, se utilizaron los valores adimensionalizados de la velocidad y desplazamientos en cada dirección, según las siguientes expresiones:

Velocidad reducida: $\frac{\bar{U}_H}{n_0 D_x} = \frac{45,71}{0,1991 * 45} = 5,10$ donde $\bar{U}_H$ es la velocidad media en el tope del prototipo y D_x la dimensión horizontal principal del prototipo. Los resultados se muestran en Tabla 3.

Tabla 2: Resumen los principales resultados del análisis dinámico de la respuesta longitudinal

	$\bar{x}$	σ_x	$\bar{x}_{\max}$	$\sigma_{x\max}$
$\beta = 0^\circ$	0,1927	0,0838	0,4410	0,0396
	$\bar{y}$	σ_y	$\bar{y}_{\max}$	$\sigma_{y\max}$
$\beta = 90^\circ$	0,3238	0,1369	0,7333	0,0643

Tabla 3: Resultados adimensionalizados para su comparación.

$\beta = 0^\circ$	$\frac{\bar{x}}{D_x} = \frac{0,1927}{45} = 0,043$	$\frac{\sigma_x}{D_x} = \frac{0,0838}{45} = 0,0019$
$\beta = 90^\circ$	$\frac{\bar{y}}{D_y} = \frac{0,3238}{30} = 0,0108$	$\frac{\sigma_y}{D_y} = \frac{0,1369}{30} = 0,0046$

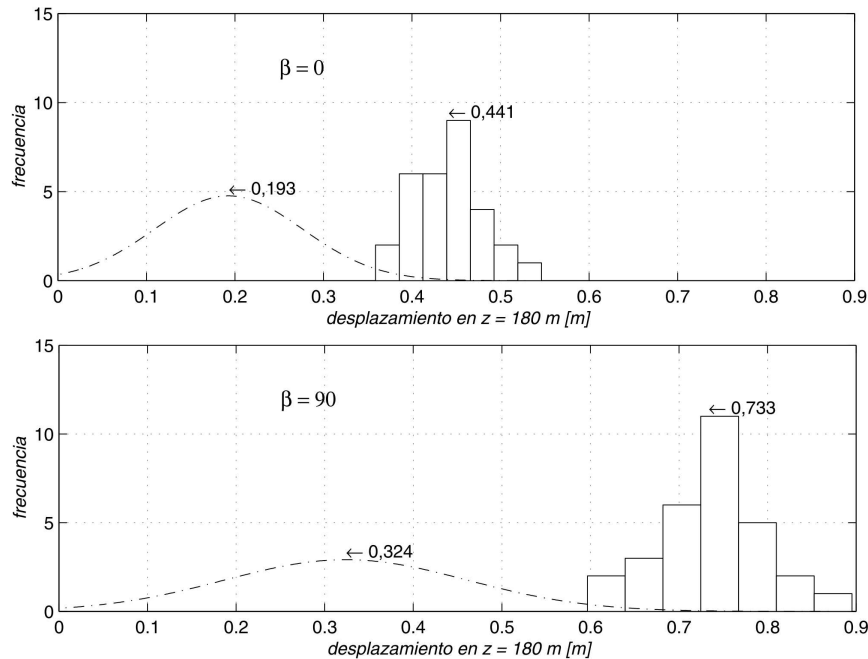


Fig. 6: Análisis estadístico de la respuesta para $\beta=0^\circ$ y $\beta=90^\circ$.

Estos valores son incluidos en la Figura 7, reproducida del estudio realizado por Thepmongkorn et al. (1999) junto con los obtenidos por Miguel (2003). El primer trabajo corresponde a una simulación representativa de un terreno abierto, con un exponente $\alpha = 0,15$ de la ley potencial de velocidades medias e intensidad de turbulencia en el tope del modelo $I_u=0,10$; mientras que en el segundo el exponente fue $\alpha = 0,19$ y la intensidad de turbulencia $I_u= 0, 046$. Incluidos en la figura 4.20 también se encuentran los valores obtenidos por Melbourne (1980), $\alpha = 0,28$ (representativo de un entorno urbano) e intensidad de turbulencia $I_u=0,10$.

