



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“OBTENCIÓN Y VALIDACIÓN DE  
PRESIONES MEDIAS SOBRE UNA  
ESTRUCTURA INFLABLE MEDIANTE CFD.”**

**TÉSIS**

**PRESENTADA POR:**

**I.C. ORLANDO JESÚS PÉREZ PACHECO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2017**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiere sido aprobado por el Sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

## RESUMEN

En este trabajo se presenta la distribución, verificación y validación de presiones sobre un modelo rígido que representa a una estructura inflable tipo hangar, a través de la utilización de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), mediante simulaciones estacionarias, utilizando modelos de turbulencia de dos ecuaciones. La modelación realizada fue con direcciones de flujo a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto al eje longitudinal de la estructura, considerando configuraciones abierta y cerrada de la estructura.

Los resultados obtenidos mostraron que las presiones de mayor magnitud negativa se encuentran en la proximidad de los cambios bruscos en la geometría de la estructura, como lo es en la transición de las tapas a las secciones tubulares en ambas direcciones del flujo. También se observó que el desprendimiento de la corriente se da en secciones anteriores a la cúspide de la estructura en la condición abierta y cerrada con dirección del flujo a  $90^\circ$ . Adicionalmente, para la condición abierta de la estructura con dirección del flujo a  $0^\circ$ , las presiones observadas fueron todas negativas en las zonas próximas a las cúspides de las secciones tubulares, siendo próximas a cero en las uniones de dos secciones tubulares.

Para la validación de los resultados numéricos obtenidos, se realizó la comparación de estos resultados con los datos obtenidos mediante experimentación en el túnel de viento de la FIUADY. Se encontró una buena relación entre ambos resultados, sin embargo, existieron zonas donde los resultados numéricos tuvieron una dispersión significativa con respecto a los experimentales. En general, este comportamiento se asocia al desprendimiento de la capa límite sobre las paredes de las estructuras modeladas, por lo cual la dispersión observada es aceptable para los modelos de turbulencia y tipo de simulación utilizados.

## ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics was used to obtain the pressure distribution over the surface of a rigid model representing an inflatable structure subjected to wind forces. These results were validated using the data from another author.

A hangar type inflatable structure under wind forces was modeled with two configurations on the angle of incidence of the wind ( $0^\circ$  and  $90^\circ$ ) and two additional configurations using an open and closed form of the inflatable structure. The simulations using these models were performed in steady state using turbulence models of two equations.

With the data obtained from the simulations, it was observed that the negative pressures with the highest magnitude were found in the proximity of abrupt geometry changes on the structure. The same characteristics were found on the transition from the closed panel to the tubular structures in the closed condition of the structure on both  $0^\circ$  and  $90^\circ$  wind incidences. It was also observed that the detachment of the boundary layer was found before the peak of the structure, on both the open and closed configurations of the structure with an angle of incidence of  $90^\circ$ . Furthermore, for the open and closed structure configurations with an angle of incidence of  $0^\circ$ , the pressures found near the peak of the circular tubular sections were all negative. The pressures at the union of two tubular sections were close to zero.

The resulting data from the simulations were compared to experimental results obtained using the wind tunnel at FIUADY, using the same type of structure. An overall acceptable correlation was found between the numerical data and the experimental data. However, there were zones where the numerical results obtained through simulation had a significant dispersion when compared against the experimental data; these zones are associated to boundary layer detachment when studying curved surfaces, which makes the observed dispersion acceptable for the turbulence models and stationary simulation used in this work.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	2
1.3 Objetivo.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.4 Contenido del trabajo.....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción .....	5
2.2 Estructuras inflables.....	5
2.2.1 Introducción .....	5
2.2.2 Materiales .....	6
2.2.3 Comportamiento estructural.....	7
2.2.4 Clasificación.....	7
2.3 Capa límite y desprendimiento de la corriente .....	8
2.3.1 Capa límite.....	8
2.3.2 Desprendimiento de la corriente .....	10
2.4 Antecedentes de CFD en la ingeniería eólica.....	13
2.5 Ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos .....	14
2.6 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) .....	16
2.6.1 Preproceso .....	17
2.6.1.1 Definición del dominio .....	17
2.6.1.2 Condiciones de inicio y de frontera .....	18
2.6.1.3 Construcción de la malla .....	18
2.6.1.4 Selección del fenómeno físico a modelar.....	19
2.6.1.5 Modelado de la turbulencia .....	22
2.6.1.6 Definición de las propiedades del fluido .....	23
2.6.2 Proceso.....	23
2.6.2.1 Discretización .....	23

2.6.2.2	Solución de ecuaciones .....	24
2.6.2.2.1	Solución aproximada .....	24
2.6.2.2.2	Soluciones explícitas vs implícitas .....	25
2.6.2.2.3	Estabilidad y convergencia .....	26
2.6.3	Postproceso .....	26
2.7	Conclusiones del marco teórico .....	27
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>28</b>
3.1	Introducción .....	28
3.2	Preproceso para el estudio de la estructura inflable .....	30
3.2.1	Dominio computacional.....	30
3.2.2	Condiciones de frontera.....	32
3.2.3	Mallado .....	35
3.2.4	Modelo de turbulencia.....	38
3.2.5	Propiedades del fluido .....	38
3.3	Proceso.....	39
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS COMPUTACIONALES.....</b>	<b>40</b>
4.1	Dirección del flujo a 0°, estructura cerrada .....	40
4.2	Dirección del flujo a 0°, estructura abierta.....	43
4.3	Dirección del flujo a 90°, estructura cerrada .....	46
4.4	Dirección del flujo a 90°, estructura abierta.....	49
<b>5.</b>	<b>VALIDACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>52</b>
5.1	Dirección del flujo a 0°, estructura cerrada .....	52
5.2	Dirección del flujo a 0°, estructura abierta.....	53
5.3	Dirección de Flujo a 90°, estructura cerrada .....	54
5.4	Dirección del Flujo a 90°, estructura abierta .....	55
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>
6.1	Conclusiones .....	56
6.2	Recomendaciones .....	58
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estadio Olímpico de Múnich.....	1
Figura 1.2. Pabellón Fuji, Osaka. ....	2
Figura 2.1. Estructura inflable tipo hangar, fabricada por Buildair. ....	6
Figura 2.2. Clasificación de estructuras de membranas.....	7
Figura 2.3. Estructuras soportadas por aire. ....	8
Figura 2.4. Estructuras formadas por elementos con aire a presión. ....	8
Figura 2.5. Desarrollo de la capa límite y sus transiciones. ....	9
Figura 2.6. Desprendimiento de capa límite debido a un gradiente de presión adverso. .....	11
Figura 2.7. Efectos del gradiente de presiones sobre la capa límite (White, 2010)...	12
Figura 2.8. Proceso de solución por medio de CFD.....	17
Figura 2.9. Condiciones Iniciales y de Frontera en CFD. ....	18
Figura 2.10. Ilustración del efecto de la discretización (Hunte, 2010) .....	19
Figura 2.11. Los tres métodos comunes en la simulación CFD. ....	20
Figura 2.12. Los enfoques más utilizados para modelar turbulencia (Hunte, 2010)..	22
Figura 2.13. Proceso iterativo de solución mediante algoritmo SIMPLE. ....	25
Figura 2.14. Esquema explícito. ....	25
Figura 2.15. Esquema implícito. ....	26
Figura 3.1. Geometría de la estructura inflable. ....	28



