

## OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE FORMA EN UNA SECCIÓN CUADRADA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Nelson Fundora Sautié<sup>1</sup>, Janet O. Martínez Cid<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Máster en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba. E-mail: [nelsonfs@civil.cujae.edu.cu](mailto:nelsonfs@civil.cujae.edu.cu)

<sup>2</sup> Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba. E-mail: [jcid@civil.cujae.edu.cu](mailto:jcid@civil.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

*En las estructuras compuestas por celosías a base de perfiles metálicos, la acción del viento resulta predominante en el diseño de los elementos que la componen. Para la determinación de la carga de viento actuante en estas estructuras, los coeficientes de forma correspondientes a los elementos que componen la celosía, revisten vital importancia debido a que, a partir de estos coeficientes, la separación entre reticulados y su permeabilidad, es estimada la carga de viento actuante en la celosía. Estos coeficientes son obtenidos usualmente mediante ensayos experimentales realizados en túnel de viento, sin embargo, el desarrollo de la dinámica computacional de fluidos (CFD) por su sigla en inglés ha cobrado fuerza como alternativa económicamente superior por su alta capacidad de análisis y la precisión alcanzada en los resultados. En el presente trabajo se emplea el programa ABAQUS en la simulación numérica (CFD) para la obtención de los coeficientes forma en una sección prismática cuadrada de aristas vivas a escala real. Los resultados obtenidos en las simulaciones reportan diferencias inferiores al 2% y 6% para los coeficientes  $C_{Fx}$  y  $C_{Fy}$  respectivamente con respecto a los valores reportados en la NC 285: 2003. Como parte de las funciones de post-procesamiento son presentados los mapas de presión y velocidad obtenidos en las simulaciones.*

**Palabras claves:** ABAQUS, coeficientes de forma, método de elementos finitos FEM, simulación computacional de fluidos CFD.

## OBTAINING OF THE FORM COEFFICIENTS IN AN SQUARE SECTION USING NUMERICAL SIMULATION

### ABSTRACT

*In lattice structures composed of steel sections, the wind action is predominant in the elements design that compose it. For the obtaining of the acting wind load in these structures, the form coefficients of the elements that compose the lattice are of vital importance because, based on these coefficients, the separation between lattices and their permeability, the acting wind load on the lattice is obtained. The form coefficients are usually obtained by wind tunnel test, however, the development of computational fluid dynamics (CFD) has gained strength as an economically superior alternative, due to its high analysis capacity and the precision achieved in the results. In this paper, the ABAQUS program is used for full scale CFD simulations to obtain the form coefficients in a bluff body of square section. The results obtained in the simulations report differences of less than 2% and 6% for the  $C_{Fx}$  and  $C_{Fy}$  coefficients respectively against the values reported in NC 285: 2003. As part of the post-processing functions, pressure and velocity maps obtained in the simulations are presented.*

**Keywords:** Abaqus, form coefficients, finite element method FEM, computational fluid dynamics CFD.

**Nota Editorial:** Recibido: marzo 2020; Aceptado: septiembre 2020

### 1. INTRODUCCIÓN

Los coeficientes de forma correspondientes a las secciones que componen las estructuras formadas por celosías, son obtenidos usualmente mediante ensayos experimentales realizados en túnel de viento [1], [2], sin embargo, a partir del importante desarrollo computacional experimentado desde finales del siglo XX, ha

tomado fuerza como herramienta alternativa a los ensayos efectuados en túneles de viento, la Dinámica Computacional de Fluidos, (CFD) por sus siglas en inglés [3–7]. Estos estudios se concentran en la determinación de las características aerodinámicas de elementos aislados, fundamentalmente cilindros, así como el efecto de protección ejercido al colocarlos en batería con diversos espaciamientos. Las simulaciones CFD permiten realizar, con el empleo de métodos numéricos programados en computadoras, predicciones cuantitativas de un flujo de fluido basado en las leyes que rigen este fenómeno (conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía).

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones CFD comprenden valores de presión y velocidad en los puntos del dominio, a partir de los cuales pueden obtenerse los coeficientes de forma además de la información visual de los diferentes fenómenos generados por el flujo de fluido, como campos de vorticidad, líneas de corriente y mapas de velocidad y presión.

