

COMPORTAMIENTO DE VIVIENDAS BAJO CARGAS DE VIENTO: ANÁLISIS NUMÉRICO

Marta B. Rosales^{1,2} y Juan Chierchie³

¹Investigadora científica, CONICET

²Docente, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Alem 1253
8000, Bahía Blanca, Argentina
e-mail mrosales@criba.edu.ar

RESUMEN

Frecuentemente las viviendas unifamiliares no son objeto de un alto nivel de estudio de ingeniería, como lo son estructuras de mayor porte. Sin embargo es notable el daño que sufren en ocasión de catástrofes naturales tales como huracanes, tornados o tormentas fuertes. En las últimas décadas los trabajos experimentales en túneles de viento han permitido el análisis cuantitativo y cualitativo de la acción estática y dinámica utilizando modelos físicos. Alternativamente y en años recientes estudios numéricos utilizando las técnicas de la dinámica computacional de fluidos logran objetivos similares, aunque pareciera que esta técnica tiene un rol complementario.

Este trabajo es la primera etapa de una línea de estudio sobre diseños adecuados de viviendas unifamiliares para resistir con eficiencia acciones del viento. Se trata de utilizar herramientas numéricas (código de elementos finitos) con datos de presiones hallados en túneles de viento. El objetivo es complementar ambas técnicas. Se comentan, por otro lado, propuestas para simplificar el tratamiento de las cargas sin descuidar la seguridad y la economía. Una de ellas es la generalización de la respuesta utilizando funciones de influencia, la otra es la simplificación de la descripción de la presión del viento sobre las estructuras.

ABSTRACT

Frequently the low-rise buildings used for houses are not subjected to a high level of engineering analysis, as is the case with larger structures. However they suffer great damages in occasion of natural hazards as tornadoes, hurricanes and severe storms. In the last decades experimental tests at the wind tunnel have given place to the qualitative and quantitative analysis of the static and dynamic action using physical models. Alternatively and more recently, numerical studies using computational fluid dynamic techniques have achieved similar goals, though this tool appears as complementary.

This work is the first stage of a study about the most adequate design of low-rise buildings for houses to resist efficiently wind action. Numerical tools (finite element method) are employed using pressure data from the wind tunnel. The objective is the complement of both techniques. Additionally two approaches to achieve general solutions and simplicity without disregarding security and economy are commented. One of them is the generalization of the response using influence functions. The other is the simplification of the wind pressure description over the structures.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente las construcciones para viviendas familiares no reciben un análisis tan detallado de ingeniería estructural como es el caso para edificios de mayor porte. Esto es obviamente proporcional a la inversión que se realiza. Sin embargo las construcciones de baja altura suelen sufrir grandes daños bajo la acción de fenómenos naturales. Asimismo la cantidad de las mismas es grande por lo que las

pérdidas globales suelen ser no despreciables. En particular es conocida la acción destructiva del viento en ocasión de tormentas como huracanes, tornados, pasajes de frente frío. Es evidente que no es económicamente viable la consideración de estos fenómenos en las construcciones de baja altura, en general. Sin embargo es sabido que un buen comportamiento de las viviendas frente a cargas de viento normales (las provenientes de ensayos en túneles de viento o de los códigos vigentes) mejorará notablemente su performance ante la acción de tormentas extraordinarias.

El presente trabajo reporta una etapa preliminar de un estudio tendiente a analizar mejoras en el diseño de viviendas convencionales que incrementen la seguridad de las mismas bajo la acción del viento. Como es sabido dichas cargas dependen de la geometría de la edificación y del tipo de terreno que la rodea (rugosidad), entre otros factores. La metodología consiste en utilizar cargas de viento (succiones o presiones) halladas en túneles de viento de capa límite [1-6] en un cálculo numérico de esfuerzos utilizando un algoritmo computacional de elementos finitos [7]. El análisis de dichos esfuerzos permitirá sugerir cambios en el diseño (desde la geometría externa hasta los elementos estructurales). Una etapa posterior del estudio requerirá de la introducción de dichos cambios en el modelo físico a utilizarse en el túnel de viento para la obtención de nuevas cargas de viento. En esta etapa preliminar se utilizan esquemas de cargas de viento halladas por Jensen y Franck [1]. Dos geometrías de vivienda fueron consideradas, ambas con planta rectangular. En el cálculo numérico se introduce una estructura elemental y se calculan los esfuerzos. Los resultados serán utilizados para un estudio de eventuales modificaciones en el diseño.