Figura 3.2. Esquema de los ángulos de la dirección del flujo estudiados sobre la estructura inflable. ....	29
Figura 3.3 Vista lateral de la estructura inflable cerrada, unidades en metros. ....	30
Figura 3.4 Vista frontal de la estructura inflable cerrada, unidades en metros ....	30
Figura 3.5. Planos de simetría de la estructura inflable.....	31
Figura 3.6. Criterio transversal del dominio del fluido.....	32
Figura 3.7. Criterio longitudinal del dominio del fluido. ....	32
Figura 3.8. Condiciones de frontera estructura cerrada, dirección del flujo a 90°. ....	33
Figura 3.9. Condiciones de frontera estructura abierta, dirección del flujo a 90°. ....	34
Figura 3.10. Condiciones de frontera estructura cerrada, dirección del flujo a 0°. ....	34
Figura 3.11. Condiciones de frontera estructura abierta, dirección del flujo a 0°. ....	35
Figura 3.12. Malla en la superficie: estructura cerrada, dirección del flujo a 90°.....	36
Figura 3.13. Malla en la superficie: estructura abierta, dirección del flujo a 90°.....	36
Figura 3.14. Malla en la superficie: estructura cerrada, dirección del flujo a 0°.....	37
Figura 3.15. Malla en la superficie: estructura abierta, dirección del flujo a 0°.....	37
Figura 4.1 Estructura cerrada, dirección del flujo a 0°, vista frontal.....	41
Figura 4.2. Estructura cerrada, dirección del flujo a 0°, vista trasera. ....	41
Figura 4.3. Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura cerrada con dirección del flujo a 0°. ....	42
Figura 4.4. Estructura abierta, dirección del flujo a 0°, vista frontal.....	43
Figura 4.5. Estructura abierta, dirección del flujo a 0°, vista trasera.....	44
Figura 4.6. Estructura abierta, dirección del flujo a 0°, vista interior.....	44

Figura 4.7 Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura abierta con dirección del flujo a $0^\circ$ .....	45
Figura 4.8. Estructura cerrada dirección del flujo a $90^\circ$ , vista frontal.....	46
Figura 4.9. Estructura cerrada dirección del flujo a $90^\circ$ , vista trasera. ....	47
Figura 4.10. Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura cerrada con dirección del flujo a $90^\circ$ . ....	48
Figura 4.11. Estructura abierta, dirección del flujo a $90^\circ$ , vista frontal.....	49
Figura 4.12. Estructura abierta, dirección del flujo a $90^\circ$ , vista trasera.....	50
Figura 4.13 Estructura abierta, dirección del flujo a $90^\circ$ , vista interior.....	50
Figura 4.14. Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura abierta con dirección del flujo a $90^\circ$ .....	51
Figura 5.1. Comparación con datos experimentales, condición cerrada y dirección del flujo a $0^\circ$ . ....	52
Figura 5.2. Comparación con datos experimentales, condición abierta y dirección del flujo a $0^\circ$ . ....	53
Figura 5.3. Comparación con datos experimentales, condición cerrada y dirección del flujo a $90^\circ$ . ....	54
Figura 5.4. Comparación con datos experimentales, condición abierta y dirección del flujo a $90^\circ$ . ....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades básicas de un fluido.....	23
Tabla 3.1. Resumen de condiciones de frontera aplicadas.....	33
Tabla 3.2. Modelos utilizados para el análisis. ....	38
Tabla 3.3 Propiedades asignadas al fluido.....	38
Tabla 3.4 Parámetros utilizados para el análisis. ....	39

# CAPÍTULO I.

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

Las estructuras ligeras compuestas de membranas han tenido una gran popularidad en años recientes, teniendo una amplia gama de aplicaciones en arquitectura e ingeniería civil, por ejemplo: hangares, refugios, cubiertas y puentes (Chi & de Olivera Pauletti, 2005). En la Figura 1.1 se observa el estadio olímpico de Múnich, en el cual la cubierta está formada por una membrana apoyada de manera puntual. Este tipo de estructuras son afectadas por presiones producidas por el viento y nieve. Debido a esto, deben ser diseñadas para que el presfuerzo suministrado al sistema le permita resistir las cargas a las que estarán sometidas durante su vida útil.



**Figura 1.1 Estadio Olímpico de Múnich.**

Como parte de los sistemas de estructuras ligeras, existen las estructuras inflables, también conocidas como estructuras neumáticas, éstas son estructuras flexibles elaboradas con membranas que son presforzadas con aire presurizado y algunas veces rigidizadas con cables para soportar a tensión las cargas externas a las que serán sometidas (Kröplin, 2005). Para aplicaciones civiles, estas estructuras son competitivas debido a su mínimo peso, capacidad de ser dobladas, fácil ensamble y desensamble, así como su fácil transportación y mantenimiento. Un ejemplo de las

primeras estructuras inflables de gran envergadura es el pabellón Fuji de la exposición de Osaka (1970) mostrado en la Figura 1.2.



**Figura 1.2. Pabellón Fuji, Osaka.**

## **1.2 Planteamiento del problema**

En el diseño de estructuras inflables, las cargas producidas por el viento son las que producen los mayores esfuerzos a tensión, existiendo variabilidad en la distribución de presiones sobre la estructura. En estructuras inflables de gran tamaño, se debe resistir grandes presiones de viento, por lo que es necesario suministrar a ellas mayores presiones para controlar las deformaciones y la formación de pliegues en la membrana (Basset Salom, 2013). Debido a esto, conocer la distribución de presiones sobre la estructura es indispensable para el diseño de los sistemas de presfuerzo y de soporte. El análisis de la distribución de presiones sobre modelos rígidos permite obtener una primera impresión sobre el comportamiento que tendrá la estructura. Este análisis se puede realizar mediante ensayos en túneles aerodinámicos o mediante la utilización de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés). La utilización de CFD para estudiar la distribución de presiones permite la obtención de resultados mediante la utilización de modelos computacionales simplificados, posteriormente, estos modelos se pueden refinar y así obtener resultados con una mayor aproximación a los causados en un entorno real.

Actualmente, utilizando CFD se pueden llegar a resultados de similar precisión a los obtenidos en un túnel de viento, y muchas veces estos resultados son de gran uso debido a la visualización de los resultados en todo el dominio estudiado (Blocken, 2009).

Debido a lo mencionado en los párrafos anteriores, en este trabajo se estudió el efecto de la acción de un fluido sobre una idealización rígida de una estructura inflable tipo hangar mediante el uso de CFD. La utilización de esta herramienta permitió realizar la simulación numérica de las ecuaciones que rigen a los fluidos y se determinó la distribución de las presiones que se generaron sobre la superficie de esta estructura.

### **1.3 Objetivo**

#### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo general del trabajo de investigación es determinar la distribución de presiones sobre un modelo que represente a una estructura inflable tipo hangar debido a los efectos del viento, mediante la utilización de la dinámica de fluidos computacional (CFD).

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos este trabajo son:

- Modelar de manera computacional un cuerpo rígido que represente a una estructura inflable tipo hangar y las condiciones de flujo que representan las acciones del viento sobre la estructura.
- Obtener la distribución de presiones medias externas e internas, producidas por la acción del fluido sobre una estructura con respecto a direcciones de flujo y bajo dos configuraciones, abierta y cerrada.
- Validar los resultados obtenidos con los resultados experimentales de una estructura similar ensayada por otro autor en un túnel de viento.

## **1.4 Contenido del trabajo**

El presente trabajo está dividido en seis capítulos. En el Capítulo 1 se presentan las generalidades y objetivos del trabajo. En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico del trabajo, el cual incluye la descripción y características de las estructuras inflables, la aplicabilidad de la dinámica de fluidos computacional a la ingeniería eólica, las ecuaciones involucradas en el análisis de fluidos y el proceso de solución mediante la dinámica de fluidos computacional. En el Capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de los modelos realizados para el trabajo, en éste se incluye la descripción de la geometría de la estructura que se estudió, el dominio computacional elegido para el fluido, los parámetros de mallado, modelo de turbulencia, propiedades del fluido y criterios de convergencia. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los modelos analizados mediante la dinámica de fluidos computacional. En el Capítulo 5 se analizan y comparan los resultados obtenidos de los modelos contra los resultados obtenidos mediante la experimentación de modelos rígidos por otro autor en el túnel de viento de FIUADY. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones finales del trabajo.

## **CAPÍTULO II.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Introducción**

En este capítulo se realiza una breve descripción de las estructuras inflables, posteriormente se presenta la definición de capa límite y desprendimiento de corriente. Consecutivamente, se presenta la revisión de la literatura acerca de la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en la ingeniería eólica. Seguido, se exponen las ecuaciones que describen el comportamiento de fluidos. Finalmente, se concluye el capítulo con una exposición de dinámica de fluidos computacional y el proceso que se utiliza para la solución de problemas mediante esta herramienta.