El presente trabajo toma como caso de estudio una sección cuadrada de aristas vivas, cuyos coeficientes de forma son reportados en las normas dedicadas a la determinación a la carga de viento actuante en las estructuras [8], [9]. En las simulaciones fue empleado el programa Abaqus 6.14 que emplea en la solución de las ecuaciones gobernantes el Método de Elementos Finitos (FEM) por su sigla en inglés. El objetivo del estudio es la determinación de los coeficientes de forma de la referida sección mediante simulación numérica. Los resultados obtenidos fueron comparados con los reportados en las normas consultadas [8], [9]. Como parte de la etapa de post-procesamiento se obtuvieron los mapas de distribución de presión y velocidad que permiten definir la posición del punto de separación del flujo, así como la formación de la estela viscosa.

## **2. BASES TEÓRICAS**

Las simulaciones CFD vinculan tres disciplinas fundamentales, la mecánica de fluidos, las matemáticas y la computación. La mecánica de fluidos estudia fluidos en reposo o en movimiento, este movimiento es representado por ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno, conocidas como ecuaciones gobernantes y finalmente las ciencias de la computación que, a través de un lenguaje de programación convierten estas ecuaciones en códigos programados o paquetes de software.

Moukalled y Mangani [10] refieren que las simulaciones CFD son divididas en tres etapas: Pre-procesamiento, solución numérica y post-procesamiento. En la etapa de pre-procesamiento se introduce el problema a resolver al código por medio de una interfaz propia de cada programa. En esta etapa se define la geometría o dominio computacional, se discretiza el mismo en un número finito de subdominios con el empleo de una malla formada por celdas o volúmenes de control, se introducen las propiedades físicas del fluido y se fijan las condiciones iniciales y de borde en los límites del dominio de simulación.

En la etapa de solución numérica del problema es implementado por el código, el método de elementos finitos (FEM) o el método de volúmenes finitos (FVM) por sus siglas en inglés. Las soluciones numéricas se basan en la aproximación de las ecuaciones gobernantes, mediante la resolución de un sistema de ecuaciones algebraicas. Estas aproximaciones se basan en la definición de la geometría del dominio de simulación, las propiedades físicas del fluido, las condiciones iniciales del flujo y las condiciones de frontera del dominio de simulación [10]. La principal diferencia entre estos métodos de solución es el modo en que son calculadas de forma aproximada las variables de flujo y el proceso de discretización empleado.

En la etapa de post-procesamiento son calculados los campos de presión y velocidad a partir de los cuales son obtenidos los coeficientes de forma, además son visualizados los diferentes fenómenos generados por el flujo, mapas de presión y velocidad, vorticidad y líneas de corriente.

### **2.1. Ecuaciones gobernantes del flujo**

El movimiento de un fluido se rige por tres leyes de conservación: masa, cantidad de movimiento y energía. Estas leyes de conservación son descritas por ecuaciones diferenciales parciales no lineales que dan solución a las variables del flujo punto a punto [10]. La ecuación de conservación de la energía no fue empleada en el presente trabajo por tratarse de una simulación isotérmica.

La ley de conservación de la masa, conocida como ley de continuidad, refiere que la masa del sistema debe ser constante por lo que la tasa de masa que entra en un volumen de control es igual a la tasa de masa que sale de este, considerando que la masa no es transformada en energía o viceversa lo que resulta en una tasa de acumulación de masa nula [11]. En su forma vectorial la ley de continuidad puede expresarse según la ecuación 2.1

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2.1}$$

Donde  $\mathbf{u}$  es el vector velocidad del flujo. Esta expresión es válida tanto para flujos estacionarios como transitorios, así como flujos compresibles e incompresibles. Para el caso abordado en el presente trabajo se

considera el flujo como incompresible al emplearse en las simulaciones una velocidad inferior a 0.3 Mach (104 m/s) por lo que se considera la densidad del fluido constante.

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, conocida de forma general como la ecuación de Navier-Stokes representa el balance entre la variación de la cantidad de movimiento en un elemento de fluido y las fuerzas actuantes en este [10]. Estas fuerzas se clasifican en fuerzas internas (gravitatorias y centrífugas fundamentalmente) y fuerzas superficiales (presión y viscosas). En su forma vectorial la ecuación de Navier-Stokes puede referirse según la ecuación 2.2.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.2)$$

donde  $\mathbf{u}$  es el vector velocidad del flujo,  $t$  es la variable independiente tiempo,  $p$  es la presión reducida obtenida dividiendo la presión entre la densidad del fluido y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido. La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento puede interpretarse a partir de que la tasa de cantidad de movimiento acumulada en un volumen de control es igual a la diferencia entre la tasa de cantidad de movimiento que entra y sale del volumen de control más la las fuerzas actuantes dentro del volumen de control [11].