Por otro lado se comentan dos metodologías adicionales con el objetivo de lograr una solución más general y simplificada. El uso de funciones de influencia puede resultar útil para generalizar la respuesta de la estructura de la vivienda [8,9]. Sin embargo no se simplifica la descripción de las presiones de viento. Algunos intentos han sido realizados en ensayos físicos [5]. Un enfoque analítico en este sentido puede encontrarse en la descomposición con funciones ortogonales [10].

MODELO FÍSICO PARA ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO

Para comenzar con este estudio se eligió utilizar los resultados publicados por Jensen y Franck [1]. Cabe acotar que dichos investigadores realizaron estudios en túneles de capa límite. Hasta esos años la turbulencia del viento natural había sido intencionalmente evitada utilizando túneles donde se simulaba el flujo suave del aire. En dicha referencia se reporta una gran variedad de resultados de presiones medias a través de curvas de nivel de coeficientes de presión sobre paredes y cubiertas de edificios de baja altura. En el presente trabajo se analizan dos tipos de viviendas, ambas de planta rectangular. Una de ellas con el techo a dos aguas y la otra con una cubierta con cuatro pendientes. Se analizaron dos tipos de rugosidades y una dirección de viento. En la Figuras 1 y 2 se muestran los niveles de carga [1] para ambas geometrías. En las figuras aparecen la relación h/w , números proporcionales a la altura al borde del techo, la longitud y el ancho; α , la pendiente de la cubierta en grados y H/z_0 , la relación entre la mayor altura del techo y el parámetro de rugosidad (a mayor número menor rugosidad).

MODELO NUMÉRICO

Un primer ejemplo realizado fue simplemente reproducir el modelo del túnel de viento con una "cáscara" de madera de una pulgada de espesor para la geometría de la Figura 1. Esto evidentemente pretende aproximarse desde el modelo experimental al modelo numérico en sucesivas etapas y realizando los ajustes necesarios en su simulación. Se utilizó el programa ALGOR [7] de elementos finitos utilizando elementos placa tipo Veuveke con cinco grados de libertad por nodo. La introducción de las cargas en ALGOR se realiza como carga superficial por elementos, lo cual hace prever un trabajo algo laborioso cuando se analicen otras direcciones de viento o rugosidades para las cuales el gradiente de los coeficientes de presión es mayor. Se eligió como material madera de pino Douglas de un espesor constante de 1" con módulo de elasticidad $E = 13 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. Se adoptó $h=4$, $l=8$, $w=1$, todas las medidas en metros. En el caso de la cubierta a dos aguas se utilizaron los datos de

presiones (succiones) reportados en [1] y que se grafican en la Figura 1 en curvas de factores de forma (coeficientes).

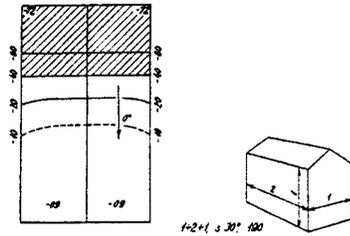


Figura 1. Geometría y curvas de carga para el ejemplo 1.

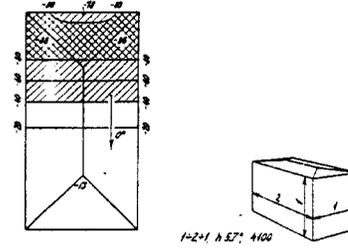


Figura 2. Geometría y curvas de carga para el ejemplo 2.

