

CARGAS DE VIENTO SOBRE UNA ESTRUCTURA EN VOLADIZO

Gustavo C. Balbastro^a, Victorio E. Sonzogni^b

^aUTN, Argentina, gbalbastro@yahoo.com

^bCIMEC, INTEC, UNL-CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina. Tel: 54-342-4511594,
sonzogni@intec.unl.edu.ar

Palabras clave: Viento, CFD, cubiertas en voladizo.

Resumen. Las cargas producidas por el viento suelen ser determinantes en el diseño de algunos tipos de estructuras y también causa de algunas fallas observadas.

Las normas de diseño dan prescripciones para construcciones de formas simples, por lo general considerándolas aisladas del entorno, a la vez que advierten sobre los efectos que otras construcciones o características del entorno pueden tener sobre las cargas, los cuales deben ser investigados especialmente para cada caso en particular.

En este trabajo se calculan las cargas debidas al viento sobre un voladizo de estructura metálica que colapsó durante una tormenta. Empleando un código de elementos finitos se modeló la construcción completa con el voladizo que resultó dañado, teniendo en cuenta la construcción completa como también los datos meteorológicos de la tormenta. Se muestran las características del flujo y la modificación de las cargas sobre al voladizo al modificarse distintos parámetros del problema. (CFD, por *computational fluid dynamics*), tratando la turbulencia a través de un modelo de simulación de grandes vórtices (LES, por *large eddy simulation*).

1 INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2012 se produjo el colapso del techo en voladizo de una estación terminal de ómnibus durante una tormenta (1). Este hecho motivó el interés en estudiar las cargas debidas al viento sobre estructuras de este tipo, comparándolas con las que surgen de aplicar las normas de diseño (CIRSOC, 2005).

El procedimiento elegido para evaluar las cargas de viento fue la simulación computacional empleando las herramientas que ya fueran usadas en trabajos anteriores (Balbastro, 2009; Balbastro y Sonzogni, 2012). Estas cargas fueron aplicadas para calcular las solicitaciones sobre distintos componentes de la misma. Paralelamente se calculó la resistencia nominal y de diseño de dichos componentes de acuerdo con la normativa actual (CIRSOC, 2005b) y se estimó la velocidad del viento a partir de la información meteorológica disponible.

El edificio se desarrolla en un planta baja con una forma general de L, con su lado más largo orientado en dirección este – oeste, el lado más corto en dirección norte – sur y el vértice hacia el noreste.

En el lado sur del edificio se encuentran las dársenas para los ómnibus y el playón de maniobras. Las dársenas se encuentran parcialmente cubiertas por un voladizo con estructura metálica y cubierta de chapa, de 10,5 m de luz y 5 m de altura sobre el piso. Un grupo de árboles se ubica hacia el suroeste a unos 30 o 40 m. La construcción tiene un espacio cerrado para boleterías y comercios, de mampostería y hormigón, con techo en varios niveles pero en general plano (Figura 1).

Se encuentra enclavado dentro de la planta urbana, rodeado de construcciones bajas, con una plaza con arbolado denso en el frente norte. La topografía es llana y no presenta accidentes (Figura 2).

El voladizo está soportado por ménsulas de celosía cada 5,45 m, realizadas con perfiles laminados ángulo, que sostienen correas de perfiles C conformados en frío, con la cubierta colocada en posición invertida. Debajo de la misma se ubica un cielo raso de PVC con perfiles galvanizados. Las ménsulas están sostenidas por torres de celosía empotradas en las columnas de hormigón del nivel inferior. Estas sobresalen a través de un canalón de desagüe pluvial. Las ménsulas tienen 5,70 m de longitud y el cordón inferior de estas se prolonga hasta alcanzar la luz total del voladizo.

Los cordones superior e inferior de las ménsulas están formados por 2 PNL 3"x5/16" en T, mientras que las diagonales están formadas por 2 PNL 2"x1/4" en T. El cordón inferior está tomado con un tensor de Ø5/8". Las torres tienen 30 cm de lado y se forman con 4 PNL 2"x3/16" con diagonales cada 30 cm de PNL 1-1/2"x3/16 (Grupo IV CIRSOC 301-2005), excepto en la parte que está embebida en el hormigón de la columna, donde pueden verse barras de acero para hormigón ADN420 Ø12 en los lugares dañados.

Las torres presentan también dos puntales PNL 2"x3/16" ubicados a los lados, que se apoyan simplemente al fondo del canalón, con una longitud total de 2,28 m.

Las correas PC100x50x15x2 se vinculan a la parte inferior de la T invertida del cordón inferior.