## 2.2. Coeficientes de forma

Las componentes paralela y perpendicular de la fuerza resultante ejercida por un flujo, sin incluir fuerza gravitacional y de flotación, son denominadas fuerzas de arrastre y de sustentación respectivamente. La adimensionalización de estas fuerzas resulta en los coeficientes de arrastre y sustentación. Estos coeficientes consideran dos efectos, la presión y la fricción que ejerce el flujo sobre el obstáculo. En el caso de los cuerpos no aerodinámicos de aristas vivas, entre los que se incluye la sección objeto de estudio, la componente producto de la fricción puede despreciarse por lo que los coeficientes son denominados coeficientes de forma.

En el presente trabajo para la obtención de los coeficientes de forma  $C_{Fx}$  y  $C_{Fy}$  se consideran los ejes (x) y (y) para las direcciones paralelas y perpendiculares al flujo respectivamente, fueron empleadas las expresiones 2.3 y 2.4

$$C_{Fx} = \frac{1}{A} \sum C_{Fx_i} \quad (2.3)$$

$$C_{Fy} = \frac{1}{A} \sum C_{Fy_i} \quad (2.4)$$

donde: A es el área vertical proyectada, considerando un ángulo de ataque de 0° y longitud unitaria al efectuarse un ensayo con flujo bidimensional [12].  $C_{Fx_i}$  y  $C_{Fy_i}$  son los coeficientes de forma paralelo y perpendicular al flujo en el punto (i) respectivamente. Estos coeficientes se obtuvieron con el empleo de las expresiones 2.5 y 2.6

$$C_{Fx_i} = \sum_{i=1}^n C_{p_i} A_i \cos \theta_i, \quad (2.5)$$

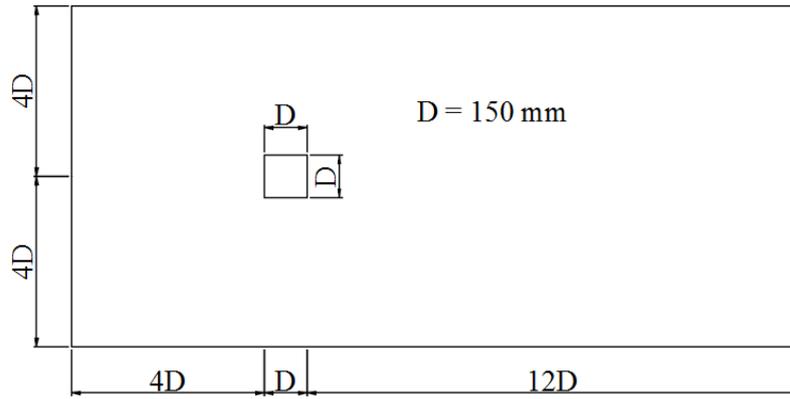
$$C_{Fy_i} = \sum_{i=1}^n C_{p_i} A_i \sin \theta_i, \quad (2.6)$$

Donde:  $C_{p_i}$  es el coeficiente de presión en el punto i,  $A_i$  es el área tributaria correspondiente al punto i,  $\theta_i$  el ángulo que forma el punto i con respecto al eje de referencia horizontal.

## 2.3. Modelo numérico CFD

Los modelos numéricos fueron realizados con el programa ABAQUS 6.14, que implementa un módulo para simulaciones CFD dirigido al análisis de la interacción fluido-estructura. Este módulo emplea el FEM para la solución de las ecuaciones gobernantes. Su campo de aplicación está limitado a fluidos newtonianos y flujos incompresibles laminares o turbulentos. En las simulaciones realizadas no fueron empleados modelos de turbulencia.

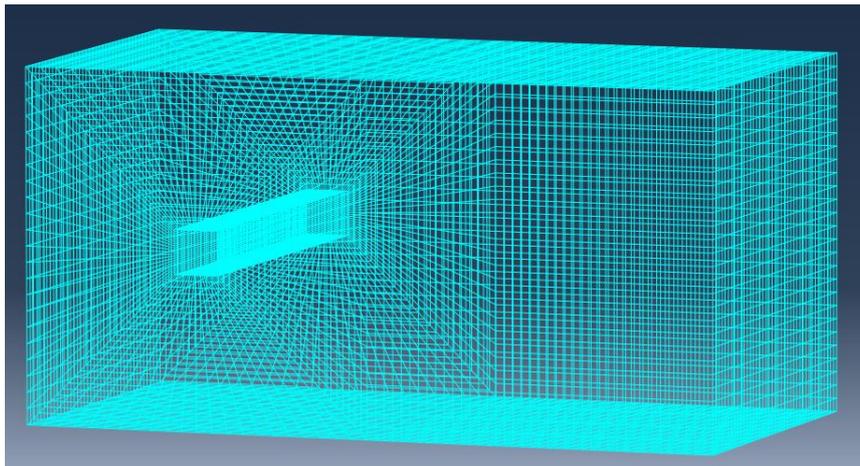
El dominio de simulación fue generado a partir de la dimensión característica (D), tomada, en este trabajo, como la proyección vertical del obstáculo ante el flujo, correspondiente al ángulo de ataque de 0° según el criterio de varios autores consultados [6], [13]. La dimensión horizontal del dominio fue definida a partir de cuatro veces la dimensión característica a barlovento, más la dimensión característica más 12 veces D, la dimensión vertical fue tomada como ocho veces la dimensión característica. En la figura 1 se presenta un esquema del dominio de simulación adoptado.