6. Determinación de la respuesta dinámica mediante técnicas experimentales

Para la determinación de la respuesta dinámica de estructuras sometidas a la acción del viento a través de ensayos de modelos reducidos en túnel de viento, se deben considerar las características dinámicas de las mismas. Esa técnica es denominada modelado aeroelástico. Según Simiu y Scanlan (1986), la aeroelasticidad estudia el fenómeno en el cual las fuerzas aerodinámicas y movimientos estructurales interactúan significativamente.

En el modelado aeroelástico se deben reproducir la ambientación específica y las propiedades dinámicas de los modos de vibración que contribuyen significativamente a la respuesta inducida por el viento. Así, además de simular el escurrimiento natural del viento y la geometría externa de la edificación, es necesario reproducir la rigidez, la inercia y el amortiguamiento de la estructura.

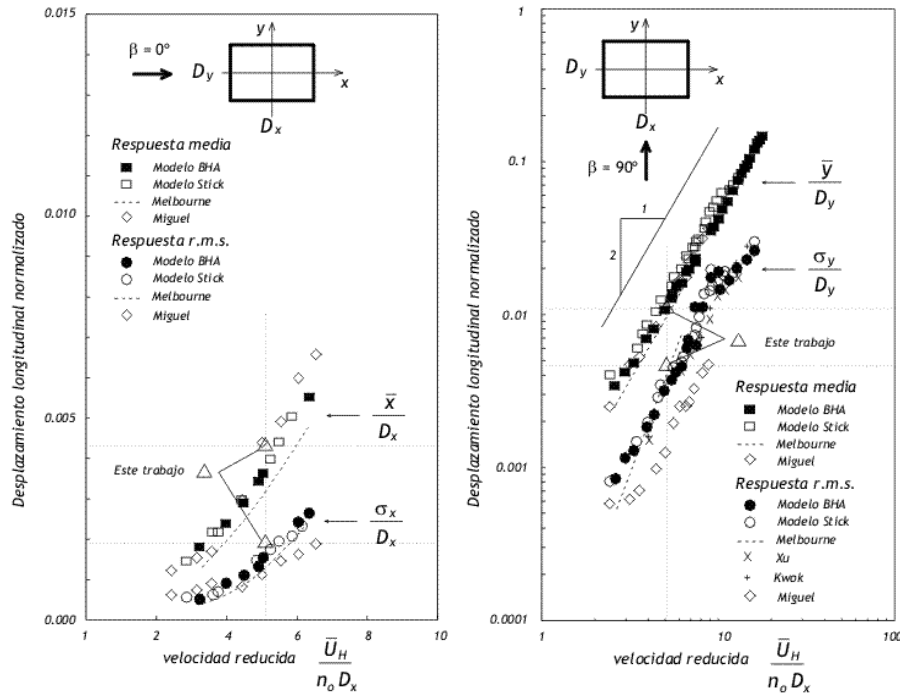


Fig. 7: Comparación de los resultados obtenidos de la respuesta para $\beta = 0^\circ$ y $\beta = 90^\circ$ con mediciones experimentales.

6.1 Técnica y descripción de la balanza de base

Una técnica que ha reemplazado el ensayo de modelos aeroelásticos para un gran número de estructuras altas en túnel de viento es la denominada técnica de la balanza de base de alta frecuencia (Tschanz y Davenport, 1983). En ésta no se procura modelar las propiedades aeroelásticas de la estructura, de hecho el sistema soporte se lo construye deliberadamente rígido, para colocar al modelo por sobre el rango de fuerzas excitatorias del viento. Se utiliza un modelo rígido, que reproduce la forma del edificio.

El modelo es soportado en la base por un sistema de medición, el cual puede medir la componente media y fluctuante de las fuerzas de viento y de los momentos, a una frecuencia alta, sin amplificación o atenuación significativa.