El conjunto se completa con tensores en forma de cruces de San Andrés entre cada ménsula, en el plano de la cubierta, formados por barras Ø1/2".

La falla se produjo por pandeo local de los cordones de las torres y pandeo de los puntales.



Figura 1: Vista de la cubierta dañada.



Figura 2: Ubicación y dirección aproximada del viento.

2 METODOLOGÍA

Se realizó la simulación computacional del problema antes descrito, para lo cual se empleó el código de elementos finitos Tdyn (<http://www.compassis.com>), el cual resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes que gobiernan el problema en régimen incompresible.

Debido a que los problemas de acción del viento sobre estructuras están siempre caracterizados un número de Reynolds muy elevado es necesario tratar el fenómeno de la turbulencia para conseguir resultados adecuados. Existen varias formas de hacerlo, pero para el estado del arte actual la simulación de grandes vórtices (LES, por *large eddy simulation*) (Sagaut, 2004) resulta un compromiso conveniente entre demanda de poder de cómputo y objetivo del estudio.

Para este trabajo se generó un dominio de sección rectangular, representando dentro del mismo la geometría del edificio completo.

Se aplicaron condiciones de contorno para reproducir las características del viento natural en la capa límite atmosférica, para una situación de vientos extremos en atmósfera en

estabilidad neutra, como los que corresponden los sistemas meteorológicos denominados EPS (*extended pressure systems*). Este tipo de flujos están bien estudiados y existen modelos aceptados para representar el perfil de velocidades medias, las características de la turbulencia, etc. (Davenport, 1961; Harris, 1970) los cuales se adoptan para los ensayos en túneles de viento (Cook, 1978; Counihan, 1969) y que en líneas generales se tratan de reproducir en las simulaciones computacionales (Balbastro y Sonzogni, 2007). Si bien el fenómeno que se produjo durante el evento analizado no se caracteriza como EPS, a falta de datos específicos del perfil de velocidades del evento analizado se mantuvo el mismo tipo de condiciones de contorno.

3 RESULTADOS

Se realizaron siete simulaciones del edificio completo que tuvieron por finalidad evaluar el comportamiento conjunto y posibles efectos de canalización, variación de las cargas por deformaciones y el efecto que tiene sobre las cargas el hecho de que las aberturas del hall estén abiertas, generando un flujo pasante, o cerradas (Figuras 3 a 12).

El dominio de los modelos realizados representa el emplazamiento del edificio, con sus rasgos principales. Se discretizó con aproximadamente 2E6 elementos. Se aplicaron condiciones de contorno apropiadas para cumplir con los requisitos para ensayos en túnel de viento indicados por CIRSOC 102-2005, generando un perfil de velocidades e intensidad de turbulencia compatibles con la categoría de exposición B.

La orientación de los modelos con respecto a la corriente incidente se eligió de acuerdo con las consideraciones meteorológicas realizadas. Se simularon dos modelos con la cubierta en posición original, uno considerando el hall cerrado y otro con flujo pasante, representando puertas abiertas.

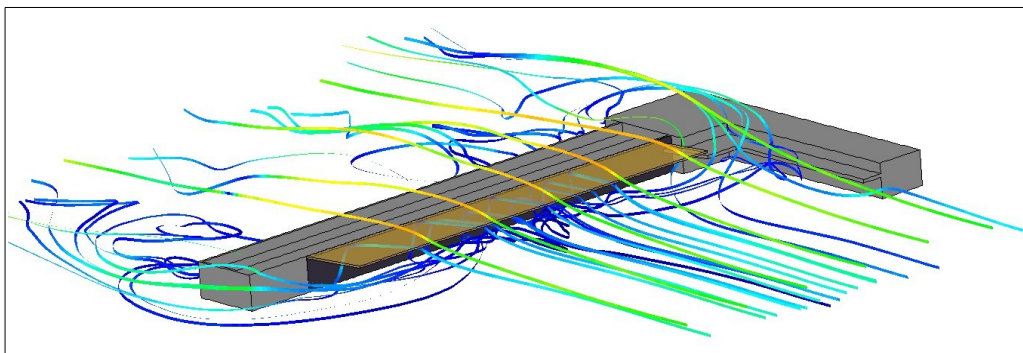


Figura 3: Modelo cerrado, alero sin deformar.