#### **2.2 Estructuras inflables**

##### **2.2.1 Introducción**

Las estructuras compuestas por membranas son aquellas construidas a base de superficies flexibles de pared delgada, a las que se les da forma y estabilidad por medio de pretensionado (Kröplin, 2005). Este tipo de estructuras, son una solución conveniente para cubrir y abarcar grandes espacios. Estas estructuras tienen la ventaja de ser de fácil transporte, es decir, estas pueden ser empacadas y transportadas fácilmente y pueden ser erigidas para servir como estructuras temporales o permanentes.

Las estructuras inflables son compuestas por membranas flexibles, pretensadas mediante la inyección de aire a presión y en ocasiones rigidizadas por cables que, frente a la acción de las cargas externas, desarrollan únicamente esfuerzos de tensión. Generalmente constituyen un sistema estructural muy ligero, en la Figura 2.1 se una de las aplicaciones de las estructuras inflables (Basset Salom, 2013).





**Figura 2.1. Estructura inflable tipo hangar, fabricada por Buildair.**

Las estructuras inflables son de, relativamente, reciente creación. En 1917, Sir Frederic Lanchester estableció la primera patente de construcción inflable en Europa, mientras que, en Estados Unidos, empezaron a desarrollarse en 1946. Posteriormente, el pabellón de Estados Unidos en la exposición de 1970 en Osaka, Japón, junto con otras estructuras inflables presentes en la exposición, significaron la confirmación de las posibilidades de utilización a gran escala de este tipo de estructuras.

### **2.2.2 Materiales**

En general, en la construcción de estructuras inflables se utilizan materiales textiles, el tipo específico de este dependerá de la escala de la estructura. Para estructuras de pequeña a mediana escala se utilizan lonas naturales o sintéticas revestidas, cuya vida media oscila entre 5 y 10 años (Basset Salom, 2013).

En el caso de estructuras de gran escala se utilizan membranas de mayor resistencia como por ejemplo nylon, poliéster o fibra de vidrio con revestimientos de vinilo o teflón.

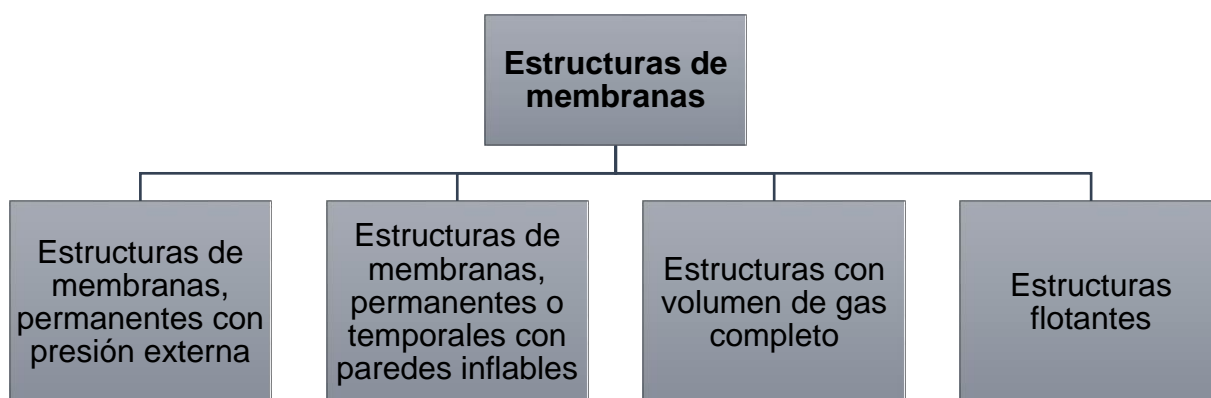
A medida que se va aumentando la escala de la estructura, el textil se ve sometido a mayores tensiones, siendo en ocasiones necesario utilizar sistemas de cables para resistir las tensiones adicionales.

### 2.2.3 Comportamiento estructural

Con el uso de estructuras inflables se pueden cubrir claros muy grandes sin la necesidad de apoyos intermedios. En contraste con las estructuras de cascarones, que también soportan sus cargas mediante fuerzas en la superficie, las estructuras inflables no pueden soportar cargas a compresión, ya que generarían dobleces en la superficie de estas estructuras (Marcipar, et al., 2005). La pretensión del sistema puede ser suministrada mediante cargas de tensión externas o por presurización interna.

### 2.2.4 Clasificación

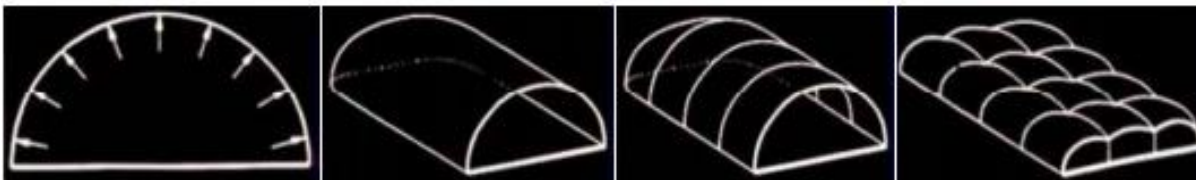
De acuerdo al tipo de construcción, las estructuras de membranas pueden ser clasificadas como se muestra en la Figura 2.2 (Kröplin, 2005):



**Figura 2.2. Clasificación de estructuras de membranas.**

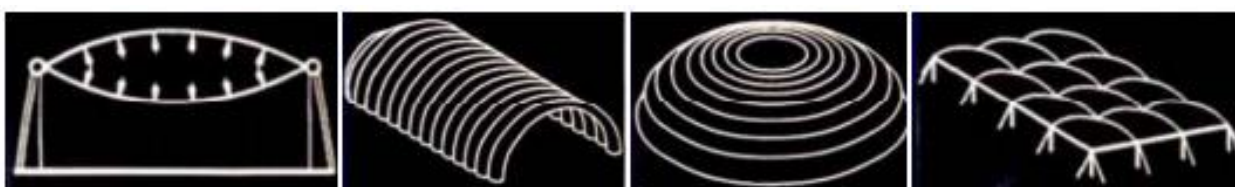
Las estructuras de volumen de gas completo y las estructuras con paredes inflables, se ilustran en la Figura 2.3 y en la Figura 2.4, respectivamente (Basset Salom, 2013):

**Estructuras soportadas por aire:** Son estructuras formadas por una única membrana tensada por una pequeña presión interna (Figura 2.3).



**Figura 2.3. Estructuras soportadas por aire.**

**Estructuras con aire a presión:** Estructuras formadas por elementos tubulares sometidos a presurización, que forman columnas, vigas, marcos, etc. El volumen del espacio cubierto permanece a la presión atmosférica (Figura 2.4).



**Figura 2.4. Estructuras formadas por elementos con aire a presión.**

## 2.3 Capa límite y desprendimiento de la corriente

### 2.3.1 Capa límite

Los dos efectos con mayor influencia en el flujo del aire son los efectos viscosos y los efectos inerciales; y a partir de la relación de estos efectos se obtiene un índice que puede servir para conocer el tipo de características o el tipo de fenómeno que se puede esperar que ocurra al interior del fluido. Este índice o parámetro adimensional,  $R_e$ , es el número de Reynolds que mide la relación de las fuerzas de inercia frente a las fuerzas viscosas:

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>).

