

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.39.2.725.4>

Estudio comparativo de coeficientes de presión normativos y experimentales en cubiertas de naves industriales

Comparative Study of Experimental and Standardized Pressure Coefficients for Industrial Roofs

MANUEL ALEJANDRO AMADOR*
INGRID FERNÁNDEZ LORENZO**
ALEJANDRO LÓPEZ LLANUSA***
VIVIAN BEATRIZ ELENA PARNÁS****

*Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Instructor. Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.
La Habana, Cuba.
Orcid:0000-0002-0651-5529. malejandroan@civil.cujae.edu.cu. Ingeniero civil.

**Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Profesora auxiliar. Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.
La Habana, Cuba. ingridfl@civil.cujae.edu.cu. Doctora en Ciencias
Orcid: 0000-0002-1223-0968.

***Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Profesor auxiliar. Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.
La Habana, Cuba.
Orcid: 0000-0002-9938-837X. alo@civil.cujae.edu.cu. Doctor en Ciencias.

****Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).
Profesora titular. Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.
La Habana, Cuba.
Orcid:0000-0001-7912-7570. vivian@civil.cujae.edu.cu. Doctora en Ciencias.

Correspondencia: Manuel Alejandro Amador Núñez.
Calle 114 entre Rotonda y Ciclovía, Marianao, La Habana, Cuba.
+5372663814.



Resumen

Todos los años ocurren fallas en cubiertas de edificaciones bajas debido a la acción de los vientos. Algunos investigadores opinan que estas pérdidas pudieran ser ocasionadas por insuficiencias en las normativas para el cálculo de las edificaciones ante este tipo de cargas. En este artículo se comparan los coeficientes de presión de las cubiertas de varias edificaciones bajas que han sido ensayadas tanto en túneles de viento como por métodos numéricos (modelación computacional de fluidos) por diversos investigadores, con los coeficientes que resultarían de aplicar el Eurocódigo EN1991-1-4 sobre esas mismas estructuras. Esta investigación tiene el propósito de identificar las posibles discrepancias entre el Eurocódigo EN1991-1-4 y los ensayos experimentales, como consecuencia de la no consideración de las variaciones de la intensidad de turbulencia y de la inclinación de la cubierta en la obtención de los coeficientes de presión en la normativa. Del análisis de resultados se obtuvo que la aplicación del Eurocódigo EN1991-1-4 conduce a la subestimación de la carga de viento en la mayor parte de la cubierta, mientras que en la esquina correspondiente al borde de ataque del viento, la carga obtenida es mayor que la resultante de los ensayos.

Palabras clave: cargas de viento, coeficientes de presión, cubiertas, estructuras bajas.

Abstract

Every year, failures in the roofs of low buildings due to wind action occur. Some researchers believe that these losses could be caused by inadequacies in the regulations for buildings design under this type of loads. This article compares the pressure coefficients of roofs of various low buildings that have been tested, both in wind tunnels and by numerical methods (computational fluid modeling), by various researchers, with the coefficients result from applying the Eurocode EN1991-1-4 on those structures. The purpose of this investigation is to identify possible discrepancies between the Eurocode EN1991-1-4 and the experimental tests, as a consequence of neglecting the variations in the intensity of turbulence and the roof slope in obtaining the pressure coefficients. From the analysis of results, it was found that the application of Eurocode EN1991-1-4 leads to an underestimation of the wind load in most of the roof, while in the corner corresponding to the leading edge of the wind, the load obtained is greater than that resulting from tests.

Keywords: low structures, roofs, pressure coefficients, wind loads.

1. INTRODUCCIÓN

La acción de vientos extremos sobre las edificaciones bajas causa grandes pérdidas económicas todos los años. Estas construcciones son precisamente las que más abundan en el planeta y tienen como característica principal su baja elevación (menor que 18 m y en ningún caso mayor que ninguna de las dimensiones horizontales de la estructura) [1]. Las cubiertas son los elementos más estudiados de estas edificaciones, debido a los altos índices de colapsos parciales o totales ante la ocurrencia de vientos extremos.

La forma en la que se comporta el viento al interactuar con las cubiertas de las edificaciones bajas por lo general tiende a pasar por un proceso de separación y readhesión del flujo en la superficie, cuya magnitud depende de los valores de intensidad de turbulencia [12]. Varios estudios [2]-[4] que han analizado este fenómeno para diferentes valores de intensidad de turbulencia identificaron variaciones notables en la ubicación de la fluctuación máxima de presión a lo largo de la cubierta. Generalmente, con el aumento de la intensidad de turbulencia disminuye el tamaño de la zona de separación. Otras investigaciones [5]-[7] han analizado el comportamiento de la zona de separación cuando existe un aumento en la inclinación de la cubierta para las direcciones del viento ortogonales a la edificación. Los resultados demostraron mayores variaciones en los coeficientes de presión para la dirección del viento perpendicular a la línea cumbre de la cubierta. Los autores concluyeron que con el aumento de la inclinación de la cubierta se genera una disminución en el tamaño de la zona de separación, que puede llegar a desaparecer en casos en los que sea muy pronunciada la pendiente. El fenómeno descrito tiene una fuerte incidencia en la determinación de los coeficientes de presión externa del viento, y repercute en que las distintas superficies no presenten una distribución de presión uniforme. Estas consideraciones no siempre se tienen en cuenta en las normativas de acción del viento sobre las estructuras, y según planteamientos como los de Hoxey *et al.* [8], varios de los fallos que se registran en estas edificaciones pudieran estar asociados a insuficiencias de las normas existentes.

Hoxey *et al.* [8] estudiaron edificaciones bajas con cubiertas a dos aguas e inclinaciones de 14° y 26° mediante la modelación computacional de fluidos (CFD, siglas en inglés) y ensayos a escala real y concluyeron que los cambios de presión que ocurrieron sobre las superficies debido a las variaciones geométricas (alto, ancho, longitud, pendiente de la cubierta) no se recogen de una forma adecuada en los códigos, siendo necesario incluir distribuciones de presiones no uniformes sobre la cubierta. Gierson, Phillips y Duthinh [9] también enmarcaron sus estudios en la comparación de las presiones de viento obtenidas sobre cubiertas de edificaciones bajas, mediante ensayos experimentales con los coeficientes de presiones normativos. Los investigadores [9] realizaron un procedimiento para analizar la base de datos aerodinámica para estructuras bajas estudiadas en el túnel de viento de la Universidad Politécnica de Tokio con el fin de evaluar la per-

tinencia de los coeficientes de presión de la norma americana ASCE 7-10 [1]. El análisis mostró que los coeficientes de presión propuestos por la ASCE 7-10 fueron más bajos que los obtenidos por la base de datos, y concluyeron que estas especificaciones necesitaban ser actualizadas. Fouad, Mahmoud y Nasr [10] también compararon los coeficientes de la ASCE 7-10 con modelaciones de varias estructuras realizadas, pero en este caso con técnicas numéricas (CFD), y además incorporaron al análisis al Eurocódigo EN1991-1-4 [11]. Para cubiertas a dos aguas, la comparación de los resultados mostró que para las direcciones de viento estudiadas, la norma ASCE 7-10 presentó un mejor ajuste en los valores de los coeficientes con relación a la modelación computacional con diferencias inferiores al 10 %, mientras que para el Eurocódigo las variaciones llegaron a ser mayores que el 20 % en función de la inclinación de la cubierta.