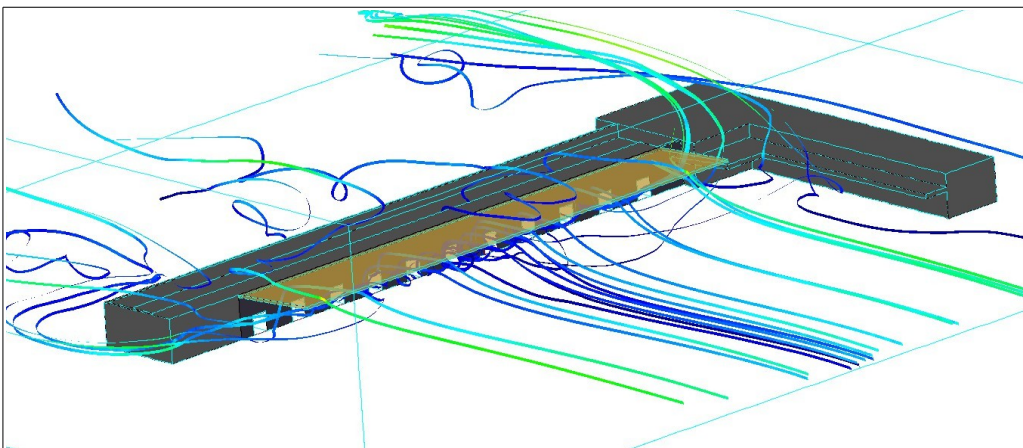


Figura 4: Modelo con aberturas, alero sin deformar.

El resto de los modelos se simularon con la cubierta a rotada hacia arriba y hacia abajo en distintos incrementos.

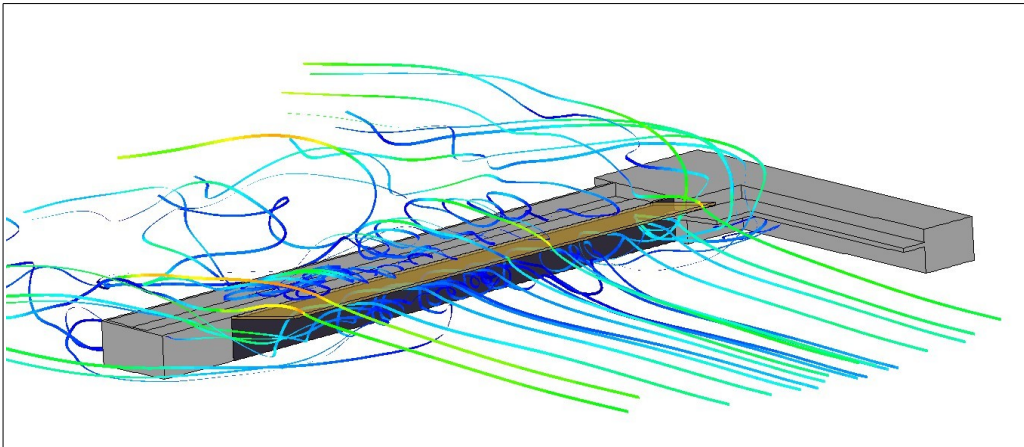


Figura 5: Alero rotado 6° hacia arriba.

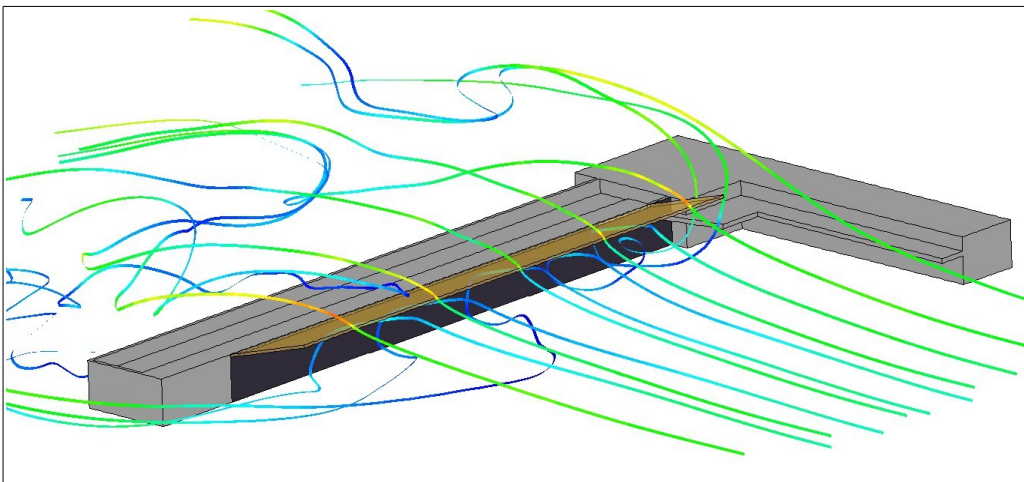


Figura 6: Alero rotado 10° hacia arriba.

