Validación del modelo en CFD de una nave ante cargas de viento con análisis estacionario

Rigoberto Morales Hernández E-MAIL: rigobermorher@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Manuel Alejandro Amador Núñez E-MAIL: malejandroan@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Ingrid Fernández Lorenzo E-MAIL: ngridfl@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Vivian Beatriz Elena Parnás E-MAIL: vivian@civil.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

RESUMEN

Este trabajo se realizó con el objetivo de validar el modelo de dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) de una nave, utilizando para ello datos experimentales extraídos de un ensayo de túnel de viento realizado por autores internacionales. La simulación se efectuó con el software ANSYS Fluent, empleando el modelo de turbulencia k-ε realizable, mediante un análisis estacionario. Los resultados mostraron un buen ajuste, sobre todo en la zona de la cubierta y paredes laterales, donde se encontraron diferencias entre los coeficientes de presiones menores al 10%. Los datos experimentales y los simulados fueron comparados con lo propuesto por el Eurocódigo, obteniéndose un comportamiento similar para todas las zonas de la cubierta excepto las esquinas a barlovento, donde la norma es más conservadora.

Palabras Claves: análisis estacionario, coeficientes de presión, dinámica computacional de fluidos (CFD), estructuras bajas, validación.

Validation of the CFD model of a low-rise building under wind loads with steady analysis

ABSTRACT

This work was carried out with the objective of validate the computational fluid dynamics (CFD) model of a low-rise building, using for that the experimental data extracted from the boundary layer wind tunnel test executed by international authors. For the simulation was used the ANSYS Fluent software, employing the realizable k-ε turbulence model and a steady analysis. The results show a good fit, especially in the areas of the roof and side walls, where the existing differences between pressure coefficients are less than 10%. The experimental and simulated data were compared with the proposed by the Eurocode, obtaining a behavior similar for all the roof zones except the windward corners, where the code is conservative.

KEYWORDS: steady analysis, pressure coefficients, computational fluid dynamics (CFD), low-rise buildings, validation.

CITMA CERTIFICADO

Julio 2022-RECIBIDO *APROBADO-Septiembre 2022*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

Las estructuras bajas son de las tipologías constructivas más comunes y en las que se registra un mayor índice de fallos ante las acciones de vientos extremos. Esta razón motiva la profundización en el estudio de las cargas de viento para el correcto diseño de estas estructuras, fundamentalmente el análisis de los coeficientes aerodinámicos debido a las discrepancias encontradas en el abordaje de estos parámetros en las diferentes normas (Amador et al. 2021). Para la determinación de los coeficientes normados se utilizan generalmente estudios en túneles de viento, aunque con el auge de la computación ha ganado preponderancia la utilización de la dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés)

CFD es una herramienta de gran utilidad para el desarrollo de la ingeniería de viento. Entre las ventajas de su utilización se encuentran la capacidad de producir gran cantidad y variedad de datos del comportamiento del flujo de aire, la facilidad de realizar simulaciones en geometrías de gran complejidad, así como su menor costo económico con respecto a otras técnicas de análisis del viento como son los túneles de viento y las mediciones en estructuras reales.

A pesar de las múltiples ventajas, también existen desventajas como son el estar limitada por la capacidad computacional y la dificultad de caracterizar matemáticamente los procesos turbulentos que ocurren en la interacción del viento con las estructuras, especialmente en flujos con altos niveles de intensidad de turbulencia. Esto se debe a que los análisis en CFD se basan en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son ecuaciones de derivadas parciales tridimensionales, no lineales y dependientes del tiempo. Estas ecuaciones no describen explícitamente la turbulencia del flujo, por lo que se han creado diferentes enfoques para resolver este problema. Entre los más comunes se encuentran la simulación numérica directa (DNS), la simulación de grandes remolinos (LES) y las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) (todas las siglas en inglés).

Aunque teóricamente con la Simulación Numérica Directa se obtienen los resultados más cercanos a la realidad, en la práctica solo se pueden resolver mediante este método modelos sumamente simplificados y con bajos números de Reynolds. Esto se debe a la gran potencia de cálculo necesaria para simular el comportamiento del flujo utilizando este enfoque, por lo que no es comúnmente empleado.

Mediante la simulación de grandes remolinos los vórtices de mayor tamaño son calculados directamente mientras que a los pequeños se le aplican simplificaciones. Esto provoca que el método dependa en gran medida del tamaño del mallado, requiriendo una malla más pequeña y, en consecuencia, más tiempo de cálculo que los modelos RANS (Kim et al. 2019). No obstante, los modelos LES permiten simular flujos inestables adecuadamente por lo que son más recomendables cuando se realizan análisis transitorios.