Una de las diferencias importantes entre los estudios experimentales y las normas es la interpretación de la zonificación que emplea cada uno de los códigos para la determinación de los coeficientes de presión. En algunas normas no se presenta una marcada discretización de áreas en las cubiertas para la identificación de los coeficientes de presión; entre estas destacan la norma cubana NC-285 [12], la norma internacional ISO-4354 [13] y la de Australia y Nueva Zelanda AS/NZS 1170.2-2011 [14]. En otros códigos, como la norma japonesa AIJ [15], se aprecia que la superficie de cubierta situada a barlovento presenta una división en franjas paralelas a la dirección del viento y el en Eurocódigo EN 1991-1-4 [11] existe una distribución para ambas superficies de cubierta, en este caso, franjas perpendiculares a la dirección de ataque del viento. De las normas anteriormente mencionadas, el Eurocódigo EN1991-1-4 [11] es la que mayor semejanza tiene en cuanto a la regionalización de la cubierta y la burbuja de separación descrita por Holmes [16]; sin embargo, los coeficientes obtenidos forman parte de un análisis para un flujo estandarizado del viento, con bajos valores de intensidad de turbulencia y la distribución que se propone no varía cuando se modifican las pendientes de las cubiertas. Es por esto que esta investigación se enfoca en la comparación de los coeficientes de presión derivados de diversos estudios experimentales realizados con túneles o CFD, en cubiertas a dos aguas de edificaciones bajas con inclinaciones de cubierta y valores de intensidad de turbulencia variables, con los coeficientes que resultarían de aplicar el Eurocódigo EN1991-1-4, sobre esas estructuras ensayadas experimentalmente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar la pertinencia de los valores normativos de los coeficientes de presión de las cubiertas de edificaciones bajas del Eurocódigo EN1991-1-4 con relación a la variación de la inclinación de las pendientes de la cubierta y los valores de intensidad de turbulencia, se seleccionaron los resultados de varias investigaciones

[2],[4],[7],[10],[17]-[19] realizadas sobre 7 naves con cubiertas simétricas a dos aguas mediante el empleo de túneles de viento de capa límite atmosférica o CFD.

Estudio de las variaciones de la intensidad de turbulencia

Para este análisis fueron empleadas las investigaciones realizadas por Fernández-Cabán y Masters [2], Murad Aldoum [4] y Halil Zeyrek [17]. Estos autores determinaron los coeficientes de presión generados con varios valores de intensidad de turbulencia. Para el propósito de este trabajo se identificaron las edificaciones ensayadas como (I), (II) y (III). Las cubiertas de las edificaciones (I) y (II) presentan inclinaciones menores que 5° , por lo que fueron consideradas como planas [11], mientras que la edificación (III) presenta una inclinación de 15° .

La edificación (I) corresponde al estudio en túnel de viento de Fernández-Cabán y Masters [2], que tiene unas dimensiones a escala de 70 cm de longitud, 46 cm de ancho, 20 cm de elevación de muros y cubierta a dos aguas con inclinación inferior a 5° . En el ensayo se trabajó con valores de intensidad de turbulencia de 9,0, 21,1 y 29,6 % y se estudió un ángulo de ataque del viento paralelo a la cresta de la edificación.

La edificación (II) corresponde al ensayo en túnel de viento de Murad Aldoum [4], que presenta dimensiones a escala de 29,5 cm x 29,5 cm, elevación de muros de 5 cm y $1,4^\circ$ de inclinación de cubierta, valores de intensidad de turbulencia de 20,4 y 29,8 % y analiza la dirección de viento ortogonal a la línea cumbre de la edificación.

La edificación (III) corresponde al ensayo en CFD de Halil Zeyrek [17], que presenta dimensiones de 20 m x 40 m, elevación de muros de 6 m y 15° de inclinación de cubierta, valores de intensidad de turbulencia de 13, 14 y 20 % y trabaja con una dirección del viento ortogonal a la línea cumbre de la edificación.

Las figuras 1 y 2 muestran las distribuciones de presiones medias obtenidas en los ensayos del túnel de viento para las edificaciones (I) y (II), respectivamente. La figura 3 muestra los resultados de la modelación computacional para la edificación (III).

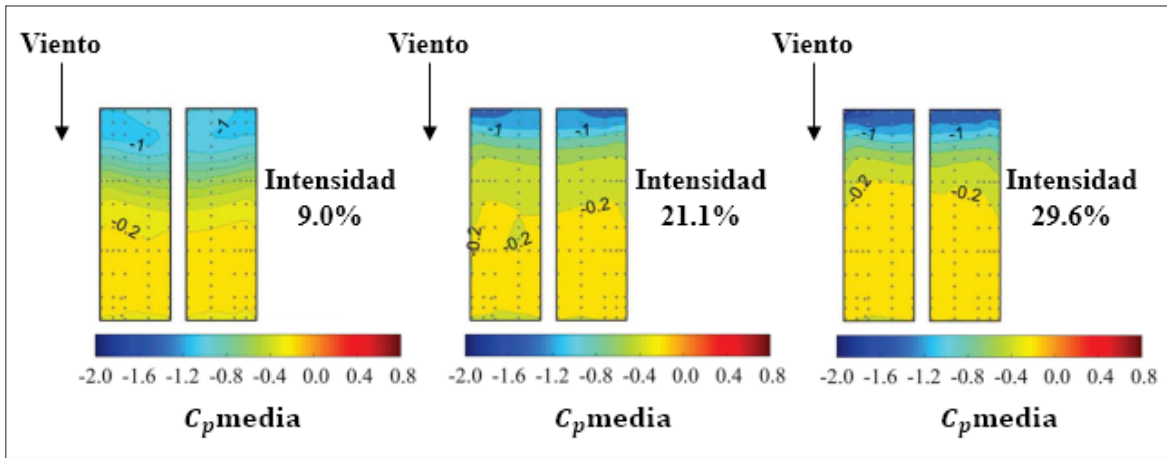


FIGURA 1. CONTORNO DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES SOBRE LA CUBIERTA DE EDIFICACIÓN (I) PARA INTENSIDADES DE TURBULENCIA DE 9,0, 21,1 Y 29,6 % [2]