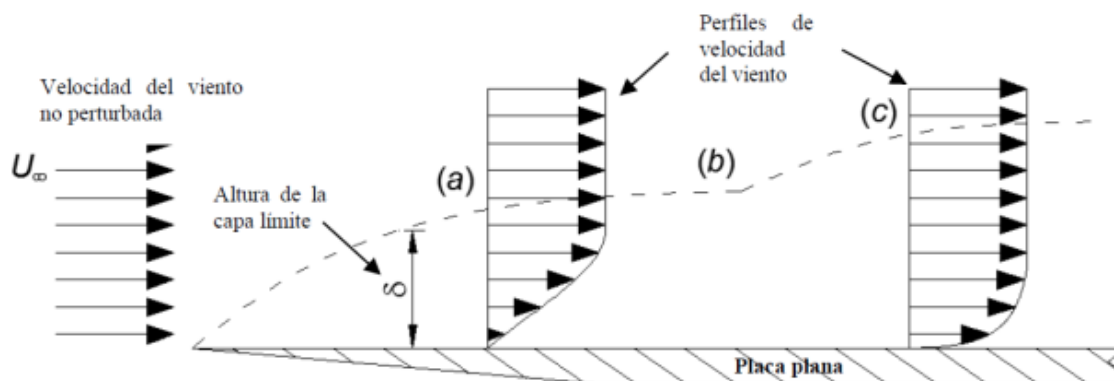
$v$ : Velocidad del fluido (m/s).

$L$ : Longitud característica (m).

$\mu$ : Viscosidad dinámica (kg/(s·m)).

Aunque en un flujo real el efecto de la viscosidad es despreciable en la mayor parte del campo de un fluido, existen siempre zonas en las que este efecto es dominante. Teóricamente, la condición de frontera que se impone justo en la superficie de un cuerpo en contacto con un fluido es la inexistencia de deslizamiento entre las partículas fluidas y el sólido. Debido a esto, existirá una región próxima al cuerpo en la que la velocidad pase de tener valor nulo en la pared, al valor correspondiente de la corriente exterior. En esta zona existen gradientes de velocidad grandes y como consecuencia los efectos viscosos son importantes. Esta zona próxima al cuerpo, se conoce con el nombre de capa límite (White, 2010).

En la Figura 2.5 se muestra el desarrollo de una capa límite sobre una placa plana paralela a la corriente incidente. La capa límite nace laminar (a) y recorrida una distancia se produce la transición de régimen laminar a régimen turbulento (b) y se transforma en una capa límite turbulenta (c) (Meseguer, et al., 2001).



**Figura 2.5. Desarrollo de la capa límite y sus transiciones.**

Debido a la aproximación asintótica que existe entre la velocidad cercana al cuerpo y la velocidad del flujo libre, en la literatura se ha definido como altura de la capa límite a la distancia entre la pared y la altura en donde la velocidad es igual al 99% de la velocidad del flujo libre.

En una capa límite adherida, la presión es constante a lo largo de rectas perpendiculares a la superficie del obstáculo y adicionalmente, toda capa límite se ensancha según avanza sobre la superficie de un obstáculo, este ensanchamiento es debido a dos fenómenos, los de fricción y a los gradientes de presiones (Meseguer, et al., 2001).

En el caso de las fuerzas de fricción, cada lámina del fluido dentro de la capa límite decelera por viscosidad a la lámina inmediata exterior y a su vez es decelerada por la lámina inmediata anterior.

### **2.3.2 Desprendimiento de la corriente**

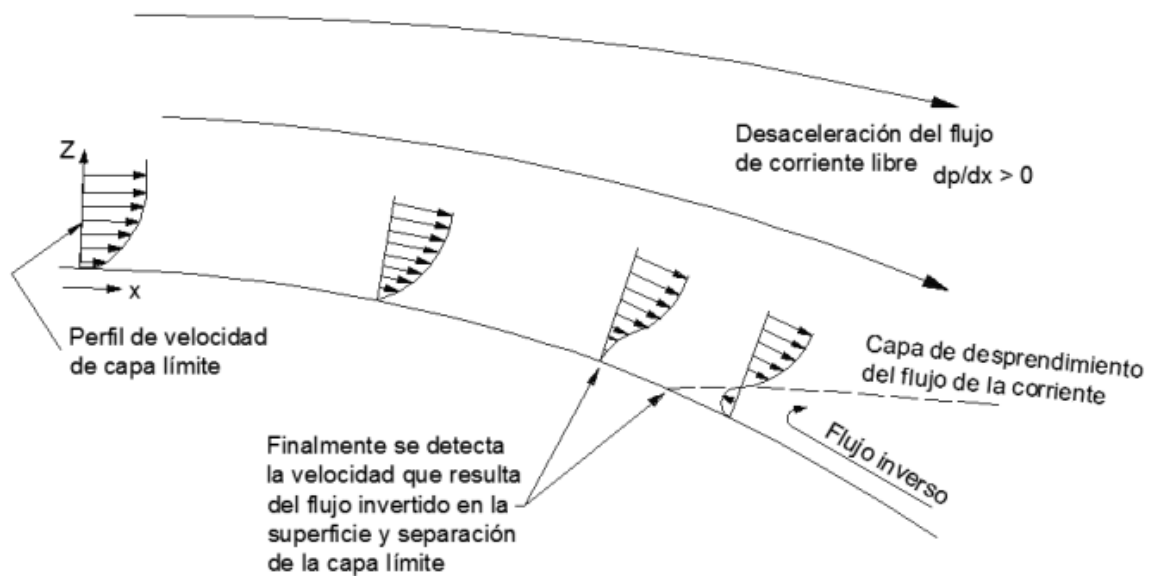
El desprendimiento de la capa límite ocurre cuando la porción de la capa límite más cercana a una pared revierte la dirección de su flujo, dando origen a una región separada o también conocida como recirculante.

Un motivo del posible desprendimiento de la capa límite, es que depende del campo de presiones que va encontrando la capa en su avance a lo largo de la superficie del cuerpo con el que ha entrado en contacto. Un escenario es que la presión vaya disminuyendo al avanzar, lo que se denomina gradiente favorable de presiones, o que aumente a lo largo del recorrido, esta condición se denomina gradiente adverso. En el caso de una capa límite que avanza en presencia de un gradiente adverso de presión, la pérdida de cantidad de movimiento se empleará para contrarrestar el rozamiento en la pared y parte en vencer el gradiente adverso de presiones. Por el contrario, cuando el gradiente sea favorable, la capa límite se acelerará y ganará cantidad de movimiento, lo que ayudara a equilibrar el rozamiento en la pared.

A consecuencia de los gradientes adversos de presión en las láminas fluidas más cercanas a la pared, debido a que éstas tienen menor cantidad de movimiento, se deceleran comparativamente más que las que se encuentran alejadas de la pared. A consecuencia de esta deceleración las partículas más próximas terminan por retroceder en vez de avanzar como se muestra en la Figura 2.6, y en la zona en la que ocurre este retroceso la capa límite se dice que se encuentra desprendida.

En el caso de una capa límite laminar, las láminas fluidas se mueven de manera ordenada y entre ellas sólo existen cambios debidos a las fuerzas viscosas, mientras que en las capas límites turbulentas, las partículas se entrecruzan de forma caótica y el intercambio de cantidad de movimiento tiene lugar de manera macroscópica.