**Figura 1:** Dimensiones del dominio de simulación empleado

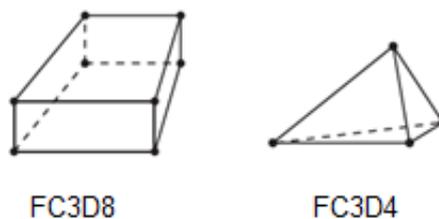
Para la definición de las propiedades físicas del fluido, fue adoptado en las simulaciones una densidad del aire  $\rho = 1,184 \text{ kg/m}^3$  y una viscosidad cinemática  $\nu = 1,562 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  correspondiente a una temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

En el proceso de discretización del dominio fue empleado un mallado estructurado tridimensional a partir de la simplicidad en la geometría del dominio (Figura 2). Estos elementos son construidos a partir de coordenadas nodales, que constituyen la forma más simple de estructurar un equivalente al sistema cartesiano. La literatura internacional refiere que la principal ventaja de los mallados estructurados consiste en que, el proceso de conformación de la matriz de los nodos que componen el dominio discretizado es más fácil y rápido [10].



**Figura 2:** Mallado estructurado del dominio de simulación

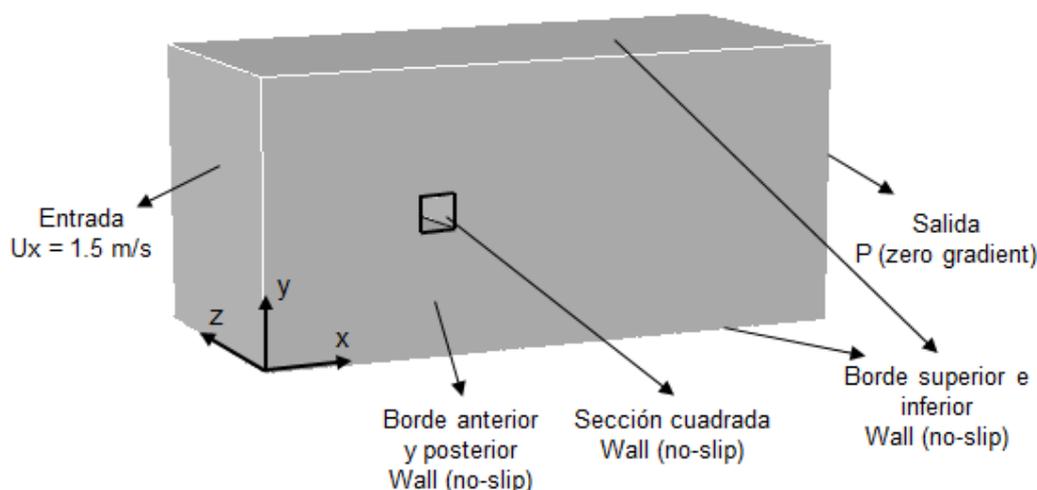
Para el mallado estructurado empleado en la discretización del modelo, Abaqus brinda dos tipos de elementos, el FC3D8 y FC3D4, elementos para simulación de fluidos en tres dimensiones de 8 y 4 nodos respectivamente (Figura 3). En el presente trabajo fue calibrado el tipo de elemento para definir el de mejor desempeño en las simulaciones.



**Figura 3:** Condiciones de frontera asignadas al dominio de simulación

En los límites del dominio de simulación fueron asignadas las condiciones de frontera (Figura 4). La velocidad del flujo  $U_x=1,5\text{m/s}$ , definida en la entrada del dominio, genera un número de Reynolds  $Re=1,4 \times 10^4$ , la literatura consultada refiere que para valores superiores a  $Re=1 \times 10^4$  los coeficientes de forma en secciones no aerodinámicas de aristas vivas, entre las que se encuentra la sección objeto de estudio, son independientes de la velocidad del flujo.