Según Irtaza et al. (2013) con el modelo k-ε estándar se pueden llegar a sobrevalorar los coeficientes de presiones hasta en un 25 %, especialmente en la zona de la pared a barlovento, mientras que con otros modelos RANS como k-ε realizable y k-ε RNG la diferencia con resultados experimentales es de entre el 10 % y el 15 %. La principal ventaja de este tipo de modelos radica en su menor demanda de capacidad de cómputo, siendo cerca del 5 % de lo requerido por un modelo LES, así como la posibilidad de realizar tanto análisis estacionarios como transitorios ya que los modelos LES al estar basados en el cálculo del promedio espacial de las ecuaciones del flujo son dependientes del tiempo, por lo que no proporcionan soluciones adecuadas mediante análisis estacionarios.

Si bien se pueden lograr resultados muy precisos utilizando la simulación numérica, para aceptar como correctos los resultados de una simulación de CFD es necesario realizar la validación del modelo, utilizando para ello datos experimentales. Generalmente para la obtención de estos datos se utilizan ensayos de túnel de viento. Diversos autores (Amaya-Gallardo et al. 2016, Králik et al. 2017) han utilizado esta técnica para calibrar modelos de CFD, obteniendo variados resultados dependiendo principalmente del modelo de descripción de turbulencia utilizado. Králik et al (2017) utilizando la simulación de remolinos con desprendimiento retardado (DDES, por sus siglas en inglés) alcanzaron una diferencia con respecto al túnel de viento del 20,1 %, mientras que con la simulación de escala adaptable (SAS, por sus siglas en inglés) la disparidad fue del 24,8 %. En este caso el análisis fue de tipo transitorio. Por su parte, Amaya-Gallardo et al. (2016) logran obtener coeficientes de presión de similar magnitud al modelo en escala real de una estructura cúbica, utilizando el modelo de turbulencia k-ε standard mediante un análisis estacionario.

Fernández-Cabán y Masters (2018) realizaron una serie de estudios sobre una estructura baja utilizando un túnel de viento de capa límite. Para ello ensayaron diferentes combinaciones de intensidad de turbulencia, rugosidad del terreno y ángulo de ataque del viento sobre un modelo a escala de una nave. El objetivo de este trabajo es validar el modelo numérico de una estructura baja tipo nave mediante análisis estacionario, empleando para ello los datos experimentales obtenidos por Fernández-Cabán y Masters (2018) en su estudio. Los coeficientes de presiones adquiridos por ambos métodos (túnel de viento, CFD) y ponderados en área fueron comparados con los propuestos por el Eurocódigo (EN1991-1-4 2004), ya que esta es una de las normas que mejor refleja la formación de la burbuja de separación y otros fenómenos presentes en este tipo de estructuras (Amador et al. 2021).

02 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO COMPUTACIONAL

El modelo computacional desarrollado recrea el utilizado por Fernández-Cabán y Masters (2018) en su artículo. Estos autores ensayaron un modelo de una nave en un túnel de viento de capa límite, utilizando elementos de rugosidad variables para obtener diferentes intensidades de turbulencia. Para simular las características de este experimento mediante el software ANSYS (2018), se tuvieron en cuenta propiedades del modelo computacional como el dominio, mallado y definición matemática del viento, las cuales se describen a continuación.

De los diferentes casos que consideran estos autores, se seleccionó el que presenta una intensidad de turbulencia del 21,1% y un ángulo de incidencia del viento paralelo a la cresta de la edificación. Se escogió este caso para realizar el estudio de validación ya que estos niveles de intensidad de turbulencia son semejantes a los que se pretenden estudiar en simulaciones posteriores, por lo que es necesario comprobar que con un análisis estacionario y las características del modelo utilizadas se puede replicar correctamente un flujo con intensidades de turbulencia similares.

DOMINIO Y MALLADO

La estructura analizada es una nave con cubierta a dos aguas y un ángulo de inclinación de la misma menor a 5°, por lo que se considera un techo plano. Para realizar ensayos de túnel de viento es necesario desarrollar modelos a pequeñas escalas debido a la imposibilidad económica y técnica de tener un ambiente controlado de dimensiones suficientemente grandes para estudiar edificios. El uso de CFD no tiene esta dificultad, por lo que la simulación de este modelo se realizó a escala real, con dimensiones de 9,2 m de ancho, 14 m de largo y 4 m de altura de muros.