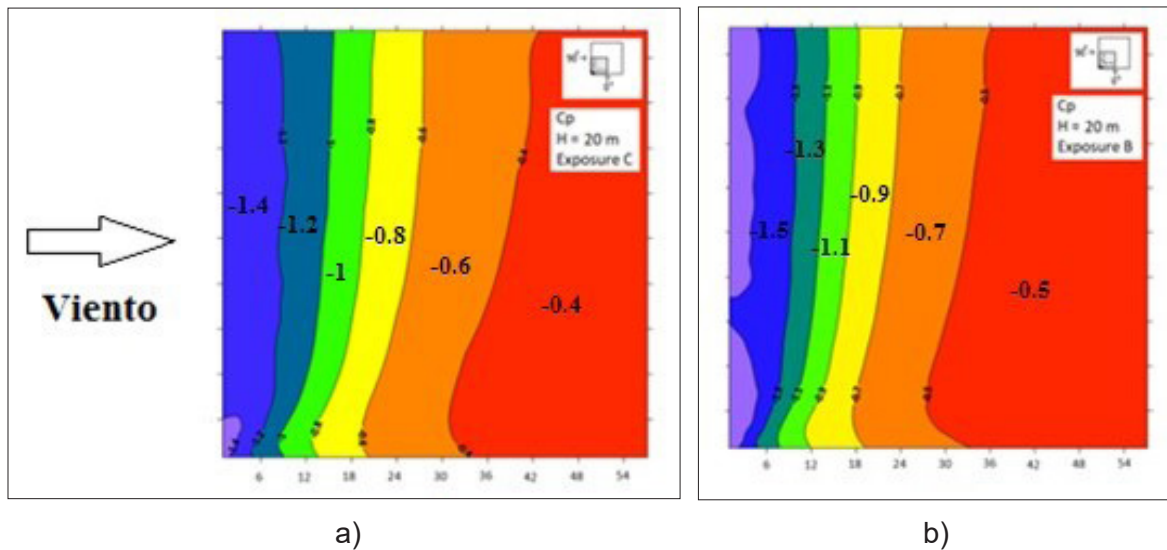


FIGURA 2. CONTORNO DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES SOBRE CUBIERTA DE EDIFICACIÓN (II), A) INTENSIDAD DE TURBULENCIA DE 20,4 %, B) INTENSIDAD DE TURBULENCIA DE 29,8 % [4].

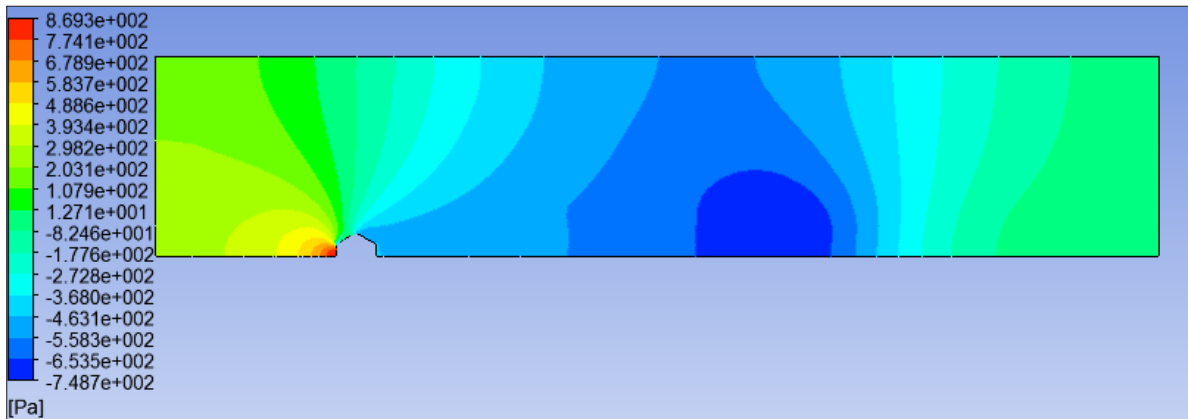


FIGURA 3. CONTORNO DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES SOBRE LA CUBIERTA DE EDIFICACIÓN (III) PARA INTENSIDAD DE TURBULENCIA DE 13 % [17]

A partir de las figuras 1 y 2 se transformaron los contornos de distribuciones de presiones en coeficientes de presión, atendiendo a la zonificación para el área de las cubiertas que se propone en el Eurocódigo EN1991-1-4 (ver figura 4). La zonificación depende de las dimensiones de cada edificación estudiada. En el caso de la figura 2 solo se muestra una sección de la cubierta ubicada a barlovento, ya que la otra mitad presenta la misma distribución. El valor del coeficiente de presión, CP , igual a $-0,5$, se extiende por toda la superficie a sotavento. Para la edificación (III) (figura 3), el autor no expone los contornos de presiones para las superficies de cubierta. Los resultados se proporcionan en tablas resúmenes que comparan las presiones obtenidas del análisis realizado con el CFD y el cálculo de aplicar directamente el Eurocódigo.

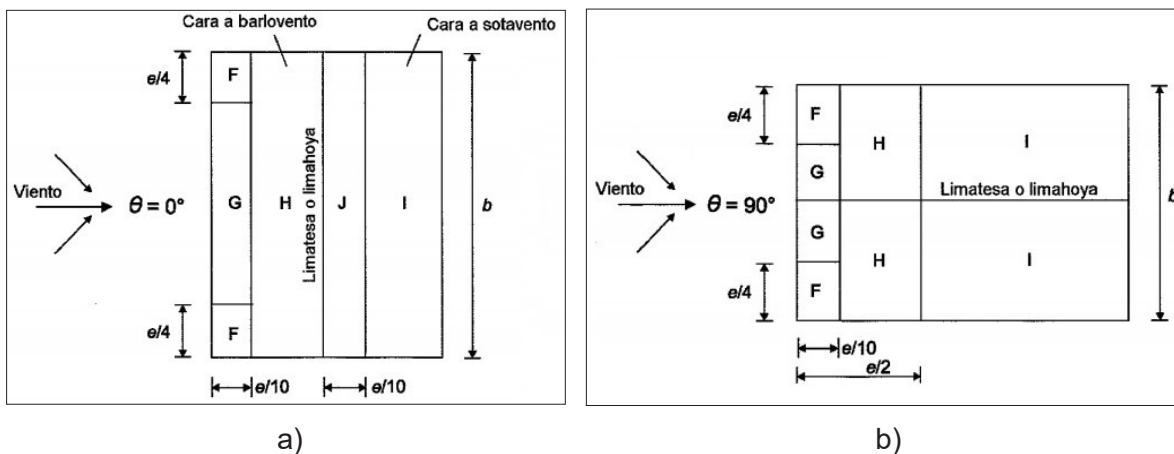


FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN: A) DIRECCIÓN DEL VIENTO 0° , B) DIRECCIÓN DEL VIENTO 90° [11]

Los coeficientes de presión para cada una de las superficies de las edificaciones (I) y (II) se calcularon mediante el método de ponderación de valores, el cual relaciona los valores de presión con el área que ocupa dentro de cada una de las superficies. Estos coeficientes se calcularon mediante la siguiente ecuación 1.

$$C_f = \frac{\sum_i^n C_p * A_i}{\sum_i^n A_i}$$

Donde C_f es el coeficiente de forma para cada área, C_p es el coeficiente de presión neto (medio) para cada área, n es el número total de valores de presión de cada área local (F, G, H, I, J) y A_i es área tributaria para cada valor de presión. Como se aprecia en la figura 4, el dimensionamiento de las superficies depende de un valor (e), que se fija como el menor valor entre la dimensión transversal al viento (b) y dos veces la altura total de la edificación (2h).