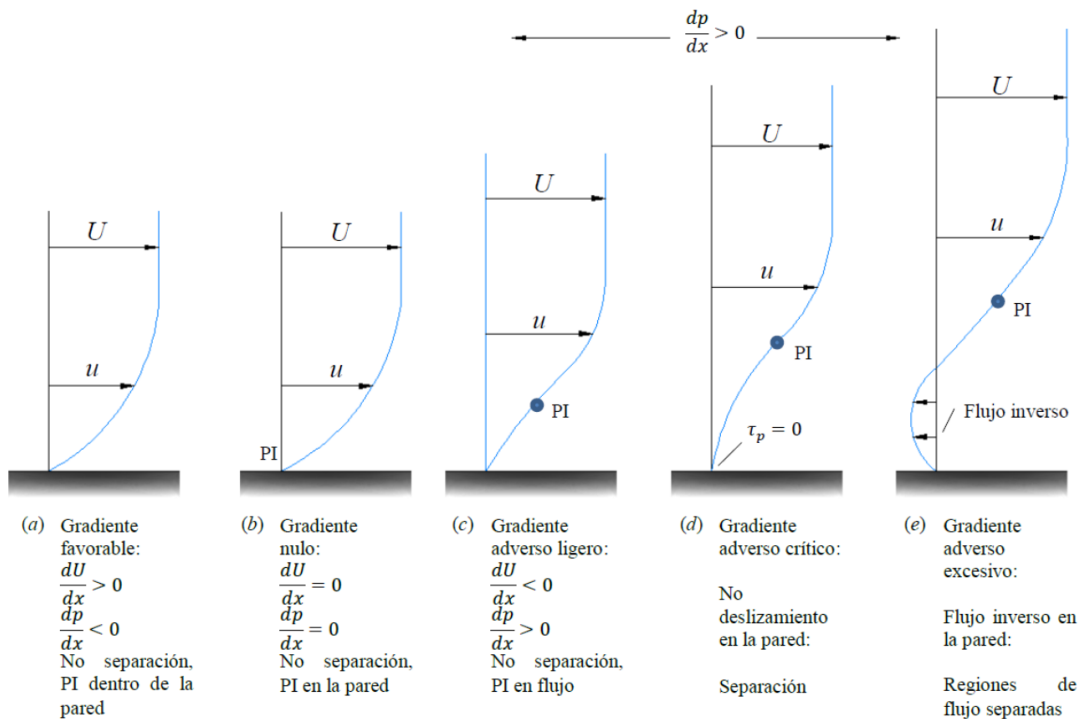
Las capas límites laminares son inestables y sólo se mantienen laminares en las partes próximas a la parte delantera del obstáculo (barlovento), ya que una vez que el fluido entra en contacto con el obstáculo, las perturbaciones introducidas por entrar en contacto con el obstáculo provocan que la capa límite pase a ser turbulenta.



**Figura 2.6. Desprendimiento de capa límite debido a un gradiente de presión adverso.**

En la Figura 2.7(a) se presenta un gradiente favorable, el perfil es convexo y no puede existir separación del flujo. Con un gradiente de presión nulo, el punto de inflexión se encuentra en la pared del cuerpo Figura 2.7(b) y no puede existir separación, el flujo cambiará de régimen a un  $R_e$  no mayor de  $3 \times 10^6$ . Cuando ocurre un gradiente de presión adverso Figura 2.7 (c, d y e), el punto de inflexión se encuentra en la capa límite. Para la Figura 2.7(c), el flujo todavía no se ha desprendido, pero se encuentra susceptible a un cambio de régimen a un número de Reynolds en el orden de  $10^5$ . Con un gradiente adverso moderado se alcanza una condición crítica Figura 2.7(d) donde

el cortante en la pared es exactamente cero, esta condición es denominada punto de separación, ya que cualquier gradiente de mayor magnitud a este causará recirculación en el flujo Figura 2.7(e) (White, 2010).



**Figura 2.7. Efectos del gradiente de presiones sobre la capa límite (White, 2010).**

Los perfiles de flujo mostrados en la Figura 2.7 usualmente ocurren en secuencia a medida que se progresa a lo largo de la pared de un cuerpo.

## 2.4 Antecedentes de CFD en la ingeniería eólica

En los últimos 50 años, la utilización de CFD en la ingeniería eólica ha llevado a una exitosa transición; de ser un campo de estudio emergente, a convertirse en un campo de estudio establecido en la investigación, en la práctica y en la educación. (Blocken, 2014). La diferencia en tiempo de los primeros desarrollos en CFD en los años 50's y su posterior aplicación en la ingeniería eólica para obtener la distribución de velocidades y presiones alrededor de estructuras, se atribuye a las dificultades específicas asociadas a los flujos en torno a cuerpos de obstrucción, es decir:

1. Números de Reynolds altos, que hacen necesaria la utilización de mallas más finas.
2. La naturaleza compleja de flujos tridimensionales.
3. Las dificultades numéricas asociadas a flujos en puntos de cambio brusco de geometría.

Por esto, la aplicación de CFD es complementaria a otras áreas más tradicionales de la ingeniería eólica, como pueden ser la instrumentación a escala real y la realización de pruebas a escala reducida en túneles de viento. Sin embargo, la utilización de CFD tiene ventajas particulares sobre pruebas experimentales, ya que puede proveer de información relevante en todo el dominio del fluido, en condiciones controladas y sin restricciones de similitud. Sin embargo, la precisión y confiabilidad de las simulaciones mediante CFD siguen siendo causa de preocupación y por lo tanto la verificación y validación de resultados sigue siendo de gran importancia (Blocken, 2014).

Para una simulación típica, el usuario tiene que seleccionar las variables a estudiar, la forma aproximada de las ecuaciones de gobierno, el modelo de turbulencia, el dominio computacional, la malla computacional, las condiciones de frontera, los esquemas de discretización y criterios de convergencia, entre otros. Esto hace explícita la necesidad de guías o manuales para la utilización adecuada de CFD en la ingeniería eólica. Un documento aplicable a estas necesidades fue publicado en 2008, el "AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings" (Tamura, et al., 2008), en el cual se describe la importancia de los análisis transitorios en la estimación de cargas en edificios y estructuras.



En el año 2000, un grupo del ERCOFTAC (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion) interesado en la calidad y confiabilidad de CFD en la industria, publicó una guía extensiva de mejores prácticas para usuarios de CFD (Casey & Wintergrete, 2000) y aunque no fueron específicamente redactadas para la ingeniería eólica, muchos de los criterios son aplicables para simulaciones típicas en ésta.

Franke et al (2004), compilaron un conjunto de recomendaciones para el uso de CFD en ingeniería eólica, como resultado de un estudio detallado de la literatura existente a esa fecha. Estas recomendaciones han sido actualizadas como “Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment” en 2007 y 2011 (Franke, et al., 2011). De este documento se concluye que en la utilización de herramientas CFD, ya sean de código abierto o comercial, es importante que el código esté bien documentado y que estudios básicos de verificación y validación hayan sido realizados y reportados.

En las últimas décadas, se han hecho declaraciones sobre el posible reemplazo de pruebas a escala en túneles de viento por la utilización de CFD, convirtiendo a éste en un “túnel de viento numérico (Stathopoulos, 2002).

## **2.5 Ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos**

La problemática a resolver en las simulaciones CFD se tiene en el nivel del medio continuo, antes de haber realizado la discretización de la aproximación numérica. En un problema clásico, esta parte corresponde al conjunto de ecuaciones diferenciales y condiciones de frontera que describen el sistema.

Las ecuaciones de conservación se pueden expresar de dos maneras distintas. La primera considera el movimiento de todas las partículas que pasan a través de un volumen fijo en el espacio. Esta descripción es típicamente usada en la Mecánica de Fluidos, donde el interés recae en propiedades como velocidad, presión y temperatura, entre otros, que poseen las partículas que pasan por ese volumen en un instante determinado. Esta descripción es conocida como la descripción Euleriana.

El flujo de un fluido es descrito por ecuaciones diferenciales que representan la relación entre las variables de flujo y su evolución en el tiempo y espacio. Las leyes del movimiento (masa, momento y conservación de energía) que aplican a sólidos continuos son válidas para todas las materias, incluidos los fluidos y entre ellos, los gases. Sin embargo, la principal propiedad que distingue a un fluido de un sólido es su incapacidad de resistir esfuerzos cortantes cuando se encuentra en reposo.

Estos principios pueden traducirse a un conjunto de ecuaciones llamadas de Navier-Stokes que, junto con las ecuaciones de estado del fluido, permiten calcular las tres componentes de velocidad, la presión, la temperatura y la densidad en todo el dominio de estudio (White, 2010).