Para la determinación experimental de la respuesta dinámica longitudinal en túnel de viento, se desarrolló una balanza para modelos rígidos que permite la determinación de la componente fluctuante de la respuesta en dos direcciones ortogonales.

Esta balanza ha sido implementada con anterioridad y su funcionamiento ampliamente estudiado por Oliveira (2003); Oliveira et al. (2004) y Miguel (2003); Fadel Miguel et al. (2004). La balanza fue construida en aluminio para aplicaciones aeroespaciales con el objeto de aumentar su resistencia sin disminuir su maleabilidad y peso.

Básicamente, consta de dos ejes perpendiculares entre si, los cuales pueden girar de manera independiente en torno a un mismo punto, y con la posibilidad de regular la inercia, rigidez rotacional y amortiguamiento.

Aplicando la escala geométrica de 1:450 a las dimensiones del prototipo, se obtuvo un modelo de 68 mm por 100 mm de base, por 400 mm de altura. En la Figura 8 se puede observar detalles de la balanza y del modelo CAARC construido para los ensayos en el túnel.

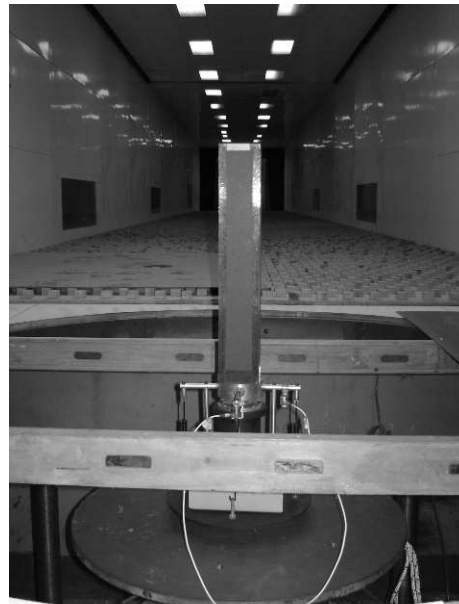
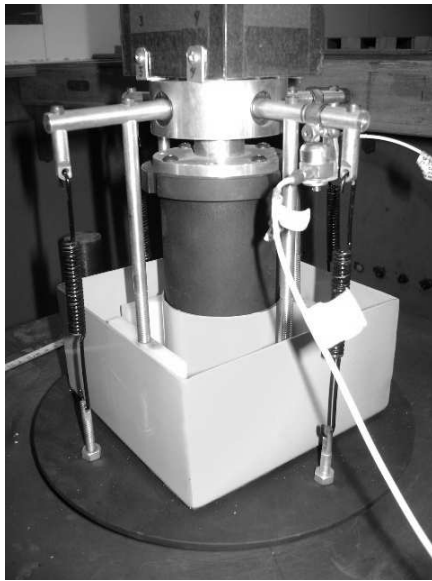


Fig. 8: Balanza utilizada y Modelo del CAARC

El modelo fue instrumentado con dos acelerómetros piezoeléctricos Isotron 7254A-10, fijados a los ejes de la balanza mediante planchuelas de aluminio. Cada acelerómetro fue acoplado a un acondicionador de señal Isotron 102 y una fuente de potencia Isotron 109. El acondicionador posee dos canales, cada uno de ellos suministra un voltaje AC de salida, proporcional a la señal de aceleración adquirida, con la posibilidad adicional de amplificar la señal. La plaqueta de adquisición conversora analógica digital fue una PCI-DAS 1602/16, con 16 canales simples y una capacidad de muestreo de 200 KHz.

6.2 Ensayos en t túnel de viento

Los ensayos se realizaron en el túnel de viento Jacek P. Gorecki de la UNNE el cual tiene una cámara de ensayos de 2,4 m de ancho x 1,8 m de alto x 22,4 m de longitud, con una velocidad de viento máxima en vacío de 25 m/s. Mayores detalles pueden ser encontrados en (Wittwer y Möller, 2000).