Estudio de las variaciones de pendiente

Para este estudio comparativo de las pendientes se tomaron los resultados de cuatro investigaciones [7, 10, 18, 19]. El estudio fue realizado para la dirección del viento ortogonal a la línea cumbre de la edificación para poder apreciar de mejor manera la influencia de la variación de la inclinación de la cubierta.

La edificación denotada como (IV) corresponde a la investigación de Mustafa Atmaca [7], tiene dimensiones a escala de 135 mm x 135 mm, elevación de muros de 75 mm y cubierta a dos aguas con inclinaciones de cubierta de 10, 20 y 30°. Las presiones de viento se obtuvieron mediante CFD.

Las edificaciones denotadas como (V) y (VI) se corresponden con los resultados de las investigaciones realizadas por Kyeong-seok Kwon *et al.* [18] y Rack-woo Kim *et al.* [19], respectivamente. Ambas edificaciones son iguales en dimensiones: 44m de longitud, 7 m de ancho, 2 m de elevación de muros, pero con inclinaciones de cubierta de 26 y 22°, respectivamente. Ambos autores realizaron sus ensayos en túnel de viento.

La edificación denotada como (VII) se corresponde con los resultados de la investigación realizada por Nourhan Sayed Fouad [10]. La edificación presenta planta cuadrada de 6,6 m x 6,6 m con elevación de muros de 6 m. El estudio analiza las variaciones en los coeficientes de presión para inclinaciones de 15, 30 y 45°. Los resultados fueron obtenidos mediante CFD.

Las figuras 5-8 muestran las distribuciones de presiones medias obtenidas de los ensayos para las edificaciones (IV), (V), (VI) y (VII). En la figura 5 se aprecia superpuesta, como ejemplo, la zonificación determinada para el cálculo de los coeficientes de presión de acuerdo con la ecuación 1. En la figura 5, al emplear la distribución propuesta en el Eurocódigo (figura 4), solo el área J para la inclinación de 20° (región central en azul) coincide con la zona en la cual se concentran los valores máximos. En estos casos el ancho de las franjas ($e/10$) tiene un valor a escala de 13,5 mm, y aun cuando la inclinación de la cubierta provoca un aumento de la altura total de la edificación y un cambio en la distribución de presiones, la división por áreas presenta el mismo dimensionamiento para cada una de las estructuras en cuestión. Esto ocurre debido a que la longitud perpendicular al viento (b) siempre es menor que dos veces la altura total ($2h$) y el Eurocódigo no tiene en cuenta las inclinaciones para realizar dicha división.

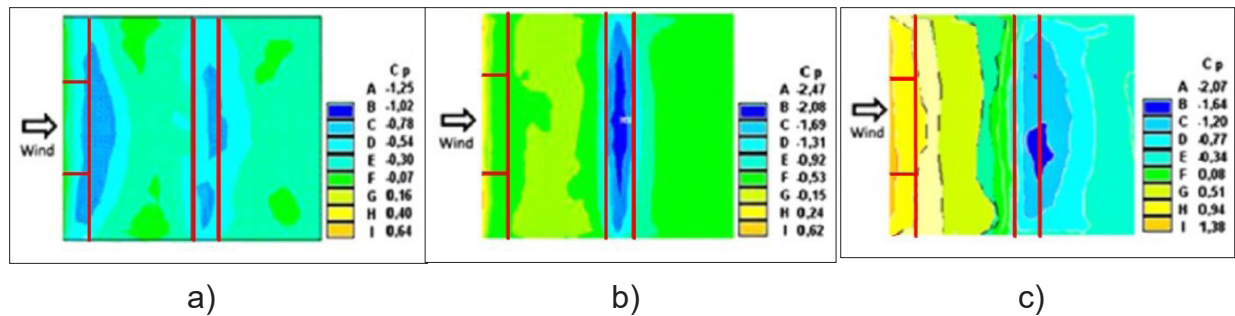


FIGURA 5. CONTORNOS DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EDIFICACIÓN (IV), A) $A = 10^\circ$, B) $A = 20^\circ$ Y C) $A = 30^\circ$ (CFD) [7]

En las figuras 6 y 7 se observa un comportamiento similar en la distribución de presiones producto de la poca diferencia existente entre las inclinaciones de ambas cubiertas (4°); sin embargo, a diferencia de la investigación anterior [7], esta variación sí produce una modificación en el dimensionamiento de las áreas que se emplean para la determinación de los coeficientes de presión, debido a que la longitud perpendicular al viento (b), en ambos casos, es mayor que dos veces la altura total ($2h$).

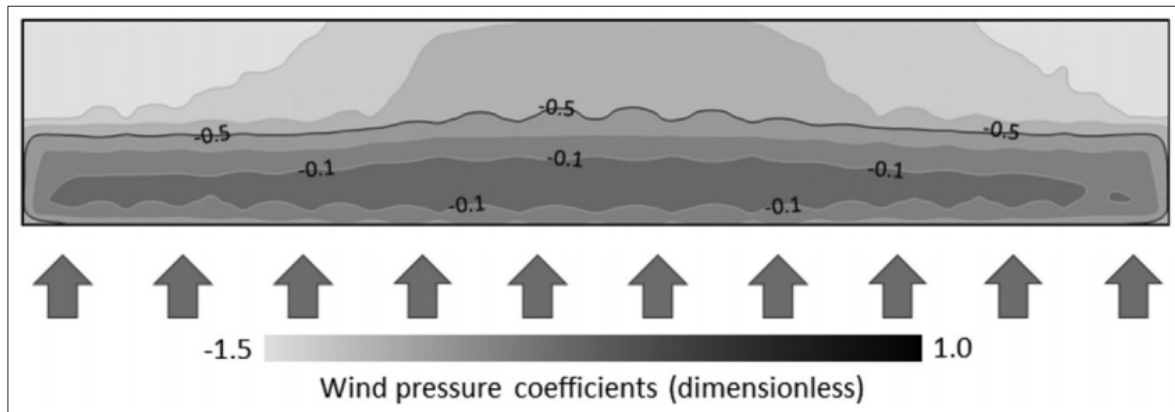


FIGURA 6. CONTORNO DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EDIFICACIÓN (V) CON CUBIERTA DE INCLINACIÓN 26° [18]