El dominio computacional en el que se encuentra inmerso el modelo se tomó como se muestra en la figura 1, siendo la altura de la estructura (H) igual a 4 m. Con estas dimensiones del dominio se obtuvo una relación de bloqueo del 1,4 %. Esto asegura que se cumpla con lo recomendado (Holmes 2007) de un mínimo de un 5 % para que no existan interacciones entre las paredes del dominio y la estructura que puedan causar variaciones indeseadas en el comportamiento del flujo.

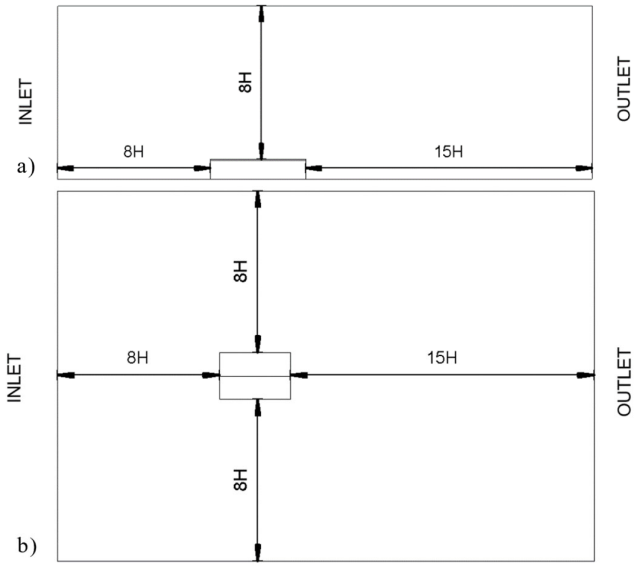


Figura 1. Dimensiones del dominio computacional en elevación (a) y en planta (b)

Se utilizó un mallado estructurado, formado por celdas hexaédricas y compuesto por múltiples capas, donde el tamaño máximo de los elementos disminuye a medida que se encuentran más cercanos a la estructura. Para la capa más externa, donde se encuentra la zona del dominio más alejada de la estructura, el tamaño máximo de las celdas fue de 2,1 m; mientras que en la capa directamente en contacto con la estructura, el tamaño de los elementos fue de 0,2 m. El número total de elementos fue de 3,3 millones aproximadamente.

CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA DEL VIENTO

Para modelar el flujo del viento en el ANSYS Fluent se utilizan las formulaciones especificadas por Fernández-Cabán y Masters (2018), con lo que se garantiza una mayor similitud entre el ensayo de túnel de viento y la simulación. Las características del viento replicadas en el modelo numérico fueron el perfil vertical de velocidad (1) y la intensidad de la turbulencia, esta última a partir de la energía cinética turbulenta (2). Los coeficientes de presión (5) también fueron calculados de manera semejante a dicho artículo.

El perfil de velocidad del viento toma una forma logarítmica, descrita por la ecuación (1), donde U es la velocidad del viento, u_* es la velocidad de fricción, k es la constante de Von Kármán, z es la altura de cálculo, z_D es la altura del plano de cero desplazamientos y z_0 la longitud de rugosidad.

$$U = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z - z_D}{z_0}\right) \qquad (1)$$

k se asumió como 0,4; z_0 tiene un valor de 0,114 m según los autores del ensayo; z_D (0,416 m) fue calculada como un porciento de la altura de los elementos de rugosidad utilizados en el túnel de viento y u_* fue despejada de la ecuación del perfil, dando como resultado 2,7 m/s.

La figura 2 muestra los perfiles de viento logarítmico (1) y experimental extraído del estudio de Fernández-Cabán y Masters. La velocidad del viento fue normalizada a partir de la velocidad de referencia (Uref = 38,26 m/s) tomada a una altura de 33,4 m. La elevación fue normalizada según la altura del modelo (H = 4 m). Debido a que se observa cierta discrepancia entre estos perfiles, se decidió ajustar los datos empíricos mediante una curva que diera una descripción más acertada del comportamiento de la velocidad del viento. El perfil introducido en la simulación fue definido según esta curva de ajuste al inicio del dominio computacional, en la entrada del flujo.