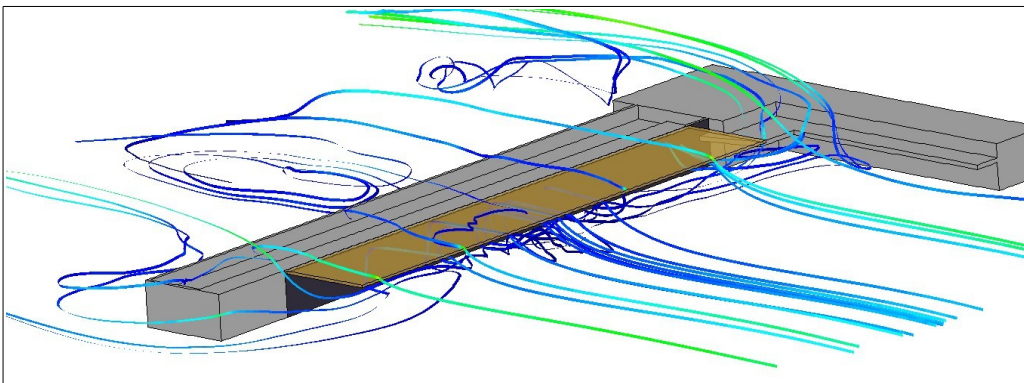


Figura 7: Alero en posición horizontal.

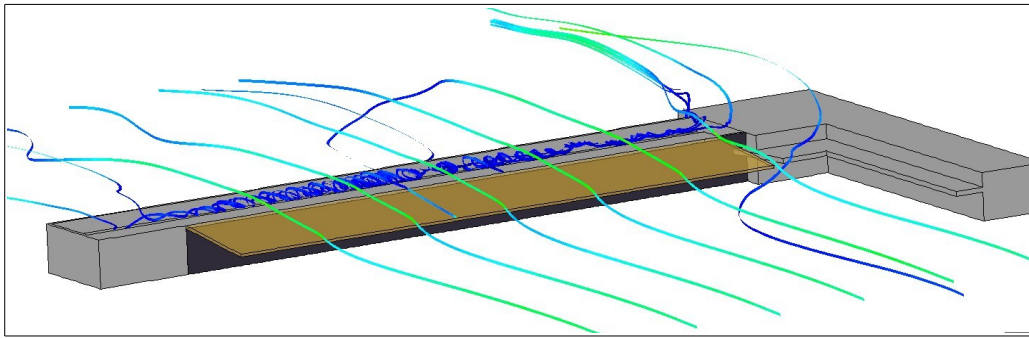


Figura 8: Alero rotado 6° hacia abajo.

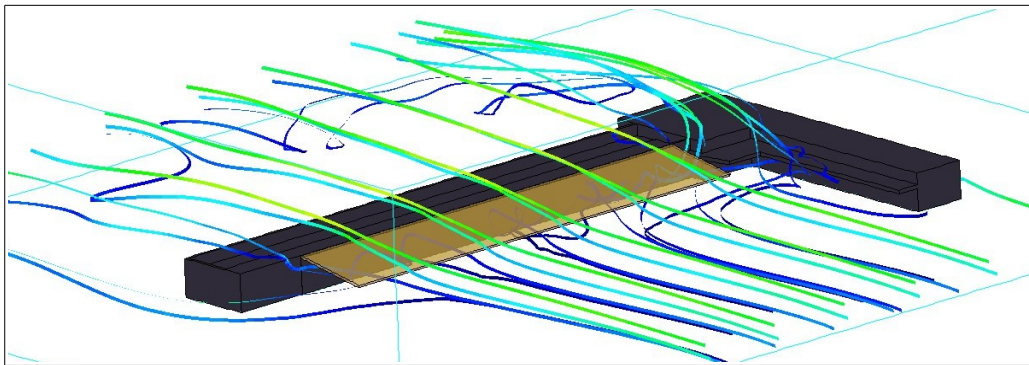


Figura 9: Alero rotado 10° hacia abajo.