Los signos negativos indican succiones. Los números indican porcentajes. En el modelo numérico se introdujeron las presiones negativas en valores absolutos. Para llevar esto a cargas reales basta con aplicar la definición de dichos coeficientes [2]

$$c_{\bar{p}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}{q_g}; \quad q_g = \frac{1}{2} \rho \bar{V}_g^2 \quad (1.2)$$

donde $c_{\bar{p}}$ es el coeficiente de presión (factor de forma) de presión media, q_g la presión dinámica de referencia, $p(t)$ es la presión instantánea, t el tiempo, T el período de muestreo, ρ la densidad del aire y \bar{V}_g la velocidad de referencia. Debe aclararse que todos los resultados fueron hallados para $q_g=1$. Deben afectarse los mismos por la verdadera presión dinámica de referencia.

RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección se reportan los resultados hallados utilizando ALGOR [7] y las cargas de la Figura 1. En la Figura 3 se muestra un diagrama de tensiones, dado por las tensiones de Von Mises para el modelo 1A (corresponde a la geometría de la Figura 1 sin estructura) frente a las succiones que corresponden a las curvas de la Figura 1.

La misma geometría exterior y con las mismas cargas fue luego analizada suponiendo una estructura portante para la cubierta, llamado ejemplo 1B. Cabe destacar que el programa ALGOR ver.12 permite trabajar con elementos de distinto tipo con sencillez. Se utilizó una cabriada elemental con tirantes de madera de 2"x5" (un triángulo simple compuesto de dos tirantes inclinados y uno horizontal). La Figura 5 muestra la disposición de los elementos estructurales y la carga esquematizada y la Figura 6 muestra los valores de tensiones en los elementos axiales de la cabriada.

Se analiza ahora una cubierta con cuatro pendientes. Efectivamente esta última variante ofrece mejor resistencia a las cargas de viento. Para estudiar este comportamiento se analizó el ejemplo 2 con la geometría de la Figura 2. Las tensiones de von Mises se muestran en la Figura 4.



Figura 3. Tensiones de von Mises para el ejemplo 1A.

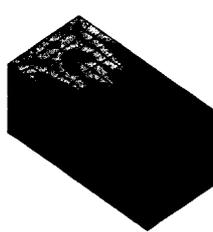


Figura 4. Tensiones de von Mises para el ejemplo 2.

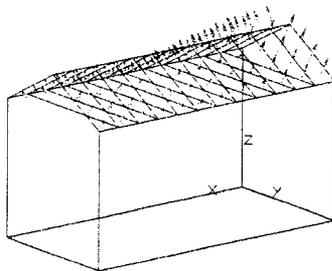


Figura 5. Geometría y cargas del ejemplo 1B.

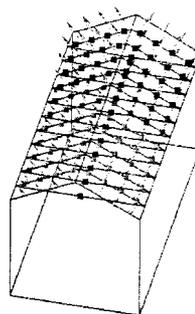


Figura 6. Valores de tensiones en los elementos estructurales del ejemplo 1B.

PROPUESTAS DE GENERALIZACIÓN Y SIMPLIFICACIÓN

El proceso descrito anteriormente resulta más económico que el ensayo físico. Sin embargo en ambos casos resulta complejo realizar estudios paramétricos. Cuando se utiliza el método de elementos finitos deben calcularse una gran variedad de casos, para cada forma externa elegida, variando la dirección del viento, la rugosidad, entre otros parámetros. Además en el análisis numérico arriba mostrado sólo se consideró la componente media de la presión. Es válido entonces discutir otras alternativas de análisis con el objeto de realizar estudios más simples y generales, sin perder de vista la seguridad y economía del diseño.