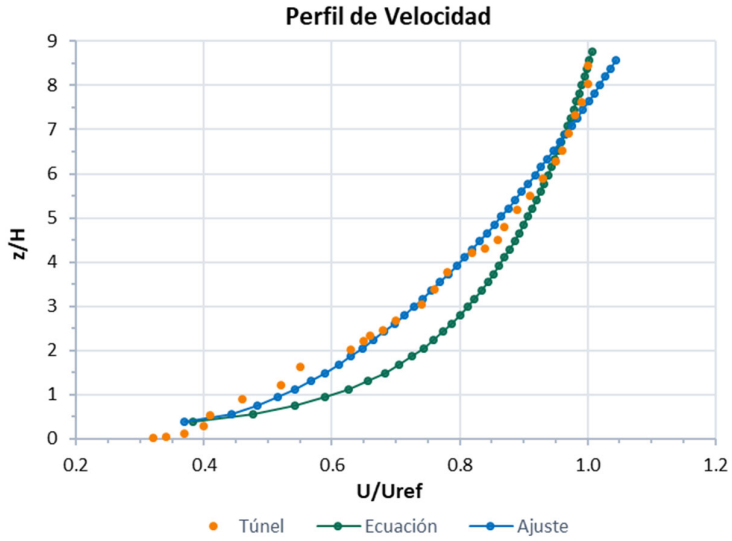


Figura 2. Perfil de velocidades del viento

La energía cinética turbulenta (k) fue definida según (2) y la tasa de disipación turbulenta (ε) según (3). Estas ecuaciones son recomendadas (Blocken et al. 2007) cuando se utilizan modelos de turbulencia RANS. C_μ es una constante empírica con valor 0,09. La intensidad de turbulencia se calculó en la entrada del modelo utilizando (4).

$$k(z) = \frac{{u_*}^2}{\sqrt{C_\mu}} \qquad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{{u_*}^3}{\mathrm{k}\cdot z} \qquad (3)$$

$$I_{(z)} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{U_{(z)}} \cdot 100 \qquad (4)$$

El perfil de turbulencia obtenido se muestra en la figura 3, junto a los datos del ensayo en túnel de viento. Dada la poca correspondencia entre ambos perfiles de turbulencia, se optó por seguir un procedimiento semejante al de la velocidad del viento, utilizando la ecuación de la curva de ajuste para introducir la turbulencia en el modelo numérico

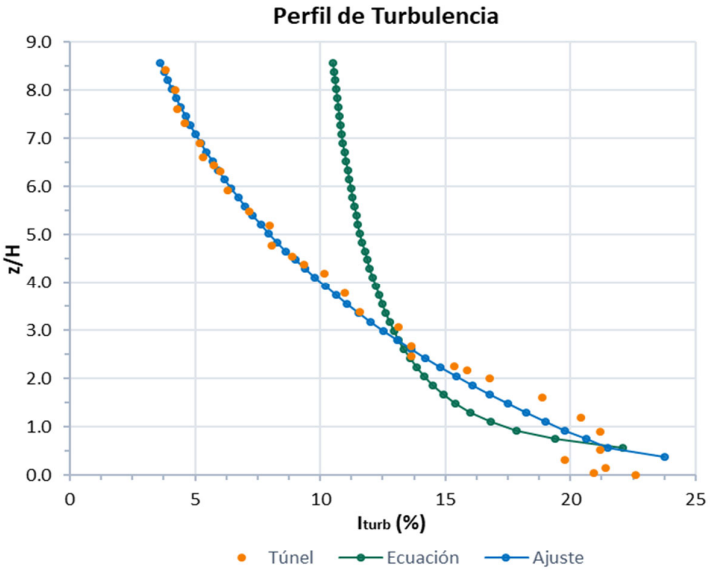


Figura 3. Perfil de intensidad de turbulencia

El experimento en el túnel de viento se realizó para un tiempo de 300 s y una frecuencia de muestreo de 625 Hz. Debido a que realizar una simulación con estas características demanda la utilización de grandes recursos computacionales, los cuales no se encuentran en las computadoras personales si no en clústers, se decidió utilizar un flujo estacionario. Aunque los resultados obtenidos con este tipo de análisis son simplificados, pueden llegar a alcanzar una precisión lo suficientemente cercana a la realidad con un costo computacional mucho menor, siendo su uso en este tipo de problemas avalado por diversos estudios (Amaya-Gallardo et al. 2016).