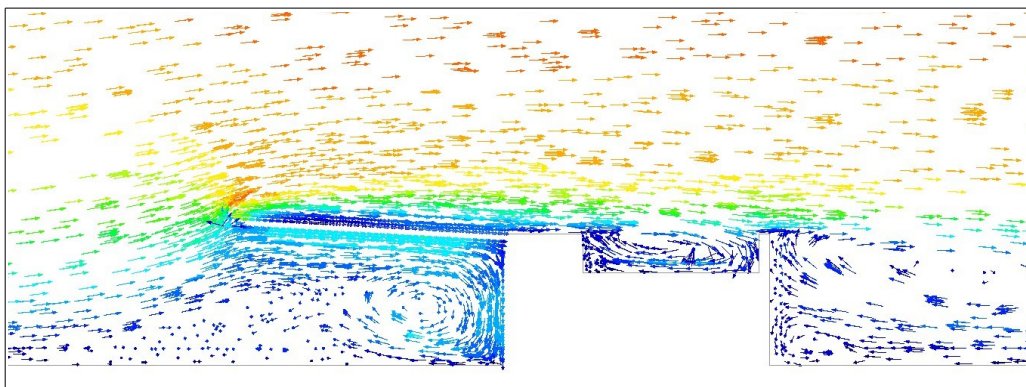


Figura 10: Velocidades, alero en posición inicial, edificio cerrado.

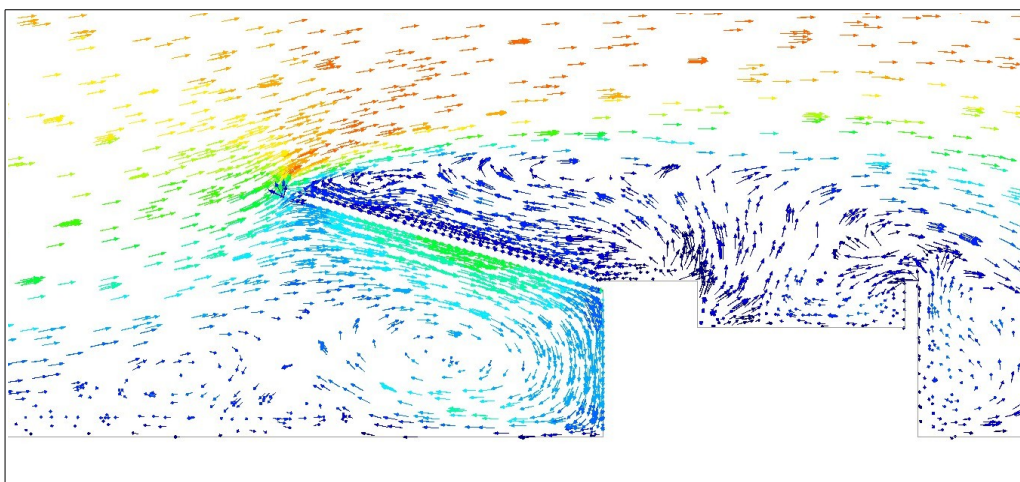


Figura 11: Velocidades, alero rotado 13° hacia arriba.

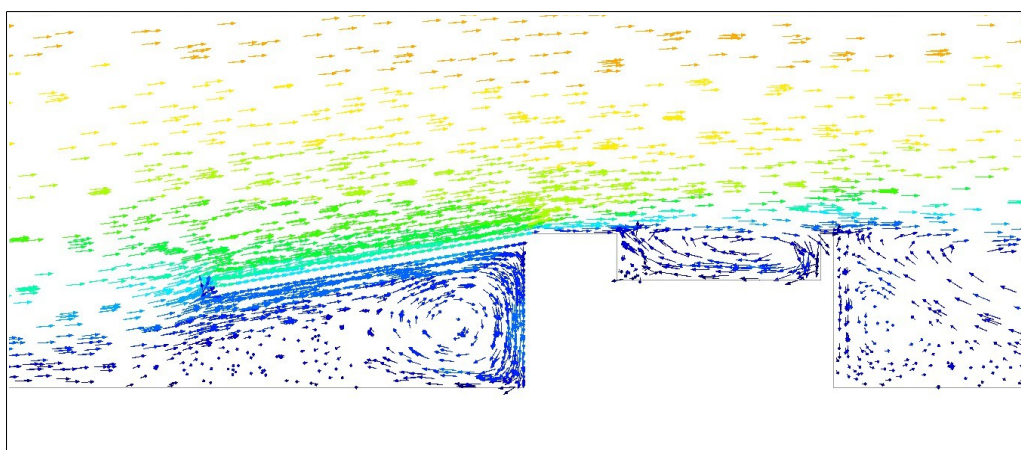


Figura 12: Velocidades, alero rotado 10° hacia abajo.

Según se puede apreciar en las Figuras 3 y 4 no existen grandes diferencias en la configuración del flujo sobre el alero, entre el modelo que considera cerrado al hall del que lo considera con aberturas. En los valores de los coeficientes aerodinámicos calculados para estos casos la diferencia es de un 2%, por lo que resulta prácticamente despreciable.