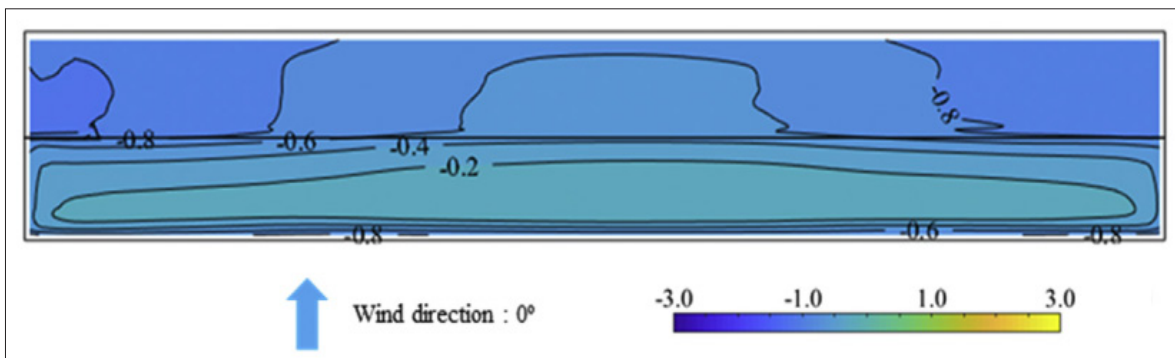
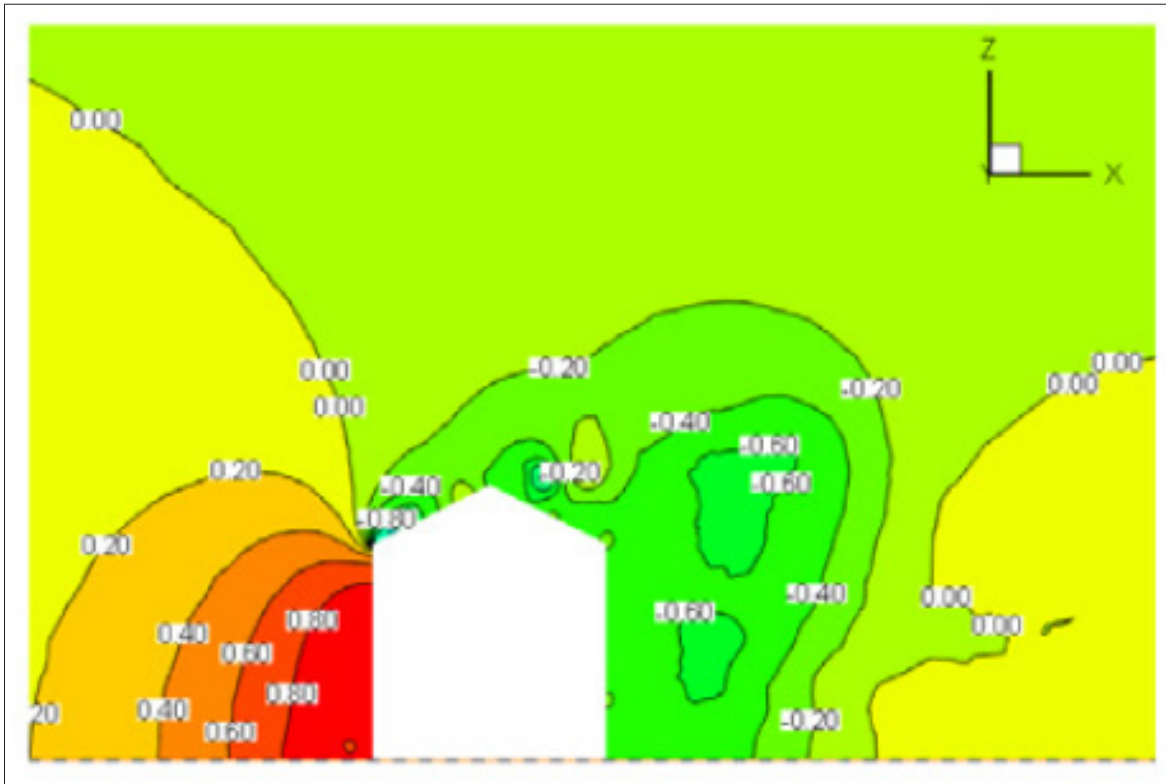


FIGURA 7. CONTORNO DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EDIFICACIÓN (VI) CON CUBIERTA DE INCLINACIÓN 22° (TÚNEL DE VIENTO) [19]

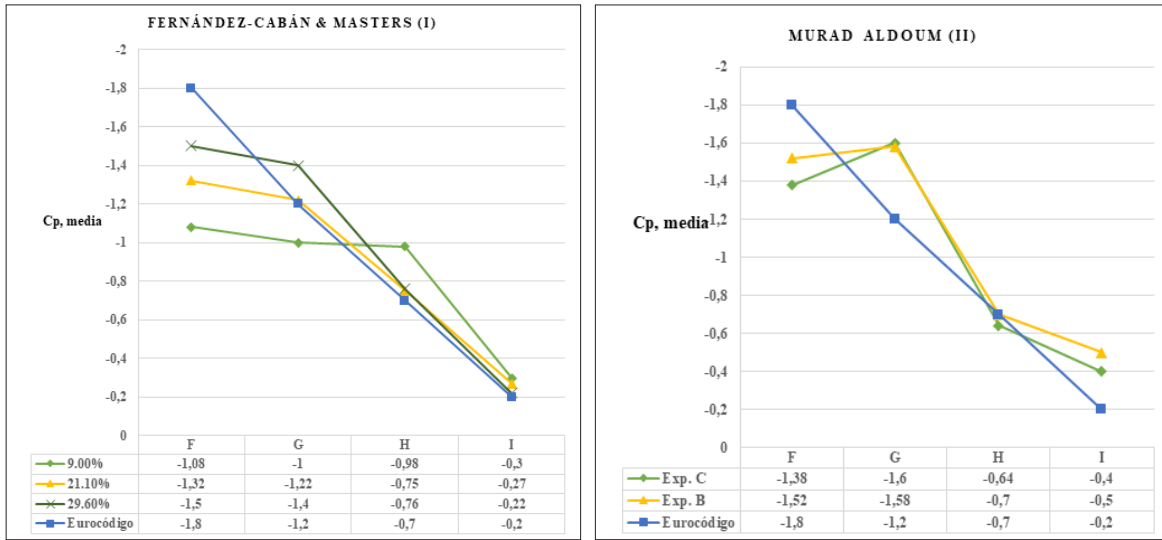
La figura 8 muestra un corte lateral de los coeficientes de presión obtenidos para la edificación (III). En este caso no es necesario realizar la ponderación por áreas, ya que el autor brinda en el informe los valores de coeficientes de presión para cada una de las superficies que propone el Eurocódigo.



**FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EDIFICACIÓN (VII),
A) $A = 15^\circ$, B) $A = 30^\circ$ Y C) $A = 45^\circ$ (CFD) [10]**

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

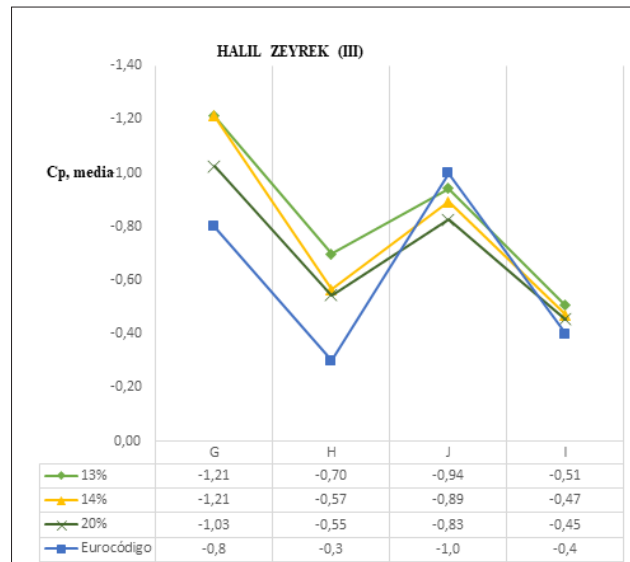
En la figura 9 se muestran los coeficientes que resultan de aplicar los procedimientos descritos anteriormente y los calculados por el Eurocódigo EN1991-1-4. Se procesaron los resultados independientes para cada uno de los valores de intensidad de turbulencia estudiados en las edificaciones (I) y (II). Los coeficientes obtenidos son todos de succión y, por tanto, negativos por convención de signos. El análisis de estas estructuras se realiza para las superficies F, G, H e I; no se analiza J, debido a que, por indicaciones de la normativa, para pendientes menores que 5° se analizan las cubiertas como planas.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 9. GRÁFICOS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN OBTENIDOS SOBRE ZONAS DE LAS CUBIERTAS

En la figura 10 se muestra la comparación de los valores de presión obtenidos para la edificación (III). Solo se muestran los valores de las superficies G, H, J e I debido a que los resultados obtenidos por el autor no abarcan la superficie F.

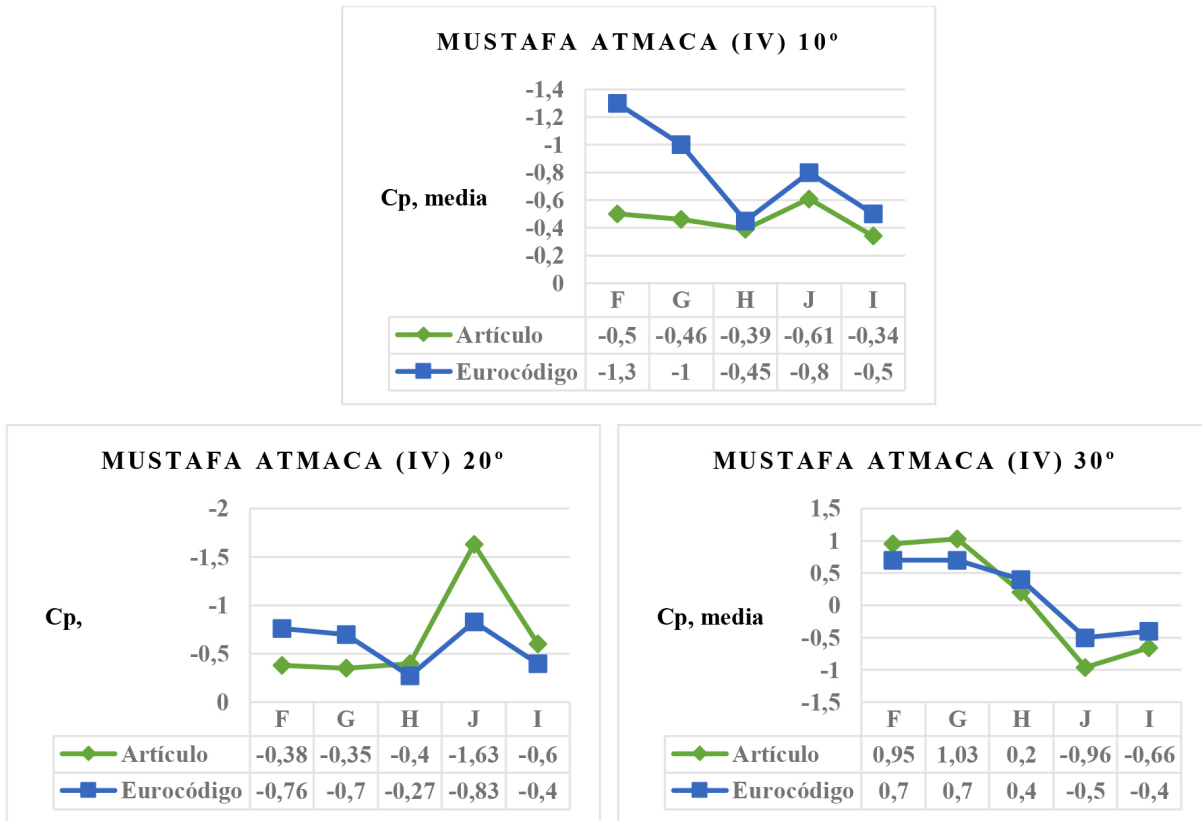


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 10. GRÁFICOS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN OBTENIDOS SOBRE ZONAS DE LAS CUBIERTAS [17]

En los casos estudiados, los resultados evidenciaron los cambios que generan las variaciones en la intensidad de turbulencia del flujo del viento en los coeficientes. Para las edificaciones (I) y (II) se observa un comportamiento más conservador en los valores propuestos por el Eurocódigo (línea azul) para la zona F, la cual se interpreta como la zona más desfavorable debido a los elevados gradientes de velocidad y turbulencia existentes. En el resto de las zonas (G, H y I), los coeficientes normativos pueden subestimar el fenómeno hasta en un 40 %. Si se observan las escalas de colores en los contornos de presiones (figuras 5,6 y 7), se aprecia que los valores mostrados son superiores a los que resultan del procesamiento de los coeficientes. Este comportamiento se debe a que la variación de la intensidad de turbulencia genera modificaciones en la distribución de los coeficientes de presión sobre la superficie de la cubierta y la zonificación propuesta por el Eurocódigo EN1991-1-4 no contempla este fenómeno. En los resultados también se observa que las variaciones de los coeficientes para las edificaciones (I) y (II) son más estables (tendencia más lineal) en toda la cubierta, lo que se fundamenta por la geometría, ya que al ser plana la cubierta existe una baja incidencia de los fenómenos turbulentos sobre la edificación. En el caso de la edificación (III) ocurre todo lo contrario, debido a que la dirección del viento sí es ortogonal a la cumbrera y la interacción viento estructura genera elevados gradientes de velocidad y turbulencia para la zona J principalmente. Para este caso, el Eurocódigo propone un valor de presión más conservador que el estudio realizado.