La comparación con los resultados del artículo se realizó mediante los coeficientes de presiones C_p. Estos se calcularon por la ecuación (5) donde P es la presión del viento sobre la estructura, P_0 es la presión de referencia, ρ es la densidad del aire y U_H es la velocidad media del flujo a la altura de la edificación.

$$C_p = \frac{P - P_0}{0{,}5\rho {U_H}^2} \qquad (5)$$

El valor de P_0 (11,30 Pa) se tomó directamente del software para una altura de referencia de 33,4 m. Esta es la altura correspondiente a escala real de la utilizada en el túnel de viento, la cual fue de 1670 mm al estar en ese caso el modelo a escala 1:20. La densidad del aire, se asumió como 1,205 kg/m3 para una temperatura de 25°C. Para U_H se obtuvo un valor de 20,18 m/s, tomado a la entrada del dominio.

El modelo utilizado para caracterizar la turbulencia fue el k-ε realizable. Fue escogido este modelo ya que según Abohela et al. (2012) es preferible cuando se analizan estructuras aisladas, además de que es utilizado por otros autores (Singh and Roy 2019) en estudios similares. En la figura 4 se muestran las líneas de flujo, donde se puede observar que el viento en su interacción con la estructura se comporta según lo previsto por los modelos teóricos, destacándose la formación de la burbuja de separación en la zona de la cubierta más cercana a barlovento, así como la presencia de vórtices en las paredes de barlovento y sotavento.

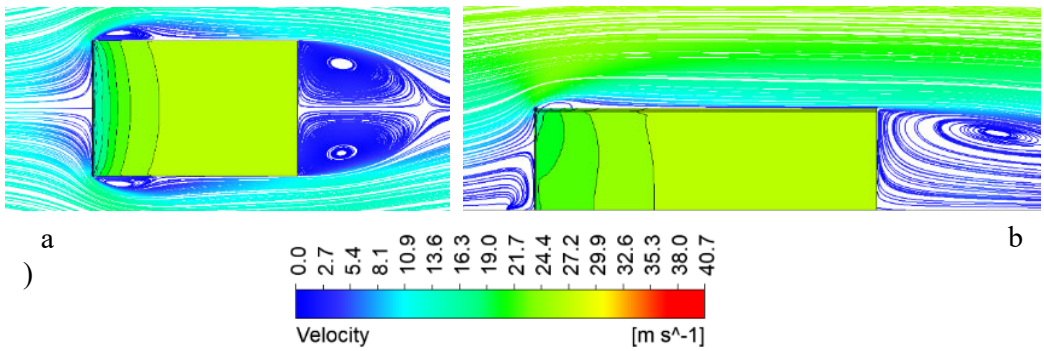


Figura 4. Líneas de flujo alrededor de la estructura en planta (a) y elevación (b)

La resolución numérica se llevó a cabo realizando un análisis estacionario, implícito, de doble precisión, ecuaciones de momento, de k y de ε de segundo orden, interpolación de la presión estándar y algoritmo de emparejamiento de presión-velocidad mediante el método semi-implícito para ecuaciones de presión vinculadas (SIMPLE, por sus siglas en inglés).

En aras de comparar los resultados de ambos estudios (CFD y túnel de viento) con los coeficientes propuestos por el Eurocódigo (EN1991-1-4 2004), se realizó una ponderación en área según la ecuación (6), donde Cf es el coeficiente ponderado de cada área, Cp el coeficiente de presión medio y Ai es el área tributaria de cada valor de presión.

$$C_f = \frac{\sum_i^n C_p * A_i}{\sum_i^n A_i} \qquad (6)$$

Este procedimiento se realizó tanto para las presiones simuladas como las experimentales, utilizando en ambos casos las áreas tributarias que propone el Eurocódigo. Las dimensiones y distribución de estas superficies se muestran en la figura 5 y están en dependencia del valor e, el cual se determina como el menor valor entre la dimensión transversal al viento (b) y dos veces la altura total de la edificación (2h).