Estas ecuaciones son:

- Ecuación de conservación de la masa o continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_m \quad \text{Ec. 2.2}$$

- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

$\rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$  : Fuerzas de cuerpo       $E$ : Energía

$t$ : Tiempo       $J_j$ : Difusión de flujo

$S_m$ : Masa agregada

Para resolver de forma numérica este sistema de ecuaciones diferenciales, es necesario realizar dos pasos complementarios:

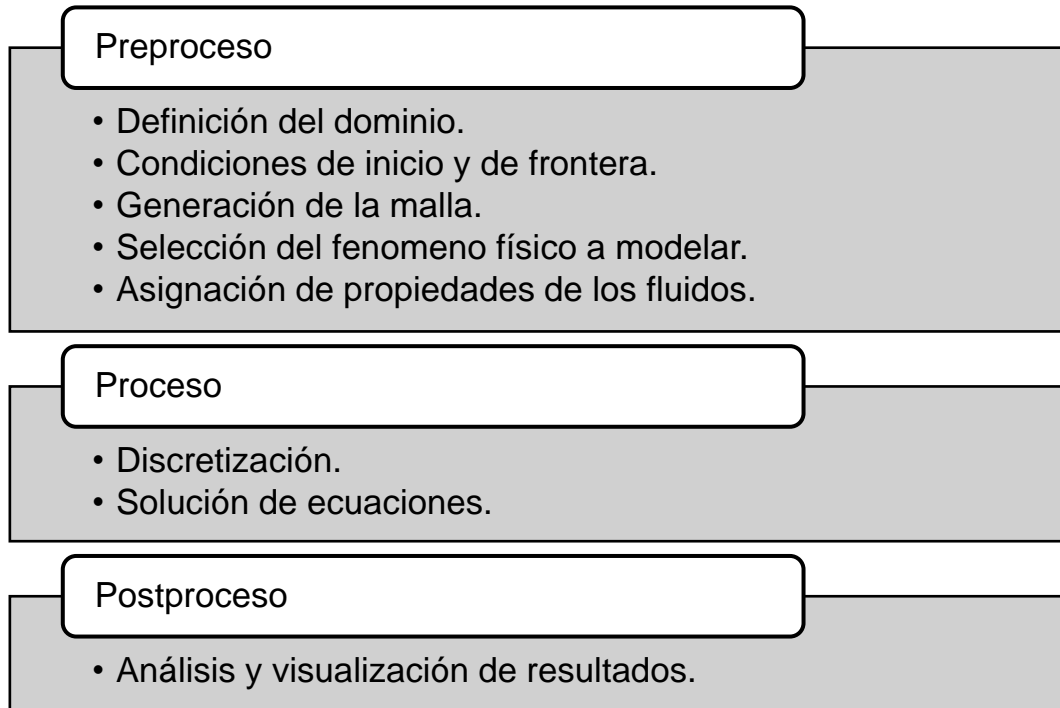
1. La discretización del dominio donde se aplicarán las ecuaciones.
2. La conversión de las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas discretas.

La solución de las ecuaciones discretas será aproximada a la solución cerrada de las ecuaciones de Navier-Stokes, esto es debido al grado de aproximación de las ecuaciones algebraicas discretas.

## **2.6 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**

La dinámica de fluidos computacional o CFD, por sus siglas en inglés, es el análisis de sistemas que involucran el flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados mediante simulaciones por computadora. Esta técnica es potente y abarca una gran gama de aplicaciones. El objetivo es encontrar una solución aproximada a las ecuaciones que rigen el comportamiento de fluidos, a través de la discretización y resolución de estas ecuaciones para pequeños elementos que en conjunto permite representar el fluido en su totalidad (Versteeg & Malalasekera, 2007). Los resultados obtenidos mediante CFD son directamente análogos a los obtenidos en un túnel aerodinámico de laboratorio, ambos representan conjuntos de datos para fluidos con diversas configuraciones (Anderson, 1995).

Los códigos de CFD están estructurados alrededor de algoritmos numéricos que pueden resolver problemas de flujo de fluidos. Con la finalidad de ser accesibles a los usuarios, todos los softwares de CFD comercial incluyen interfaces gráficas para la introducción de parámetros del problema y para examinar los resultados. Así, todos contienen tres componentes principales: Preproceso, Proceso y Postproceso (Versteeg & Malalasekera, 2007). A continuación, se examina brevemente la función de cada uno de estos elementos en el contexto de CFD (Figura 2.8).



**Figura 2.8. Proceso de solución por medio de CFD.**

En las siguientes secciones se discutirán los temas necesarios para una correcta simulación mediante CFD, estos temas se encuentran en el orden que se presentan durante la preparación de una simulación.

### **2.6.1 Preproceso**

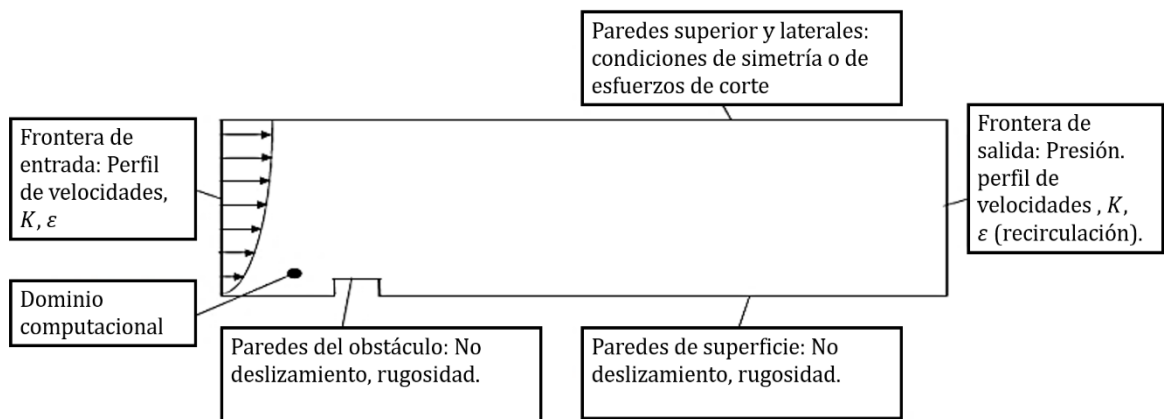
El preproceso consiste en los datos de entrada a un programa de CFD para la subsecuente utilización por el procesador.

#### **2.6.1.1 Definición del dominio**

Una estructura interactúa con el flujo de aire a su alrededor en una región cercana a ésta. Para determinar el campo de flujo alrededor de la estructura, es importante determinar el área en la cual el flujo es afectado por la presencia de la estructura. En las fronteras de esta área se proporcionan condiciones de frontera que son requeridas para el proceso de solución.

### 2.6.1.2 Condiciones de inicio y de frontera

Una vez que se ha delimitado el dominio de estudio, se debe prestar atención a las condiciones iniciales y de frontera de la simulación, ya que se ha observado que las simulaciones mediante CFD son bastante sensibles con respecto a estas condiciones. En el caso de simulaciones de estado continuo, únicamente es necesaria la utilización de condiciones de frontera. Para un caso de simulación en 3D, el dominio tiene por lo menos 6 fronteras en las cuales es necesario proporcionar condiciones adecuadas. A manera de ejemplo en la Figura 2.9 se presentan el conjunto de valores necesarios en las condiciones iniciales y de frontera (Blocken, 2009).



**Figura 2.9. Condiciones Iniciales y de Frontera en CFD.**

### 2.6.1.3 Construcción de la malla

Independientemente del método, el dominio es dividido en un número finito de puntos. Dependiendo del método de discretización, estos puntos son utilizados para la creación de una malla de puntos, elementos o volúmenes. Adicionalmente, existen otros aspectos que tienen influencia en la construcción de esta malla. Éstos pueden ser el costo computacional, las características del flujo y la topología del dominio.

Todos los problemas de flujo de fluidos tendrán una variedad de características en el dominio. Aspectos como vórtices, capas límite, regiones con altos gradientes de presiones y velocidades, y regiones de separación, toman un papel importante en la construcción de la malla de cada problema en particular. Una malla debe ser diseñada

de tal manera que la simulación pueda tomar en cuenta estas características. Por ejemplo, en zonas donde existirán gradientes altos, la malla debe de tener requerimientos diferentes que en zonas donde los gradientes serán bajos. Las zonas críticas del dominio computacional requieren un gran número de puntos para describir el proceso de manera precisa.

Como ejemplo ilustrativo, en la Figura 2.10 se muestran soluciones obtenidas para una variable en una dimensión, la figura presenta una solución exacta y aproximaciones para mallados gruesos y finos. Se puede observar que la descripción numérica de la variable presenta una mejor aproximación a mayor cantidad de puntos conocidos.