En las Figuras 13 y 14 se muestra la variación del coeficiente de sustentación, C_L , de arrastre, C_D , y del centro de presión en función de la variación de la inclinación de la cubierta.

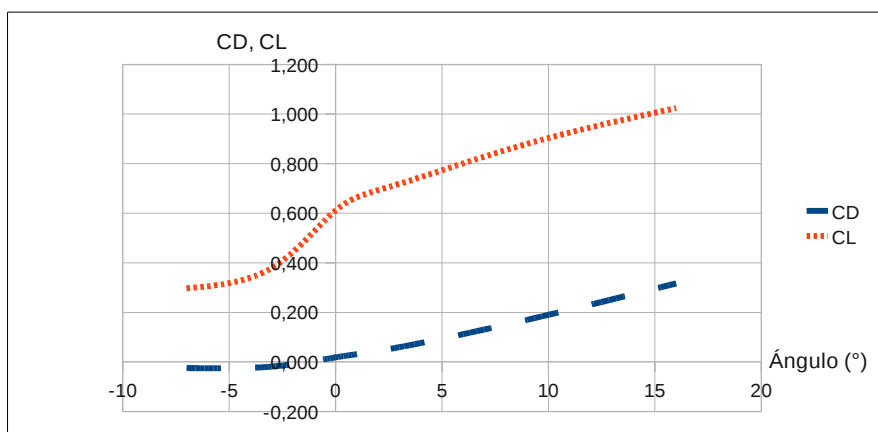


Figura 13: Coeficientes aerodinámicos en función de la inclinación.

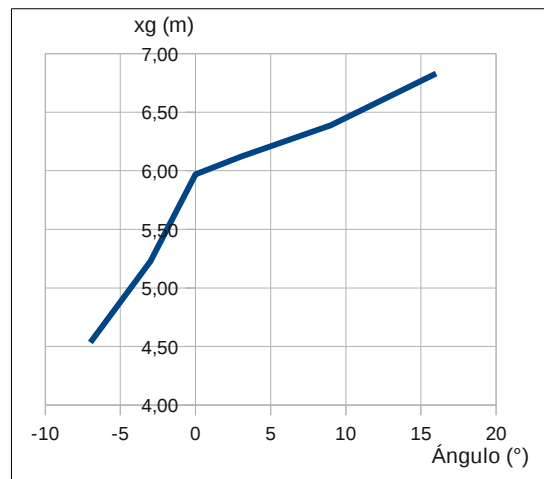


Figura 14: Posición del centro de presión desde el borde a sotavento.

En lo que respecta a la posición del centro de presión puede verse que el valor es aproximadamente igual al que surge de aplicar el reglamento para el caso de cubierta totalmente obstruida a sotavento, para las inclinaciones mayores. En cambio cuando la cubierta tiende a hundirse el centro de presión se desplaza a sotavento.

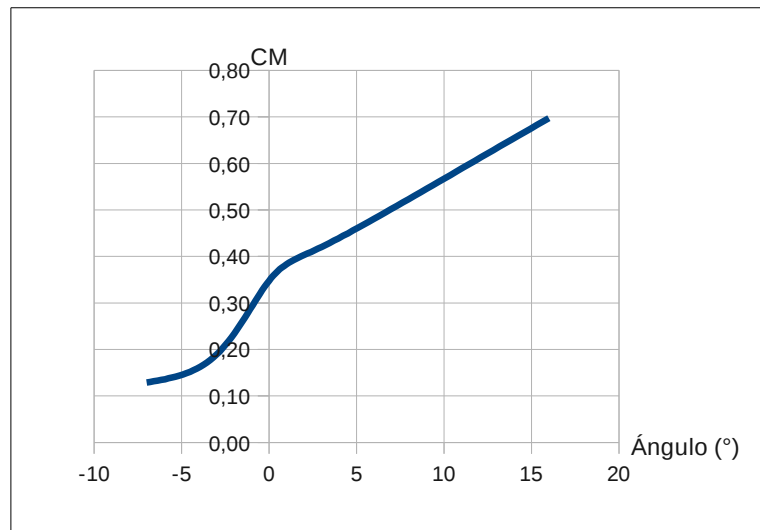


Figura 15: Coeficiente de momento en función de la inclinación.

Lo mencionado anteriormente se combina y su efecto se muestra en el coeficiente de momento (Figura 15).

Debe tenerse en cuenta que los valores indicados anteriormente están calculados para la cubierta completa. La longitud de la escala integral de turbulencia en la dirección del viento L_{11} es del orden 100 m (CIRSOC 102-2005; Blessmann, 1995). En la dirección transversal la escala es del orden $L_{12} \approx 0,3 L_{11}$, es decir, aproximadamente 30 m. Teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura, lo anterior implica que por lo general una ráfaga no afectará simultáneamente y en forma uniforme a todo el alero, sino que lo hará con mayor intensidad en una parte del mismo.