El modelo es sometido a la acción de un flujo turbulento generado a partir de dispositivos de simulación de la capa límite atmosférica colocados en la cámara de ensayos del túnel de viento. Para este trabajo se utilizó la simulación mediante rugosidad, barrera y generadores de vórtices sugerida por Counihan (1972).

Los parámetros característicos de la simulación son la altura de capa límite $z_g = 1,16$ m, el parámetro de longitud de rugosidad $z_0 = 2,6$ mm, el exponente de la ley potencial de velocidades medias $\alpha = 0,26$.

Una vez posicionado el modelo, obtenidas las frecuencias naturales del sistema balanza-modelo y calibrado el amortiguamiento se iniciaron los ensayos. Se consideraron las dos direcciones perpendiculares a las caras del modelo, direcciones x e y. La tasa de adquisición fue de 1000 Hz con una duración de 20 segundos para cada velocidad ensayada. Este periodo de 20 segundos en escala representa una duración de 12 minutos aproximadamente, en ambas direcciones.

En la Figura 9 también son incluidos los resultados experimentales de los trabajos realizados por Thepmongkorn et al. (1999), Miguel (2003) y Oliveira (2003). Como

fuera comentado previamente, los valores obtenidos por Thepmongkorn et al. (1999) corresponden a una simulación representativa de terreno abierto, con un exponente $\alpha = 0,15$ de la ley potencial de velocidades medias e intensidad de turbulencia en el tope del modelo $I_u = 0,10$; mientras que para los trabajos de Miguel (2003) y Oliveira (2003) el exponente fue $\alpha = 0,19$ y la intensidad de turbulencia $I_u = 0,046$. También fueron incluidos los valores reportados por Melbourne (1980), con $\alpha = 0,28$ (representativo de un entorno urbano) e $I_u = 0,10$. La intensidad de turbulencia en el tope del modelo para la simulación implementada en este trabajo fue $I_u = 0,08$. Para la dirección coincidente con el eje x, $\beta = 0^\circ$, la respuesta longitudinal rms obtenida es ligeramente superior a los valores reportados por Thepmongkorn et al. (1999) y Melbourne (1980), no obstante que la intensidad de turbulencia es algo inferior. Con respecto a los trabajos de Miguel (2003) y Oliveira (2003) esta diferencia aumenta, lo cual de alguna manera es esperado, ya que la intensidad de turbulencia simulada en estos trabajos es del orden de un 50% inferior.

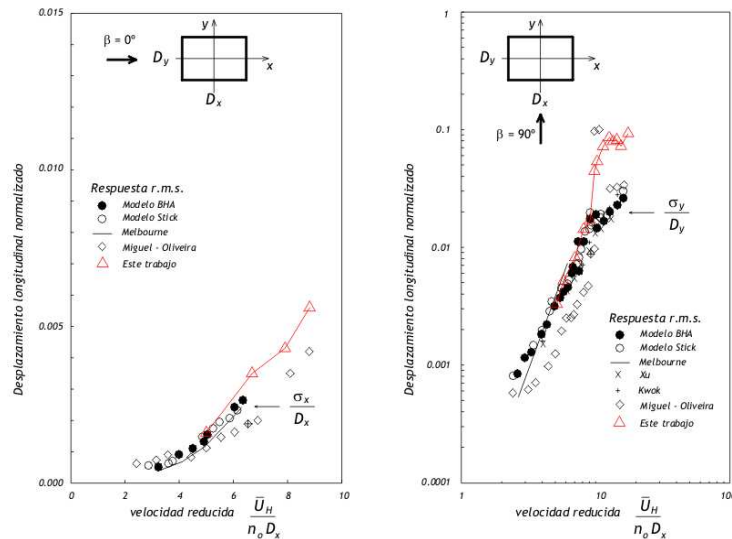


Fig. 9: Desplazamientos longitudinales en el tope del modelo en función de la velocidad reducida según las direcciones principales.

Con respecto a la dirección coincidente con el eje y, $\beta = 90^\circ$, la respuesta longitudinal rms es coincidente con los valores de reportados Thepmongkorn et al. (1999) y Melbourne (1980) para los valores de velocidad reducida inferiores al valor de velocidad crítica asociada al desprendimiento de vórtices en la dirección transversal al escurrimiento.