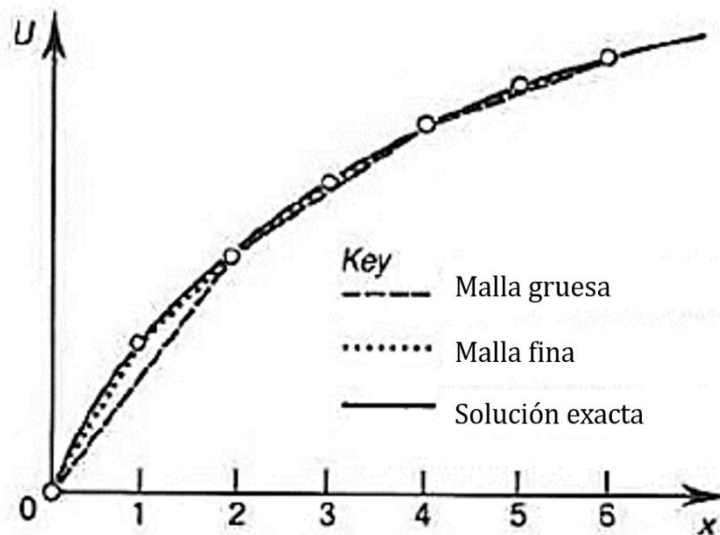


Figura 2.10. Ilustración del efecto de la discretización (Hunte, 2010)

#### 2.6.1.4 Selección del fenómeno físico a modelar.

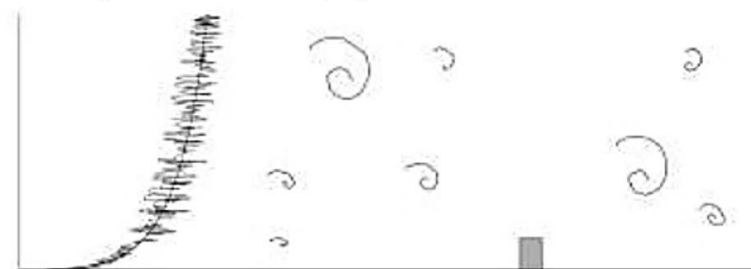
La selección del fenómeno físico a modelar se refiere a la transformación de la realidad física a un sistema de ecuaciones a las cuales mediante técnicas de análisis matemático se puede obtener el comportamiento del fenómeno físico.

En flujos turbulentos, escalas grandes y pequeñas de energía son mezcladas. Teóricamente, es posible resolver de manera directa todas las escalas del dominio del

fluido. En estos casos es necesaria la utilización del método llamado Simulación Numérica Directa (DNS). Sin embargo, en general, el problema resultante es más grande que lo que es posible resolver utilizando computadoras modernas. Así, sólo ciertas características del fluido pueden ser modeladas. Dos de los métodos más utilizados capaces de modelar las características de turbulencia de un fluido son el método Large Eddy Simulation (LES) y las ecuaciones Promedios de Reynolds de Navier-Stokes (RANS). Ambos métodos modelan la inestabilidad del flujo o parte de ésta y simulan el resto. En la Figura 2.11 (Nalta, 2004), se ilustra la diferencia entre los tres métodos. En el presenta trabajo se utilizó el método RANS, principalmente para evitar que el costo computacional sea un factor importante en la simulación, debido a que al utilizar modelos más complejos se incrementa de manera significativa el tiempo de análisis.



DNS. Dependiente del tiempo y todas las escalas de turbulencia



LES. Dependiente del tiempo y escala de turbulencia grandes



RANS. Flujo medio, sin escalas de turbulencia.

**Figura 2.11. Los tres métodos comunes en la simulación CFD.**

El método RANS, es el método de aproximación más antiguo para el modelado de turbulencia. El objetivo es separar la influencia de la parte media y la parte fluctuante de los parámetros para poder modelar la influencia de la parte fluctuante en el flujo medio. En las ecuaciones 2.5 y 2.6 esto es expresado para los términos de velocidad y presión.

$$\mathbf{V} = \bar{\mathbf{V}} + v \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$\mathbf{P} = \bar{P} + p \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

$\bar{\mathbf{V}}$ : la componente media de la velocidad.

$v$ : la componente fluctuante de la velocidad.

$\bar{P}$ : la componente media de la presión.

$p$ : la componente fluctuante de la presión.

El uso de esta suposición introduce nuevos términos que son producto de la componente fluctuante de la velocidad a las ecuaciones de Navier Stokes, estos términos son conocidos como esfuerzos de Reynolds.

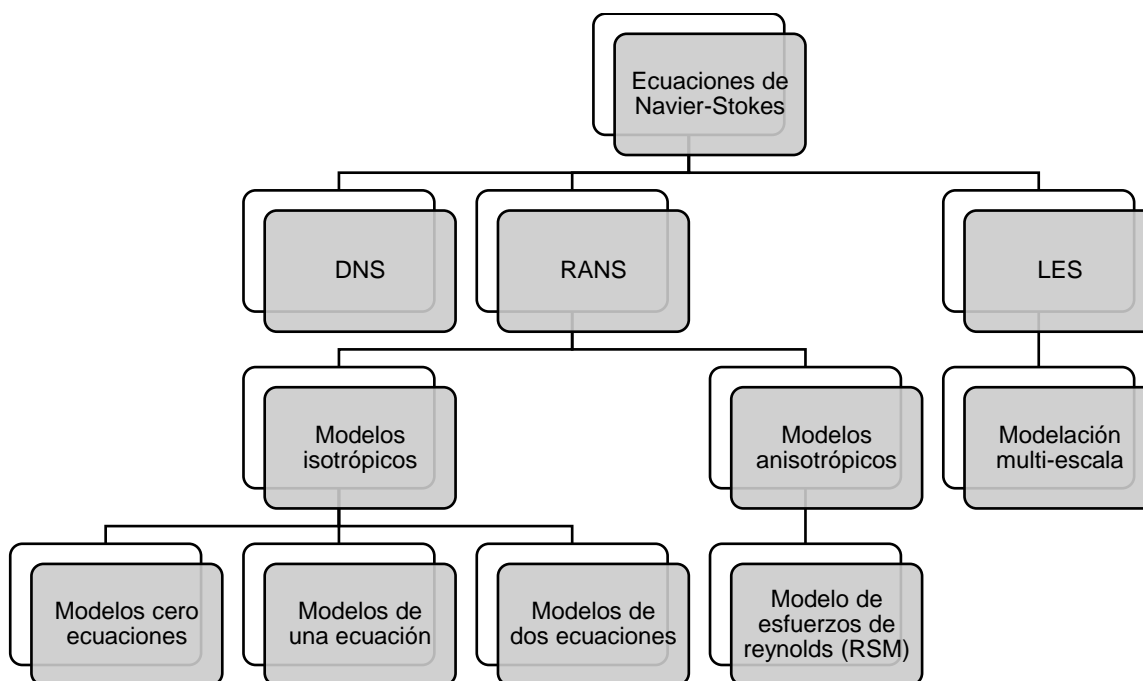
Para poder resolver este problema matemático, se requiere la introducción de ecuaciones de gobierno adicionales. El número de ecuaciones adicionales debe ser igual al número de variables desconocidas. Sin embargo, estas ecuaciones adicionales siempre introducen más variables desconocidas. Tratar de resolver este problema es conocido como modelado de turbulencia. Para el método de RANS, han sido desarrollados diversos enfoques. Entre más ecuaciones sean utilizadas para modelar los esfuerzos de Reynolds, resulta en un costo computacional mayor.



### 2.6.1.5 Modelado de la turbulencia

Cuando es utilizado el modelo RANS, existen dos enfoques que pueden ser desarrollados. Un enfoque utiliza relaciones isotrópicas para ligar los esfuerzos de Reynolds y las velocidades medias y el segundo enfoque denominado anisotrópico, trata de resolver la ecuación de transporte de los esfuerzos de Reynolds y modela los esfuerzos de orden superior. La Figura 2.12 muestra los enfoques más comúnmente utilizados para modelar la turbulencia (Amaya Gallardo, 2015).