A la salida del dominio se fijó la condición de gradiente de presión nulo, que garantiza la salida libre del flujo. En los contornos anterior, posterior, superior, inferior y en el perímetro de la sección objeto de estudio se adoptó la condición de no deslizamiento (Wall no-slip). Esta condición simula las paredes de un túnel de viento y la presencia del obstáculo donde la velocidad del flujo es nula.



**Figura 4:** Condiciones de frontera asignadas al dominio de simulación

### 3. RESULTADOS

El proceso de calibración matemática fue realizado para definir el tipo de elemento y la densidad óptima de malla a emplear, además fue calibrado el tiempo de duración del flujo. Como variables de control en este proceso de calibración fueron monitoreados los coeficientes de forma  $C_{Fx}$  y  $C_{Fy}$ , el costo computacional y el error cuadrático medio RMS por sus siglas en inglés. Para la selección del tipo de elemento a emplear se fija una densidad de malla (0.05 m) y se considera 1 segundo de duración del flujo, en la tabla 1 se reportan los resultados de la calibración del tipo de elemento.

**Tabla 1:** Selección del tipo de elemento

Tipo de elemento	Malla (m)	$C_{Fx}$			$C_{Fy}$			RMS	Tiempo de análisis (h)
		CFD	NC 285	$E_A$	CFD	NC 285	$E_A$		
FC3D8	0,05	0,74	1,26	0,52	0,006	0	0,006	$1,05 \times 10^{-5}$	0,5
FC3D4		0,77	1,26	0,49	0,174	0	0,174	$2,30 \times 10^{-5}$	2,0

A partir de los resultados obtenidos fue seleccionado el tipo de elemento FC3D8 al presentar en conjunto los menores errores absolutos, un grado de dispersión de los resultados similar, expresado a partir del RMS y un menor costo computacional considerado a partir del tiempo de análisis. En la tabla 2 se presentan los resultados de la calibración de la densidad de malla considerando el tipo de elemento FC3D8 y un segundo de duración del flujo.

**Tabla 2:** Selección de la densidad de malla

Tipo de elemento	Malla (m)	$C_{Fx}$			$C_{Fy}$			RMS	Tiempo de análisis (h)
		CFD	NC 285	$E_A$	CFD	NC 285	$E_A$		
FC3D8	0,05	0,74	1,26	0,52	0,006	0	0,006	$1,05 \times 10^{-5}$	0,5
	0,04	0,84	1,26	0,49	0,004	0	0,004	$5,40 \times 10^{-6}$	1,5
	0,03	1,13	1,26	0,13	0,001	0	0,001	$2,60 \times 10^{-6}$	2,5
	0,02	1,14	1,26	0,12	0,001	0	0,001	$1,90 \times 10^{-6}$	4,0

Producto del proceso de calibración se aprecia que a partir de la densidad de malla de 0.04m los valores de RMS resultan semejantes y decrecientes, esto indica convergencia numérica de los resultados. El error absoluto tiende a disminuir con el aumento de la densidad de malla hasta la malla de 0.03m donde el aumento de la densidad de malla a 0.02m no presenta una reducción significativa del error absoluto, sin embargo, el costo computacional si aumenta de forma considerable. A partir de estos resultados fue seleccionada la malla de 0.03m como la óptima para el resto de las simulaciones.

Para finalizar el proceso de calibración fue estudiada la influencia del aumento del tiempo de duración del flujo, para el estudio se ejecutaron cuatro simulaciones adicionales considerando 5, 10, 20 y 60 segundos de duración del flujo. En la tabla 3 se reportan los resultados obtenidos.

Tabla 3: Aumento del tiempo de simulación

Tiempo de duración del flujo (s)	Malla (m)	C <sub>Fx</sub>			C <sub>Fy</sub>		
		CFD	NC 285	E <sub>A</sub>	CFD	NC 285	E <sub>A</sub>
1	0,03	1,13	1.26	0,13	0,001	0	0,001
5		1,20		0,06	0,10		0,10
10		1,24		0,02	0,01		0,01
20		1,27		0,01	0,06		0,06
60		1,24		0,02	0,05		0,05

Los resultados reflejan que a partir de los 10 segundos de simulación ocurre un proceso de convergencia en los valores de los coeficientes de forma ya que el aumento del tiempo de duración del flujo genera diferencias máximas del 2% y 6% para los coeficientes C<sub>Fx</sub> y C<sub>Fy</sub> respectivamente. Esto se debe a un proceso de estabilización del flujo a partir del cual estos coeficientes no presentan variaciones significativas. Los resultados muestran que, a partir de los 10 segundos el flujo puede considerarse estable. Para realizar un análisis aerodinámico en las figuras 5 y 6 se muestran las distribuciones de presión correspondientes a los tiempos de duración del flujo considerados.