En los trabajos mencionados, se detectó un pico en la respuesta longitudinal asociado con la respuesta rms transversal con características algo diferentes entre el presentado por Thepmongkorn et al. (1999) (pico $\cong 0,02$ para velocidad reducida = 9,5) y por Oliveira (2003) (pico $\cong 0,10$ para velocidad reducida = 11). Ambos autores relacionaron este pico en la dirección longitudinal como resultado del acoplamiento causado por la transferencia de energía desde la dirección transversal a la longitudinal, debido a la coincidencia en las frecuencias naturales del modelo en las dos direcciones principales.

Este pico también es reproducido en las mediciones experimentales efectuadas en este trabajo, pero con características diferentes. No se evidencia, dentro del rango de velocidades ensayadas, una atenuación significativa de la respuesta una vez

superada la velocidad crítica asociada al desprendimiento de vórtices, como si es posible de observar en los trabajos citados anteriormente.

Probablemente, esto es debido a que para las características particulares del sistema balanza-modelo, los efectos del acoplamiento sean mayores, no permitiendo que la respuesta decaiga rápidamente.

7. Conclusiones

En este trabajo se presentaron dos métodos para la determinación de la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas bajo la acción del viento atmosférico. Estos métodos consistieron en una evaluación mediante métodos numéricos y otro mediante técnicas experimentales.

El procedimiento numérico permite un análisis dinámico longitudinal en el dominio temporal para estructuras civiles esbeltas, las cuales pueden ser asimiladas a modelos lineales. Para validar el procedimiento se analizó el edificio estándar del CAARC (Commonwealth Aeronautical Advisory Research Council).

A efectos de comparar posteriormente con los resultados obtenidos en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, se asimilaron a las logradas en la simulación de capa límite del túnel. Los resultados fueron comparados con las distintas fuentes, observándose una buena congruencia.

Es importante destacar que el procedimiento utilizado para la simulación numérica del viento atmosférico tiene aplicaciones limitadas a estructuras ubicadas en terrenos suburbanos o rurales, debido a que es utilizada la hipótesis de escurrimiento medio con dirección constante en altura, situación no verificada en ambientes urbanos. Cuidadosas mediciones y datos experimentales reportados en bibliografía confirmaron que en ambientes urbanos, con estructuras de altura media de 30 metros, la dirección del escurrimiento medio varía en altura, con intensidades de turbulencia varias veces superiores que las aportadas por la bibliografía. Además, en el espectro del viento hasta una altura de 60 metros se evidenció un corrimiento del contenido de energía de alta a baja frecuencia.

Estas características, no contempladas en el modelo numérico adoptado, conducen a que no se reproduzca adecuadamente las condiciones imperantes a escala natural en centros urbanos.

En correspondencia con la disminución del coeficiente de la ley potencial de velocidades, α , la respuesta longitudinal media debe ser mayor, debido a que este coeficiente define la forma del perfil de velocidades medias y por lo tanto, aumentando la carga media sobre la estructura.

Esto se aprecia notablemente en la respuesta media obtenida mediante el modelo numérico para el viento incidiendo sobre la superficie mayor, ($\beta=90^\circ$), donde la respuesta obtenida se concuerda con los resultados experimentales correspondientes $\alpha = 0,28$ y $\alpha = 0,15$. Para el viento incidiendo sobre la superficie menor, $\beta=0^\circ$, esto no sucede así.

Sin embargo, el valor de la respuesta media en esta dirección se aproxima a los resultados aportados por Miguel, con $\alpha = 0,19$, por lo que la respuesta obtenida mediante el modelo numérico se encontraría en el rango de dispersión de los resultados experimentales.

También se debe considerar la posibilidad de que el valor del coeficiente de arrastre medio adoptado no sea el adecuado para este caso analizado.