4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 El fenómeno meteorológico

De la información meteorológica disponible, a saber imágenes de sensores remotos, datos METAR, SYNOP y entrevistas en el lugar, se puede hacer la siguiente descripción.

La zona fue atravesada por una línea de inestabilidad que dio lugar a varias tormentas importantes (Figura 16). Este tipo de fenómenos suele dar origen a vientos fuertes que duran por lo general menos de una hora, con ráfagas violentas de direcciones que pueden variar. En el caso del evento analizado la velocidad media a la hora del daño (entre las 15:00 y las 16:00, aproximadamente) era de 35,2 km/h (9,8 m/s, 19 nudos) en una dirección general del oeste, con ráfagas que giraron hacia el sur y velocidades de 88 km/h (24,5 m/s, 47 nudos). La información meteorológica disponible de las fuentes citadas está referida al aeropuerto de Reconquista, distante 7,9 km del emplazamiento de la terminal de ómnibus, aproximadamente en la misma dirección que la reportada para el viento. Si bien esta distancia está dentro del rango de escala espacial de este tipo de fenómenos meteorológicos, las velocidades y direcciones del viento en el emplazamiento de la construcción pueden haber sido diferentes.

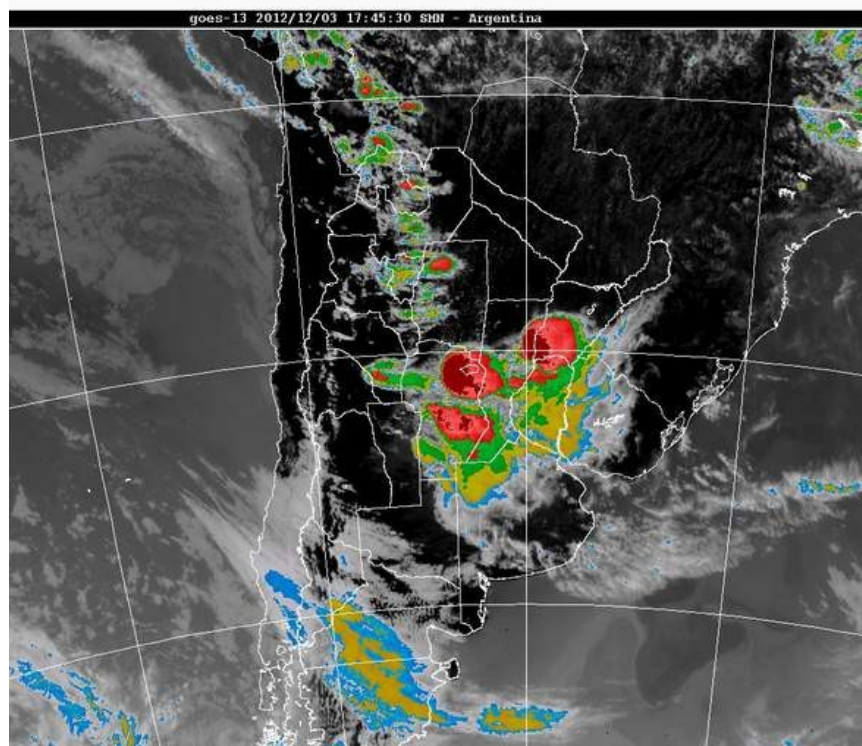


Figura 16: Temperatura de techos nubosos. Imagen GOES 13. Fuente SMN.

4.2 Las cargas de colapso de la estructura

Considerando la hipótesis de fenómeno cuasi-estático (Simiu y Scanlan, 1978), se aplicaron las cargas que surgen de las simulaciones computacionales realizadas para una velocidad estimada a partir de los datos meteorológicos en 24,5 m/s, al modelo de elementos finitos de la estructura. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

En la misma se puede apreciar que las cargas asociadas a una velocidad de viento como la registrada en los datos meteorológicos disponibles, incidiendo en forma normal al lado mayor del alero, solicitan los elementos estructurales analizados a valores cercanos o superiores a la resistencia nominal y de diseño.

Tabla 1: Esfuerzo para ELU, resistencia nominal y de diseño. Estado de verificación de cada elemento.