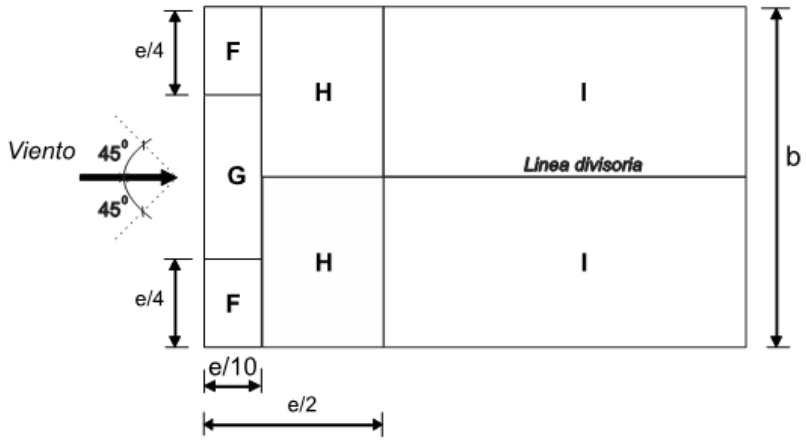


Figura 5. Distribución de área de ponderación según el Eurocódigo

03 RESULTADOS

La figura 6a muestra los coeficientes de presiones obtenidos mediante la simulación en CFD, mientras que en la 6b se observan los resultados alcanzados por Fernández-Cabán y Masters (2018) en el túnel de viento. En ambos casos se advierte un comportamiento similar, existiendo presiones en la pared a barlovento con los valores máximos en el centro de la pared. En el borde de la cubierta más cercano a barlovento se encuentra una pequeña franja donde se ubican las mayores succiones, las cuales van disminuyendo gradualmente hasta cerca de la mitad de la longitud de la nave. A partir de este punto el valor de los coeficientes de presión se mantiene constante hasta el final de la cubierta. La pared a sotavento presenta succiones en toda su superficie. La distribución de las presiones es simétrica con respecto al eje central de la nave, siendo este el comportamiento esperado al no existir ningún obstáculo en el terreno que pueda modificar el comportamiento del flujo y al ser la propia geometría de la nave simétrica.

En la cubierta y paredes laterales se advierte gran concordancia entre ambos estudios, siendo la diferencia entre ellos menor que el 10 % en estas superficies. Las desigualdades más notables se encuentran en la pared a barlovento, donde se obtienen valores mayores en la simulación.

Aunque porcentualmente las discordancias pueden llegar a ser significativas (alcanzando un valor del 33,3 % en la pared a sotavento), en términos de valor absoluto la diferencia es mucho menos evidente, siendo para esta misma zona de solo 0,10. Esto se comprueba en la figura 7, donde se comparan los valores de seis curvas de presión tomadas del ensayo físico y las curvas correspondientes con el ensayo numérico. Las curvas 1, 2 y 3 están ubicadas en la pared a barlovento, correspondiéndose con las regiones en rojo, naranja y amarillo y con valores de coeficientes de presión de 0,4, 0,2 y 0 respectivamente. La curva 4 se sitúa cerca del borde a barlovento de la cubierta, en color azul y valor de -1 y la 5 hacia el centro de la cubierta, en color verde con valor de -0,2. La curva 6 se localiza cerca del centro de la pared a sotavento y se corresponde con un coeficiente de -0,23. Las curvas obtenidas en la simulación realizada presentan una distribución similar, siendo la principal variación en los valores de los coeficientes.

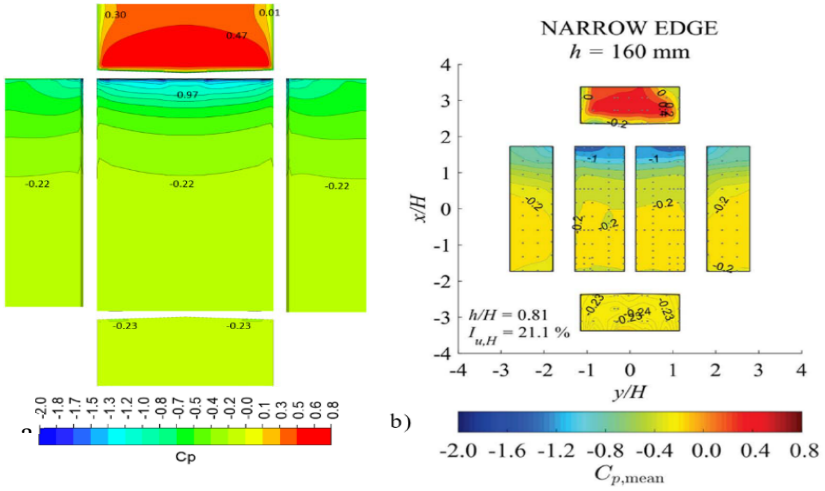
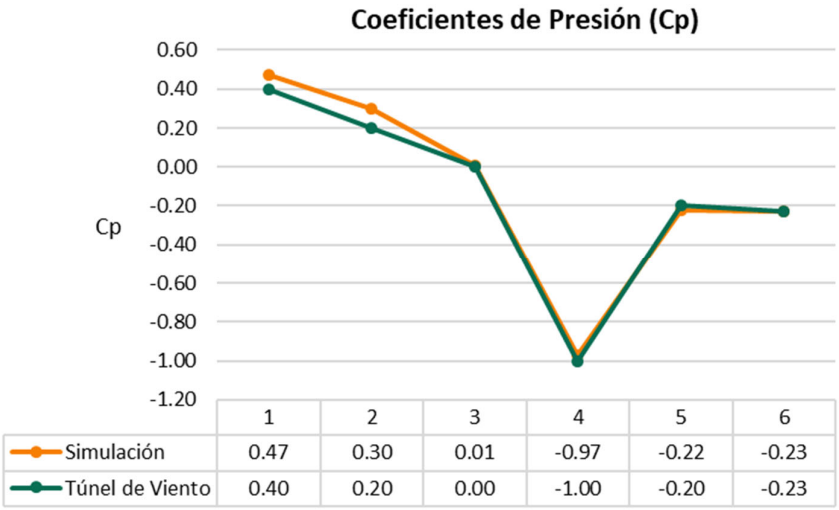