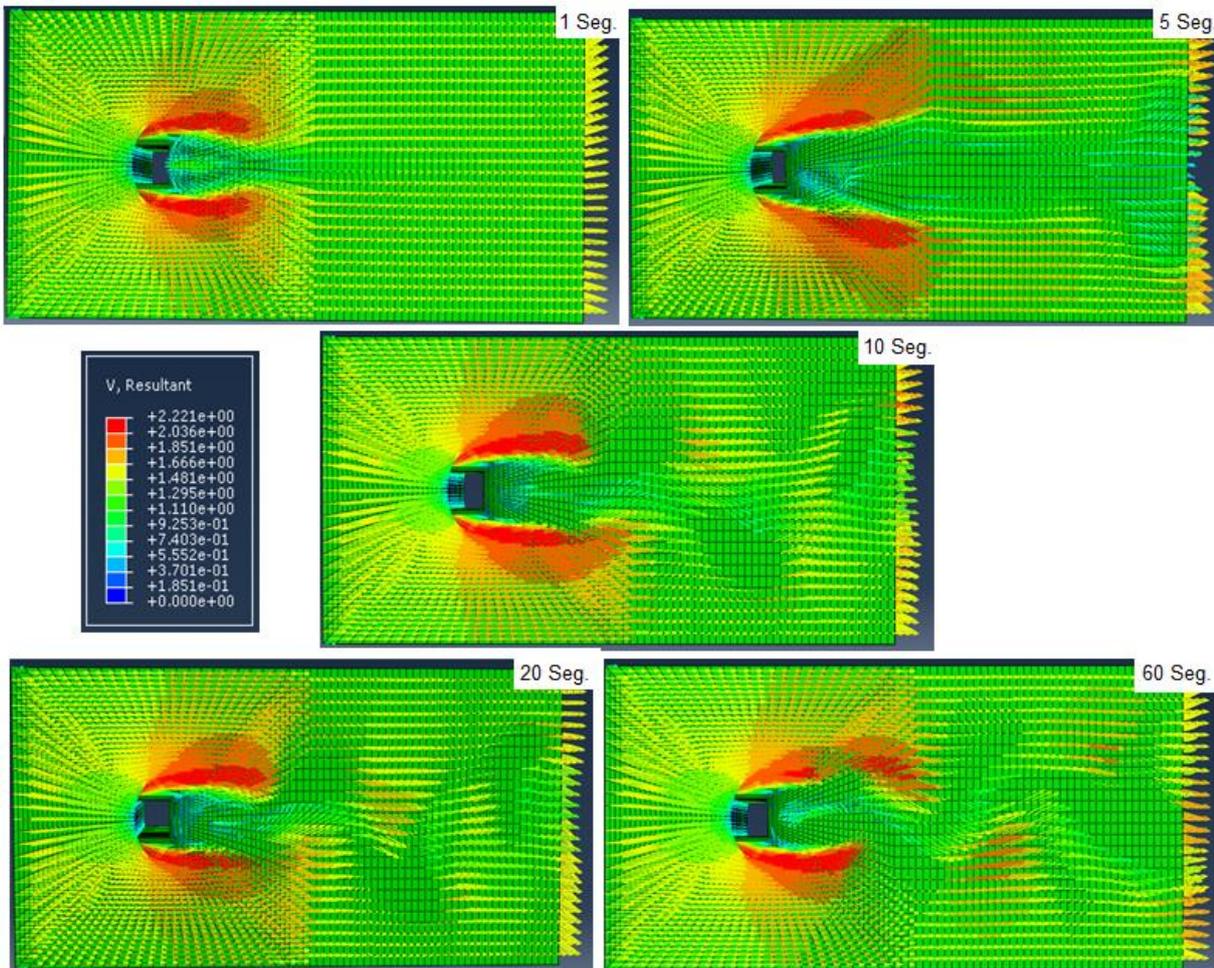
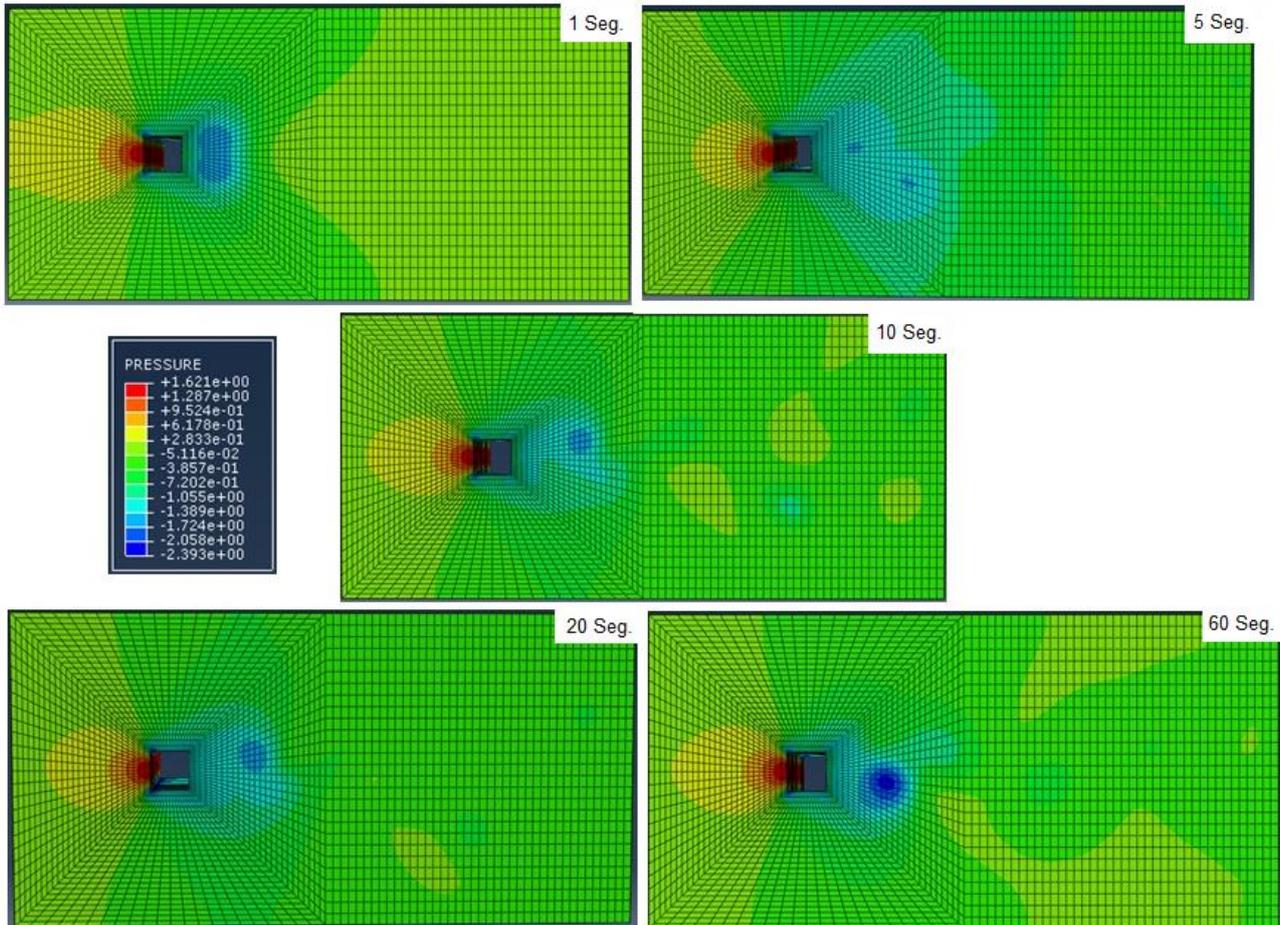