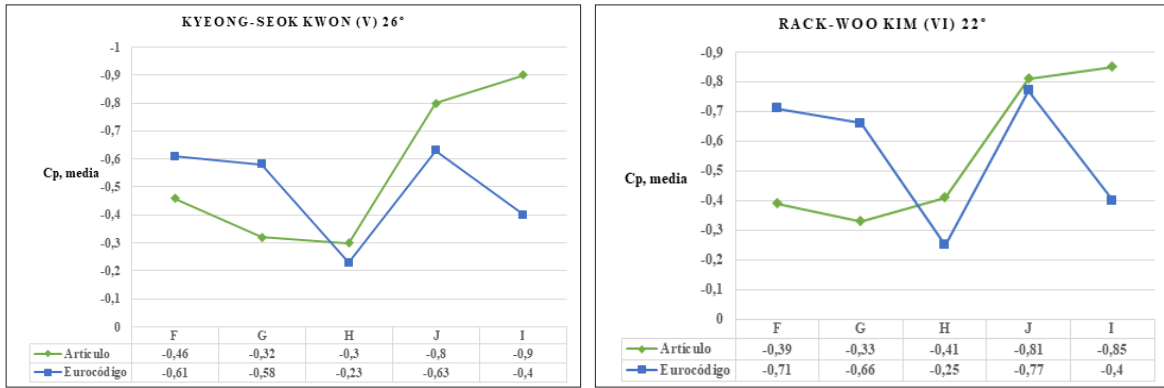
En la figura 11 se muestran los resultados de la comparación realizada para la edificación (IV). Los coeficientes de presión media obtenidos para las inclinaciones de 10 y 20° fueron de succión; en el caso de la inclinación de 30°, los valores varían de presión a succión para las zonas de cubierta ubicadas a barlovento y sotavento, respectivamente.



Fuente: elaboración propia.

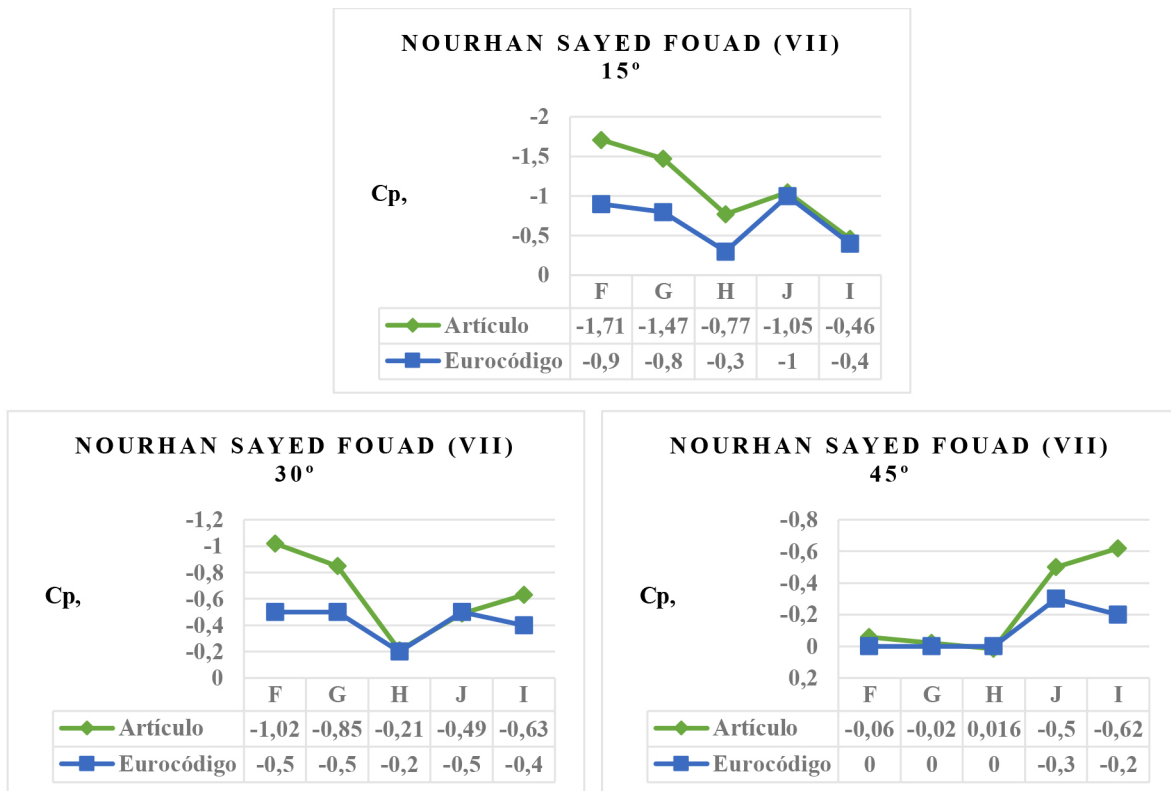
FIGURA 11. GRÁFICOS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN OBTENIDOS PARA INCLINACIONES DE 10, 20 Y 30°

En la figura 12 se muestran los resultados de los coeficientes derivados de la ponderación por zonas, obtenidos para las edificaciones (V) y (VI) y los valores propuestos por el Eurocódigo. En ambos casos los coeficientes obtenidos son todos de succión.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 12. GRÁFICOS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN OBTENIDOS PARA INCLINACIONES DE 26 Y 22°



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 13. GRÁFICOS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN OBTENIDOS PARA INCLINACIONES DE 15, 30 Y 45°

En la figura 13 se muestran los resultados de la comparación con el Eurocódigo propuestos por Nourhan Sayed Fouad [10] para la edificación (VII). En este caso no se realizó ponderación por área para la determinación de los coeficientes, ya que el autor mostraba estos resultados.

El enfoque general de las normas es obtener la carga más conservadora para estar del lado de la seguridad en los diseños; de acuerdo con las figuras 11-13, en el caso del Eurocódigo, partiendo de las características propuestas en las investigaciones analizadas, esto solo se cumple en su totalidad para la cubierta que presenta inclinación de 10° . Para esta inclinación, los valores normados se encuentran por encima de los obtenidos en la modelación. Para las restantes inclinaciones no ocurre de esta manera, pues los coeficientes experimentales pueden llegar a ser mayores que los de la norma, principalmente en las zonas J e I. Los resultados evidencian un comportamiento más conservador en el Eurocódigo para las superficies F y G en las edificaciones (IV) (inclinaciones de 10° y 20°), (V) y (VI).