Con respecto a los valores rms de los desplazamientos, se esperaría que cuanto menor sea la intensidad de turbulencia, menor sería la respuesta fluctuante obtenida. Esta hipótesis se verifica en los datos experimentales pero no así en los resultados del modelo numérico en los cuales se obtienen valores que exceden a lo experimentales en ambas direcciones de viento.

En tal sentido, es importante considerar que en la determinación de los desplazamientos fluctuantes se utilizó la hipótesis de carga cuasi-estática, haciendo uso del coeficiente de arrastre medio. Esto implica no considerar efectos de interacción fluido-estructura, los cuales modificarían las respuestas fluctuantes obtenidas.

Con respecto al modelado mediante técnicas experimentales, se construyó una balanza para modelos rígidos que permite la determinación de la respuesta rms longitudinal y transversal, determinándose en este trabajo sólo los desplazamientos longitudinales. Para el viento incidiendo sobre la cara más pequeña del edificio se observó que las respuestas obtenidas fueron acordes con las publicadas en los trabajos de referencia, creciendo con el aumento de la velocidad de ensayo.

Para el viento incidiendo sobre la cara más grande del edificio se detectó el mismo pico que en otros ensayos sobre el modelo del CAARC, sin embargo la respuesta para velocidades reducidas superiores no presentó el mismo comportamiento que en los trabajos mencionados.

No obstante esto, para velocidades inferiores a la relacionada con el desprendimiento de vórtices, las respuestas rms obtenidas son coherentes con las obtenidas en otros túneles de viento.

Por último es importante señalar la influencia en las respuestas máximas de la inclusión de la correlación espacial e la turbulencia a través de la función de coherencia.

Referencias bibliográficas

ABNT: NBR-6123: Forças Devidas ao vento em Edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, Rio de Janeiro, 1998.

BLESSMANN, J.: O vento na engenharia estrutural. Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, RS-Brasil, 1995.

CHEN, X.; KAREEM, A.: Discussion on Time domain buffeting response calculations of slender structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90, pp. 639–642.

CHEN, L.; LETCHFORD, C. W.: Parametric study on the along-wind response of the CAARC building to downbursts in the time domain. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92, pp. 703–724.

COUNIHAN, J.: ((The structure and the wind tunnel simulation of rural and urban adiabatic boundary layers)). Symposium on External flows, University of Bristol, 1972, pp. 325–339.

INTI: Proyecto de Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones, CIRSOC 102. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles del Sistema INTI, 2001.

MELBOURNE, W. H.: Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1980, 6, pp. 73–88.

MIGUEL, L. F. M.: Estudo Teórico e Experimental de um Edifício Alto Submetido à Ação dinâmica do Vento. Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - Brasil, 2003.

NATALINI, B.; DE BORTOLI, M. E. y NATALINI, M. B.: Full-depth simulations of a neutrally stable atmospheric boundary layer in a wind tunnel. 2nd East European Conference on wind engineering. *Proceedings vol. 1*, 1998, pp. 299–304.

OLIVEIRA, M. G. K.: Desenvolvimento de um suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos em túnel de vento. Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - Brasil, 2003.

OLIVEIRA, M. G. K.; FADEL MIGUEL, L. F.; ROCHA, M. M. y LOREDO-SOUZA, A. M.: Desenvolvimento de um Suporte Flexível para Ensaios de Modelos Aeroelásticos em Túnel de Vento. XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Mendoza, Argentina, 2004.

SIMI, E. y SCALAN, R.: Wind effects on structures. A Wiley-Interscience Publication, 1986.

TSCHANZ, T. y DAVENPORT, A. G.: The base balance technique for the determination of dynamic wind loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13, pp. 429–439.

THEPMONGKORN, S.; KWOK, K. C. S. y LAKSHMANAN, N. A.: A two-degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA) model for response predictions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83, pp. 171–181.

VICKERY, B. J.: On the reliability of gust loading factors. *Proc. of the Technical Meet Concerning Wind Loads on Buildings and Structures*, National Bureau of Standards, Washington, 1970, pp. 93–104.

WITTEWER, A. J. y MOLLER, S. V.: Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 84, pp. 307–320.