Figura 5: Mapas de velocidad para los tiempos de simulación considerados

Los mapas de velocidad presentados en la figura 5 muestran el desarrollo del flujo en su recorrido por el dominio de simulación, este desarrollo se alcanza a partir de los 10 segundos de simulación, que coincide con la estabilización de los coeficientes de forma. Se aprecia una aceleración significativa del flujo en las aristas del obstáculo presentes a barlovento, esta aceleración es provocada por el efecto Venturi que se manifiesta por la cercanía de las fronteras superiores e inferiores del dominio. En la figura 6 se presentan los mapas de presiones para los cinco tiempos de simulación analizados.



**Figura 6:** Mapas de presión para los tiempos de simulación considerados

Se aprecia que el punto de separación del flujo se produce en las aristas a barlovento del flujo, el punto de separación del flujo se encuentra en la zona de transición de presión a succión. Este comportamiento es característico de cuerpos no aerodinámicos de aristas vivas, en los que el aumento de la velocidad del flujo y la intensidad de turbulencia no provocan variaciones significativas en los coeficientes de forma. Al igual que en los mapas de velocidad se aprecia el desarrollo del flujo a partir de los diez segundos de simulación. Puede apreciarse que para este tiempo de simulación se produce el desprendimiento de los vórtices, reflejados por las zonas de succión a sotavento de la sección objeto de estudio. Otra característica que se evidencia es la formación de la estela viscosa a sotavento con una magnitud que ronda la proyección vertical de la sección objeto de estudio.