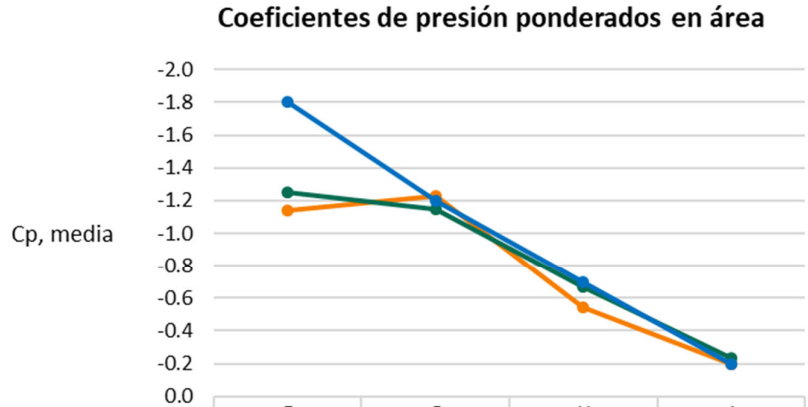
Figura 6. Coeficientes de presión simulado (a) y en túnel de viento (b) (Fernández-Cabán y Masters 2018)



	1	2	3	4	5	6
Simulación	0.47	0.30	0.01	-0.97	-0.22	-0.23
Túnel de Viento	0.40	0.20	0.00	-1.00	-0.20	-0.23

Figura 7. Comparación de coeficientes de presión

Los resultados de la ponderación de los coeficientes de presiones en área se exponen en la figura 8. En esta se puede apreciar que los valores obtenidos mediante CFD, túnel de viento y la normativa muestran un comportamiento similar excepto en la zona F, donde la norma presenta un valor más conservador. Esto podía deberse a que mientras en los ensayos, tanto físicos como numéricos, solamente se analizó el viento incidiendo perpendicularmente a la edificación, en el Eurocódigo se tuvo en cuenta una variación del ángulo de incidencia de ± 45º, lo que afecta especialmente las zonas de las esquinas a barlovento de la cubierta.



	F	G	H	I
Simulación	-1.14	-1.23	-0.54	-0.2
Túnel de viento	-1.25	-1.15	-0.67	-0.23
Norma	-1.8	-1.2	-0.7	-0.2

Figura 8. Coeficientes ponderados en área

Los resultados más cercanos a los de la norma fueron los obtenidos en el túnel para las zonas F y H, mientras que en G e I la simulación se aproxima más. Obviando la zona F, las mayores diferencias entre la norma y la simulación fueron de un 22.8 % para la zona H, mientras que entre la norma y el ensayo físico las discrepancias máximas estuvieron dadas para la zona I con un valor del 13.0 %.

04 CONCLUSIONES

A partir de los datos obtenidos por Fernández-Cabán y Masters (2018) se realizó la validación de un modelo computacional, realizando una simulación en CFD con un análisis estacionario del flujo. El modelo de descripción de la turbulencia empleado fue el k-ε realizable. Con la utilización de este tipo de análisis, así como las características antes descritas de mallado, dominio computacional, descripción matemática del viento y modelo de turbulencia, se logró replicar adecuadamente el comportamiento del flujo del aire alrededor de una estructura baja tipo nave.

Con la utilización de las formulaciones propuestas en la bibliografía consultada (Blocken et al. 2007, Fernández-Cabán y Masters 2018) no se logra una correcta descripción de las características del viento, especialmente la turbulencia. Es recomendable la utilización de datos empíricos cuando se disponga de ellos para conformar los perfiles de velocidad del viento e intensidad de turbulencia a introducir en el modelo numérico.