ELEMENTO	SECCIÓN	ELU	S_u	UNIDAD	R_d	S_d/R_d	S_d/R_n	ESTADO	OBSERVACIONES
Cordón inferior ménsulas (tramo volado-atirantado)	2 PNL 3"x5/16"	U_1	-10,66	kNm	-5,0	214%	192%	M.C.	El tensor no colabora en este ELU
Cordón inferior ménsulas (tramo volado-atirantado)	2 PNL 3"x5/16"	U_2	5,04	kNm	7,5	67%	61%	B.C.	
Puntal torre (cada uno)	PNL 2"x3/16"	U_1	0	kN	99,8	0%	0%	B.C.	El puntal tiende a levantarse.
Puntal torre (cada uno)	PNL 2"x3/16"	U_2	-26,56	kN	-12,5	213%	181%	M.C.	$k L / r = 236 > 200$
Cordón de la torre, lado alero	PNL 2"x3/16"	U_1	87,5	kN	99,8	88%	79%	B.C.	El puntal tiende a levantarse
Cordón de la torre, lado alero	PNL 2"x3/16"	U_2	-71,57	kN	-89,9	80%	68%	B.C.	El puntal falla antes, por lo que S_u es mayor que el indicado
Cordón de la torre, lado exterior	PNL 2"x3/16"	U_1	-70,97	kN	-89,9	79%	67%	B.C.	El puntal tiende a levantarse
Cordón de la torre, lado exterior	PNL 2"x3/16"	U_2	120,14	kN	99,8	120%	108%	M.C.	El puntal falla antes, por lo que S_u es mayor que el indicado

Si se tiene en cuenta que las presiones varían con el cuadrado de la velocidad, un aumento del 10% a un 15% en la velocidad produce esfuerzos un 21% a 32% mayores, con lo que prácticamente todos los elementos alcanzarían o superarían la resistencia nominal. Debido al método que se empleó para estimar la velocidad del viento durante el evento, incertidumbres de este orden son razonables.

Otro efecto a tener en cuenta es que a medida que un componente alcanza la falla, comienzan a sobrecargarse otros, tal es el caso de los cordones de las torres cuando el puntal se despega, vuelve a asentarse y se hunde en el desagüe o bien padea.

Considerando el rango de direcciones posibles para la ráfaga, puede haberse dado también el efecto de los obstáculos a barlovento que se mencionó en el párrafo anterior.

Por lo tanto, parece razonable suponer que la velocidad del viento que provocó el colapso estuvo en torno a los 25 m/s.

5 CONCLUSIONES

Se estudiaron las cargas debidas al viento en una estructura colapsada durante una tormenta.

Los valores de carga encontrados mediante las simulaciones realizadas considerando velocidades de viento compatibles con los datos meteorológicos disponibles, al ser aplicados sobre la estructura producen esfuerzos en varios elementos de la estructura cercanos o superiores a las resistencias nominales calculadas de acuerdo con el reglamento específico.

Lo anterior muestra a la herramienta computacional empleada como un procedimiento idóneo para evaluar este tipo de situaciones.

6 AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo se recibió apoyo del PICTO-UNNE 187/2011.

REFERENCIAS

- Balbastro, G., *Coeficientes de presión en cubiertas abovedadas aisladas sometidas a la acción del viento*. Tesis de doctorado. Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, 2009.
- Balbastro, G., y V. Sonzogni V., Simulación de un ensayo en túnel de viento aplicando CFD. *Mecánica Computacional XXVI*, pp. 3779-3787, Proc. ENIEF 2007.
- Balbastro, G., y V. Sonzogni, V., Uso de CFD para estudio de presiones del viento en cubiertas curvas aisladas. *Rev. Int. Met. Num. Cál. Dis. Ing.* Artículo aceptado, a publicarse en Vol. 28, N°1, 2012.
- Blessmann, J. *O vento na engenharia estrutural*. UFRGS, Porto Alegre, 1995.
- CIRSOC, *Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones CIRSOC 102*. INTI. Buenos Aires, 2005.

- CIRSOC, *Reglamento Argentino de estructuras de acero para edificios CIRSOC 301*. INTI. Buenos Aires, 2005.
- Cook, N., Wind tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods, *J. Wind Eng. Ind. Aer.* 3:157-176, 1978.
- Counihan, J., An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, *Atmos. Environ.* 3:197-214, 1969.
- Davenport, A., The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, London, v.87, n.372:194-211, 1961.
- Harris, I., The nature of the wind. In: *Modern design of wind sensitive structures*, London, Construction Industry Research and Information Association, paper 3:29-55, 1970.
- Sagaut, P., *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*. 2nd ed. Springer, Berlín, 2004.
- Simiu, E.; Scanlan, R. *Wind effects on structures: An introduction to wind engineering*. Wiley, New York, 1978