Es apreciable la marcada influencia que tiene la inclinación de la cubierta en la obtención de los coeficientes de presión. A partir de los contornos de presiones de las figuras 5, 6 y 7 se puede observar cómo después de realizar el procesamiento de los coeficientes en función de las áreas, los valores medios obtenidos (ver figuras 11 y 12) son menores que los valores máximos de presión que se generan en las superficies de cubiertas. Esto es debido a que el Eurocódigo, para ambas zonas de la cubierta (barlovento y sotavento), presenta las mismas condiciones para el dimensionamiento de las áreas y no tiene en cuenta la inclinación de la cubierta en este proceso. Por tal causa, el dimensionamiento de las superficies no se ajusta de manera adecuada con las zonas en las cuales se concentran los valores más desfavorables. Las diferencias, por ende, no solo radican en un aumento global de los valores, sino que, al no realizarse un adecuado ajuste en la distribución, algunas de estas superficies pueden quedar subestimadas en el diseño.

4. CONCLUSIONES

El comportamiento del flujo del viento sobre las estructuras bajas tiene como principio la formación de una zona de separación o burbuja en la cual se encuentran las mayores fluctuaciones en los valores de los coeficientes de presión. Debido a la no uniformidad en la distribución de presiones sobre una misma superficie de cubierta, el Eurocódigo propone una zonificación por franjas que se asemeja al comportamiento que experimenta el viento para este tipo de edificaciones; sin embargo, las especificaciones para el dimensionamiento y distribución de los valores de presión para estas zonas no tiene en cuenta dos de los aspectos más influyentes sobre el viento, la intensidad de turbulencia y la inclinación de la cubierta. Varios investigadores

que han analizado este comportamiento del viento han logrado definir la influencia que generan estos aspectos tanto en los valores como en la distribución de los coeficientes de presión y concluyen que el aumento, tanto de la intensidad de turbulencia como de la inclinación de la cubierta, provoca una disminución en el tamaño de la zona de separación (burbuja).

En este estudio fueron evaluadas varias investigaciones con el fin de analizar las diferencias existentes entre los coeficientes de presión derivados de las distribuciones de presiones obtenidas experimentalmente (en túnel o CFD) sobre las cubiertas de dos aguas de edificaciones bajas y los coeficientes que se plantean en el Eurocódigo (EN1991-1-4).

Los resultados de los análisis indicaron que la intensidad de turbulencia tiene una mayor influencia en la zona más cercana al borde de ataque del viento, que es donde se generaron las mayores variaciones de los valores de coeficientes de presión; mientras que la inclinación de la cubierta influye mayoritariamente en la porción de cubierta ubicada a sotavento. Este fenómeno de la interacción del viento con la cresta de la edificación genera valores de presión negativa, que son directamente proporcionales al aumento de la inclinación de la cubierta.

De manera general, el Eurocódigo presenta resultados más conservadores para la superficie F que ocupa la esquina de la estructura en el borde de ataque del viento, mientras que para el resto de las superficies ocurre lo contrario. Las diferencias en estas superficies indican que para determinadas condiciones atmosféricas o características geométricas de la edificación los valores propuestos por el Eurocódigo subestiman la influencia del viento y no están del lado de la seguridad en el diseño. La mayoría de los casos estudiados no solo se ven afectados por un aumento en los valores de presión, sino que al variar tanto la intensidad de turbulencia como la inclinación de la cubierta se modifica la distribución de presiones en las superficies.

REFERENCIAS

- [1] *American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, 2010.
- [2] P. L. Fernández-Cabán y F. J. Masters, “Effects of freestream turbulence on the pressure acting on a low-rise building roof in the separated flow region”, *Frontiers in Built Environment*, vol. 4, p. 17, 2018. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00017>
- [3] A. F. Akon y G. A. Kopp, “Mean pressure distributions and reattachment lengths for roof-separation bubbles on low-rise buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 155, pp. 115-125, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.05.008>

- [4] M. Aldoum, “Wind Loads on Low-slope Roofs of Low-rise and Mid-rise Buildings with Large Plan Dimensions”, Concordia University, 2018.
- [5] D. Prasad, T. Uliate y M. R. Ahmed, “Wind loads on low-rise building models with different roof configurations”, *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 36, n.º 3, 2009. <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.v36.i3.30>
- [6] F. Xing, D. Mohotti y K. Chauhan, “Study on localised wind pressure development in gable roof buildings having different roof pitches with experiments, RANS and LES simulation models”, *Building and Environment*, vol. 143, pp. 240-257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.026>
- [7] M. Atmaca, “Wind Tunnel Experiments and CFD Simulations for Gable-Roof Buildings with Different Roof Slopes”, *Acta Physica Polonica, A.*, vol. 135, n.º 4, 2019. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.135.690>
- [8] R. Hoxey, A. Robertson, B. Basara y B. Younis, “Geometric parameters that affect wind loads on low-rise buildings: full-scale and CFD experiments”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 50, pp. 243-252, 1993. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90079-4](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90079-4)
- [9] M. Gierson, B. Phillips y D. Duthinh, “Evaluation of ASCE 7-10 wind velocity pressure coefficients on the components and cladding of low-rise buildings using recent wind tunnel testing data”, in *6th Int. Conf. on Advances in Experimental Structural Engineering*, 2015.
- [10] N. S. Fouad, G. H. Mahmoud, and N. E. Nasr, “Comparative study of international codes wind loads and CFD results for low rise buildings”, *Alexandria engineering journal*, vol. 57, n.º 4, pp. 3623-3639, 2017.
- [11] *European Committee for Standardization: Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions*, 2004.
- [12] *Carga de viento. Método de cálculo*, 2003.
- [13] *Wind action on structures*, 2009.
- [14] *Australian/New Zeland Standart: Structural Design actions. Part 2: Wind Actions*, 2011.
- [15] *Architectural Institute of Japan. RLB Recommendations for loads on buildings. Structural Standards Committee*, 2004.
- [16] J. D. Holmes, *Wind loading of structures*. New York: T.F. e-Library, 2007.
- [17] H. Zeyrek y S. Bekiroğlu, “Assessment of wind pressure by eurocode-1, ts 498 and cfd analyses for double-sloped roof building,” *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2019.

- [18] K.-s. Kwon, D.-w. Kim, R.-w. Kim, T. Ha y I.-b. Lee, “Evaluation of wind pressure coefficients of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land using a large-sized wind tunnel”, *Biosystems Engineering*, vol. 141, pp. 58-81, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.007>
- [19] R.-w. Kim, I.-b. Lee, U.-h. Yeo y S.-y. Lee, “Estimating the wind pressure coefficient for single-span greenhouses using an large eddy simulation turbulence model”, *Biosystems Engineering*, vol. 188, pp. 114-135, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.009>