Las mayores discrepancias entre los resultados de la simulación y el túnel de viento se encontraron en las paredes a barlovento y sotavento. En la cubierta y paredes laterales se logró un buen ajuste, siendo la máxima diferencia entre coeficientes de presión de 0,02, lo que representa menos de un 10 %.

Al realizar la ponderación de los coeficientes en área y comparar con lo propuesto por el Eurocódigo se obtuvo que los resultados tanto de la simulación como del túnel de viento y la norma son semejantes en la mayoría de las zonas. Para la región F el Eurocódigo presenta un valor más conservador que el obtenidos mediante los otros métodos, lo que se puede deberse principalmente a la dirección de incidencia del viento que se asume en esta normativa.

A pesar de las diferencias percibidas, los resultados de la simulación están en concordancia con los estudios de validación realizados por autores internacionales (Králik et al. 2017, Irtaza et al. 2013), especialmente en la región de la cubierta. Esto evidencia que es posible utilizar un análisis estacionario para simular correctamente el flujo de aire en estructuras bajas ya que se obtienen resultados suficientemente cercanos a los ensayos experimentales sin la necesidad de las grandes demandas computacionales que implica un análisis transitorio.

05 REFERENCIAS

Abohela I., Hamza N. and Dudek S. (2012). “Validating CFD Simulation Results: Wind flow around a surface mounted cube in a turbulent channel flow”, Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, Lima, Perú.

ANSYS (2018) ANSYS, Inc., Relase 19.2, USA.

Amador M. A., Fernández Lorenzo I., López Llanusa A. y Elena Parnás V. B. (2021). "Estudio comparativo de coeficientes de presión normativos y experimentales en cubiertas de naves industriales", Ingeniería y Desarrollo, vol.39, no.2, ISSN 2145-9371, Universidad del Norte, Colombia.

Amaya-Gallardo E., Pozos-Estrada A. y Gómez-Martínez R. (2016) “Simulación experimental y numérica para la obtención de coeficientes de presión sobre un cubo: Estudio comparativo”, XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, ISSN 20007-2011, Yucatán, México.

Blocken B., Stathopoulos, T. and J. Carmeliet (2007). "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems," Atmospheric Environment, vol.41, pp. 238–252, ISSN 1878-2442, Netherlands.

EN1991-1-4 (2004). "Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions", European Committee for Standardization (Eurocode), Europe.

Fernández-Cabán P. L. and Masters F. J. (2018). "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, no.17, ISSN 2297-3362, Switzerland.

Holmes J. D. (2007). "Wind loading of structures", Taylor & Francis e-Library, ISBN 0-203-34234-8, New York.

Irtaza H., Beale R. G., Godley M. H. R. and Jameel, A. (2013). "Comparison of wind pressure measurements on Silsoe experimental building from full-scale observation, wind-tunnel experiments and various CFD techniques", International Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 5, no.1, pp. 28-41, ISSN 0975-5462, India.

Kim R-w., Lee I-b., Yeo U-h. and Lee S-y. (2019). "Estimating the wind pressure coefficient for single-span greenhouses using an large eddy simulation turbulence model", Biosystems Engineering, vol.188, pp. 114 – 135, ISSN 1537-5110, United Kingdom.

Králik J., Konečnáb L. and Lavrinčíkováa D. (2017). "Experimental Validation of Computer Fluid Dynamics Simulation aimed on Pressure Distribution on Gable Roof of Low-rise Building", Procedia Engineering, vol.190, pp. 377 – 384, ISSN 1877-7058, United Kingdom.

Singh J. and Roy A. K. (2019). "Effects of roof slope and wind direction on wind pressure distribution on the roof of a square plan pyramidal low-rise building using CFD simulation", International Journal of Advanced Structural Engineering, vol.11, no.2 pp. 231 – 254, ISSN 2008-6695, Iran.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Rigoberto Morales Hernández https://orcid.org/0000-0003-2897-9284
Trabajó en el procesamiento de los datos, así como en su análisis e interpretación. Se encargó de la redacción del manuscrito y la edición final del mismo.

Manuel Alejandro Amador Núñez https://orcid.org/0000-0002-0651-5529
Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados.

Ingrid Fernández Lorenzo https://orcid.org/0000-0002-1223-0968
Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados. Participó en la revisión del manuscrito.

Vivian Beatriz Elena Parnás https://orcid.org/0000-0001-7912-7570
Participó en el análisis de resultados y revisión del manuscrito.