Uso de líneas de influencia para generalizar la respuesta

Como es sabido la carga de viento tiene variaciones en el tiempo y el espacio. En el tiempo pueden distinguirse las siguientes componentes de una respuesta genérica (e.g., esfuerzos internos, tensiones, o desplazamientos):

- Media, (respuesta promedio en el tiempo); \bar{r}
- Background (fondo), (de variación lenta e irregular en el tiempo); \tilde{r}_B^2

- Resonante, (con amplitud variable a las frecuencias naturales de la estructura). $\tilde{r}_{R_j}^2$

La respuesta pico \hat{r} puede escribirse como

$$\hat{r} = \bar{r} + g \sqrt{\tilde{r}_B^2 + \sum_j \tilde{r}_{R_j}^2} \quad (3)$$

donde g es un factor pico estadístico (en general de 3 a 5). Para este tipo de edificios es razonable un enfoque *quasi-estático* y puede despreciarse la componente resonante. Por otro lado la correlación espacial puede también tener un efecto en los resultados. Davenport [8] propone un enfoque unificado para englobar a las variedades de distribución y trayectoria de las cargas. La propuesta, brevemente, puede describirse con la respuesta media y de fondo (background) respectivamente:

$$\bar{r} = q_g \int C_{\bar{p}}(z) i_r(z) dz; \quad \tilde{r}_B^2 = q_g^2 \iint_D R_p(z, z + \Delta z) [C_{\bar{p}}(z) i_r(z)] [C_{\bar{p}}(z + \Delta z) i_r(z + \Delta z)] dz \quad (4)$$

donde $i_r(z)$ es la superficie de influencia para la respuesta r debido a la presión en z y $R_p(z, z + \Delta z)$ el coeficiente de correlación entre los puntos z y $z + \Delta z$. Davenport [8,9] utiliza estos conceptos aplicándolos a estructuras esbeltas horizontales o verticales. Resulta un método muy interesante para obtener resultados confiables con un enfoque simplificado. La propuesta de los autores consiste en aplicar esta metodología para el análisis de las estructuras de edificios de baja altura, por ej. Estructuras de pórticos. Si se pudiera escalar el orden de precisión de menor a mayor, se ubicaría en primer término a un estudio de cargas estáticas (por ej. Códigos), un segundo lugar a un estudio algo más detallado como el mostrado en la primera parte de este trabajo utilizando las cargas halladas por Jensen, y por último con la mayor precisión la descripción de la presión de viento fluctuante completa (llamada "full blown"). Esta propuesta podría ubicarse en tercer o cuarto lugar.

Simplificación de la descripción de la presión de viento

Aunque no es nueva la técnica de descomposición ortogonal parece no haber recibido mayor atención. La misma es potencialmente útil para describir los campos de presión fluctuantes superficiales alrededor de las estructuras. Baker [10] discute su aplicación analizando resultados de modelos a escala real. Puede describirse brevemente [8] de la siguiente forma. El coeficiente de presión fluctuante en un punto z y en un instante t usando funciones ortonormales puede expresarse como

$$C_p(z, t) = \sum_i a_i(t) \varphi_i(z) \quad (5)$$

Ha sido demostrado que las funciones $\varphi_i(z)$ son los autovectores de la matriz covariante de los coeficientes de presión y que los valores de los cuadrados medios de las funciones $a_i(t)$ los autovalores de esa matriz respectivamente. La principal utilidad de este método es encontrar en la práctica que sólo los primeros modos contienen energía significativa y que en principio el campo de presiones fluctuantes sobre una estructura puede expresarse con series truncadas de relativamente pocos términos. Puede decirse que el primer término corresponde a la carga estática y conlleva la mayor parte de la energía. Rosales [5] propone una técnica experimental que intenta medir las componentes principales del campo de presión fluctuante. Si se combinan estos principios con el uso de funciones de influencia podemos escribir:

$$r(t) = \sum_i a_i(t) \int_D \varphi_i(z) i_r(z) dz \quad (6)$$

pudiéndose distinguir las respuestas medias y la r.m.s. respectivamente como:

$$\bar{r} = \sum_i \bar{a}_i(t) \int_D \varphi_i(z) i_r(z) dz; \quad \tilde{r}^2 = \sum_i \left[\tilde{a}_i(t) \int_D \varphi_i(z) i_r(z) dz \right]^2 \quad (7)$$