### 3. CONCLUSIONES

En el trabajo fueron obtenidos los coeficientes de forma en una sección prismática cuadrada de aristas vivas con el empleo de simulación numérica CFD, para ello fue utilizado el programa Abaqus 6.14 basado en el FEM. Fue simulado un flujo con una velocidad de 1,5 m/s, a una temperatura de 25 °C. El dominio de simulación fue definido a partir de la dimensión característica  $D=0,15\text{m}$  considerada como la proyección vertical del obstáculo ante el flujo considerando un ángulo de ataque de  $0^\circ$ . El dominio fue discretizado con el empleo de un mallado estructurado, en el análisis no fueron empleados modelos de turbulencia. Fue realizado un proceso de calibración matemática para la determinación del tipo de elemento y la densidad de malla a emplear, además fue calibrado el tiempo de duración del flujo. Como patrón de calibración fueron empleados

los coeficientes de forma reportados en la NC 285: 2003. Se obtuvieron los mapas de velocidad y presión correspondientes a los cinco tiempos de duración del flujo considerados. Los resultados obtenidos permitieron arribar a las siguientes conclusiones: Los coeficientes de forma  $C_{Fx}$  y  $C_{Fy}$  obtenidos reportaron diferencias máximas del 2% y 6% respectivamente considerando un tipo de elemento FC3D8, una malla de 0,03m y un tiempo de simulación de diez segundos. Los mapas de velocidad y presión mostraron que para diez segundos de simulación se produce el desarrollo del flujo en el dominio de simulación. El punto de separación del flujo se ubicó en las aristas a barlovento del obstáculo, que se corresponde con la configuración geométrica de la sección objeto de estudio.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Prud'homme, F. Legeron, and S. Langlois, "Calculation of wind forces on lattice structures made of round bars by a local approach," *Engineering Structures*, vol. 1, no. January, pp. 1–20, 2018.
- [2] N. Fundora, E. B. C. Schettini, V. Elena, and A. Mercio L. Sousa, "Coeficientes de forma en sección compuesta con ensayos en túnel de viento," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XLI, no. 1, pp. 85–99, 2020.
- [3] H. Z. Deng, H. J. Xu, C. Y. Duan, X. H. Jin, and Z. H. Wang, "Experimental and numerical study on the responses of a transmission tower to skew incident winds," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 1–18, 2016.
- [4] K. Karthik, M. Vishnu, S. Vengadesan, and S. K. Bhattacharyya, "Optimization of bluff bodies for aerodynamic drag and sound reduction using CFD analysis," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 174, no. November 2017, pp. 133–140, 2018.
- [5] S. Laima, C. Jiang, H. Li, W. Chen, and J. Ou, "A numerical investigation of Reynolds number sensitivity of flow characteristics around a twin-box girder," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 172, no. October 2017, pp. 298–316, 2018.
- [6] Y. Cao and T. Tamura, "Shear effects on flows past a square cylinder with rounded corners at  $2.2 \times 10^4$ ," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 174, no. September 2017, pp. 119–132, 2018.
- [7] N. Fundora, L. R. Monteiro, E. B. C. Schettini, and V. Elena, "Determinación de los coeficientes de arrastre y sustentación en un perfil angular de alas iguales con el empleo de simulación numérica," *Ingeniería Y Desarrollo*, vol. 38, no. 1, pp. 68–84, 2020.
- [8] NC285, "Carga de Viento. Método de cálculo," ed. Cuba: Oficina Nacional de Normalización (NC), 2003.
- [9] ASCE/SEI 7-10, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," ed. United States of America: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010.
- [10] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*, Switzerland: Springer, 2016.
- [11] T. Holzmann, *Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM*, 4th Edition. Leoben: Holzmann CFD, 2016.
- [12] S. Prud'homme, F. Legeron, A. Laneville, and M. K. Tran, "Wind forces on single and shielded angle members in lattice structures," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 124, pp. 20–28, 2014.
- [13] K. Nidhul, A. S. Sunil, and V. Kishore, "Numerical Investigation of Flow Characteristics over a Square Cylinder with a Detached Flat Plate of Varying Thickness at Critical Gap Distance in the wake at Low Reynolds Number," *International journal of research in aeronautical and mechanical engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 104–118, 2015.