COMENTARIOS FINALES

En este trabajo se reporta una etapa inicial de un análisis numérico de viviendas bajo la acción de cargas de viento. La motivación de este estudio radica en la diferencia de comportamiento que frente a estas cargas ofrecen los distintos tipos de cubiertas en las viviendas. En particular este tipo de construcción no es comúnmente objeto de estudios detallados de ingeniería aunque representan una gran parte de la industria de la construcción. Por otra parte se producen muchas pérdidas en ocasión de tormentas, tornados o vientos fuertes. Si bien es cierto que la ecuación económica no indica apropiado un cálculo para estas acciones extraordinarias, un diseño con buen comportamiento para cargas normales de viento resistirá mejor dichas acciones.

El estudio consiste en analizar numéricamente con un programa de elementos finitos el efecto de las cargas de viento previamente halladas en túneles de viento de capa límite. Del análisis de una diversidad de geometrías, rugosidades y direcciones de vientos podrá concluirse mejoras en el diseño y eventualmente volver a ensayar en túneles de viento esa nueva propuesta. En este trabajo se reporta una primera etapa, aún en desarrollo, donde se utilizaron cargas de viento publicadas en [1]. Se analizaron dos geometrías, una de ellas incorporando estructura. Para completar esta etapa resta incorporar al estudio más direcciones de viento, rugosidades y cargas en las paredes. Asimismo se pretende modelar las paredes con materiales ortotrópicos. Otras variantes de geometría incluyen los aleros.

También se observa que un estudio paramétrico por este camino puede resultar excesivamente extenso. Por ello se enuncian dos alternativas analíticas, actualmente en estudio, para simplificar y generalizar el estudio de estas construcciones.

REFERENCIAS

- [1] **Jensen, M. and Frank, N.**, *Model-Scale tests in Turbulent Wind: Part II*, The Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark. 1965.
- [2] **Surry, D., Stathopoulos, T. and Davenport, A.G.**, *Wind Loads on Low-Rise Buildings*. Canadian Structural Engineering Conference. Canada, 1978.
- [3] **Davenport, A.G., Surry, D. and Stathopoulos, T.**, *Wind Loads on Low-Rise Buildings: Final Report of Phase III- Parts 1 and 2.*, BLWT Report SS4-1977, The University of Western Ontario, London, Canada. July, 1978.
- [4] **Simiu, E. and Scanlan, R.H.**, *Wind Effects on Structures: An introduction to wind engineering*, John Wiley & Sons, Inc. N.Y., 1978.
- [5] **Rosales, M.B.**, *A novel technique for measuring spatially-averaged pressures: Its development and application to low-rise buildings*. Tesis de Magister (M.E.Sc.). Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, University of Western Ontario, London, Canadá. 1984.
- [6] **The University of Western Ontario**, *Wind Tunnel testing at the Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory: A general outline*. Faculty of Engineering Science, UWO, London, Canada. Nov. 1994.
- [7] **Algor Inc.** ALGOR version 12.04. Professional Mech/VE. Linear Stress and Dynamics Ref., Pittsburg, Pennsylvania Division. 1999.
- [8] **Davenport, A.G.**, *The generalization and simplification of wind loads and implications for computational methods*, J. Wind Eng. And Ind. Aerodyn., Vol. 46 & 47. 1993, págs. 409-417.
- [9] **Davenport, A.G.**, *The response of slender structures to wind*, Proc. NATO Advanced Study Inst. at Waldbronn, 'Wind Climate in Cities', July 5-16, 1993, Germany.
- [10] **Baker, C.J.**, *Aspects of the use of proper orthogonal decomposition of surface pressure fields*. Wind and Structures, Vol. 3, 2000, págs. 97-115.