Los enfoques isotrópicos son también conocidos como modelado de dos ecuaciones y relaciona la viscosidad de remolinos a dos valores escalares que son representativos de la turbulencia en el flujo. El enfoque anisotrópico trata de resolver una ecuación de transporte por cada uno de los esfuerzos de Reynolds. Esto introduce ecuaciones de transporte para todos los esfuerzos de Reynolds y hace que esta metodología sea altamente costosa en costo computacional.



**Figura 2.12. Los enfoques más utilizados para modelar turbulencia (Hunte, 2010).**

En este trabajo de investigación se utilizaron únicamente modelos isotrópicos de turbulencia, en específico el modelo  $k - \varepsilon$ .

### 2.6.1.5.1 Modelo $k - \varepsilon$

El modelo  $k - \varepsilon$  estándar es un ejemplo típico de un modelo de dos ecuaciones para la turbulencia. En este caso, se utiliza una ecuación para obtener la energía cinética de turbulencia designada con la variable  $k$  y otra ecuación para obtener la disipación de la turbulencia, designada con la variable  $\varepsilon$ . Ambas ecuaciones son utilizadas para determinar la viscosidad de vórtices asociadas a los esfuerzos de Reynolds.

### 2.6.1.6 Definición de las propiedades del fluido

Esta etapa se refiere a la asignación de propiedades necesarias para análisis de flujos de fluidos, algunas de estas propiedades se presentan en la Tabla 2.1.

Símbolo	Descripción	Unidades
$\gamma$	Compresibilidad	$[F]/[L]^2$
$\mu$	Viscosidad absoluta	$[M]/([L] - [T])$
$\rho$	Densidad	$[M]/[L]^3$
$D$	Difusividad	$[L]^2/[T]$

**Tabla 2.1 Propiedades básicas de un fluido.**

### 2.6.2 Proceso

Esta etapa se refiere al conjunto de algoritmos numéricos utilizados en CFD para la discretización y solución del problema modelado.

#### 2.6.2.1 Discretización

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones continuas, estas ecuaciones pueden ser utilizadas para calcular los valores para un número infinito de puntos en el espacio. Sin embargo, para hacer posible la utilización de estas ecuaciones mediante una computadora, se requiere describir estas ecuaciones continuas por medio de

ecuaciones algebraicas discretas. El proceso de transformación de ecuaciones continuas a ecuaciones discretas es llamado discretización.

Dependiendo del método utilizado para la discretización, el dominio computacional es dividido en un número finito de puntos, elementos o volúmenes. Para cada punto, elemento o volumen del dominio computacional, se obtienen las ecuaciones básicas. Subsecuentemente, estas ecuaciones son resueltas para condiciones de frontera e iniciales otorgadas al dominio.

La discretización numérica de las ecuaciones diferenciales determina el valor de los parámetros en todos los puntos relevantes de la malla. En esencia, las ecuaciones de gobierno son convertidas a una forma numérica.

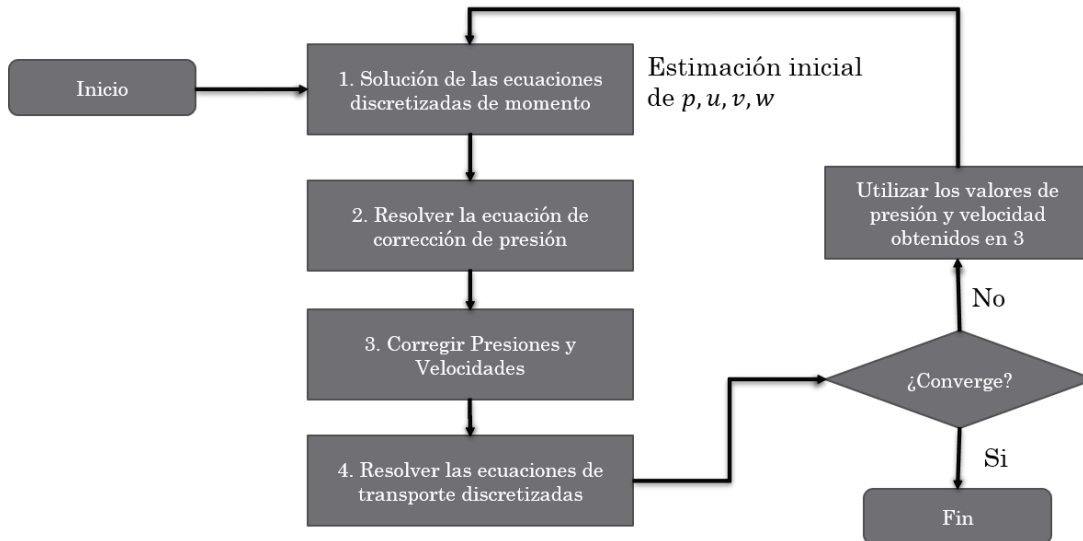
### **2.6.2.2 Solución de ecuaciones**

En esta sección se presentan las principales dificultades en la solución del conjunto de ecuaciones discretizadas de Navier-Stokes. Adicionalmente, se presentan los principales métodos utilizados para resolver estas dificultades y las posibles formas de determinar una solución.

#### **2.6.2.2.1 Solución aproximada**

Para el caso transitorio de las ecuaciones de gobierno, éstas son no lineales en cada paso de tiempo y es necesario transformarlas en un sistema lineal para poder encontrar una solución simultánea. Esta linealización es repetida hasta que los valores convergen. Sólo entonces se puede proseguir al siguiente paso de tiempo. Existen varios procesos iterativos que son parte de este proceso, el cual es ejemplificado en la Figura 2.13 (Blocken, 2009) con el algoritmo SIMPLE.

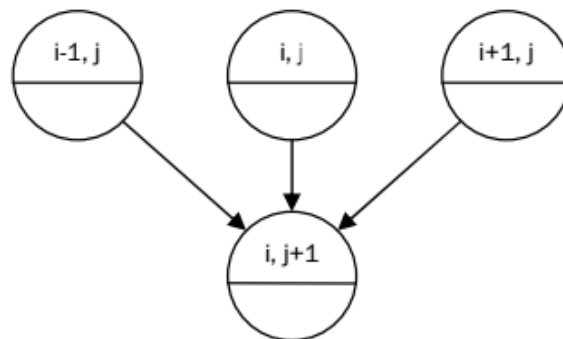
Puede existir un ciclo adicional al mostrado, que consiste en la iteración en los pasos de tiempo. El ciclo de iteración mostrado resuelve la no linealidad en las ecuaciones, y este ciclo a su vez puede contener un ciclo donde son utilizados métodos iterativos para la solución de las ecuaciones generadas.



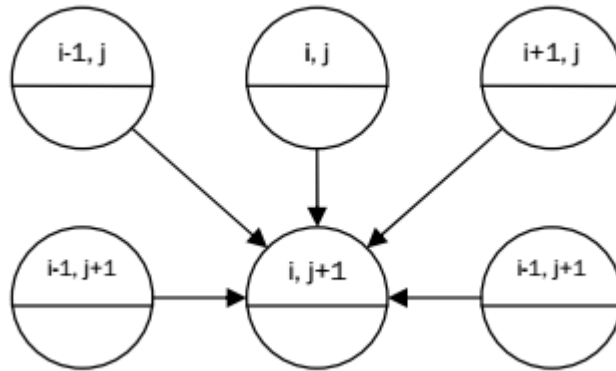
**Figura 2.13. Proceso iterativo de solución mediante algoritmo SIMPLE.**

#### 2.6.2.2.2 Soluciones explícitas vs implícitas

La solución numérica de un problema puede ser determinada de dos formas. Cuando una variable desconocida es encontrada de manera directa a partir de valores conocidos, el proceso es llamado explícito. De otra forma, si la discretización produce una ecuación en la cual se utilizan variables desconocidas y conocidas para la obtención de otras variables desconocidas, el proceso es llamado implícito. La Figura 2.14 y la Figura 2.15 ilustran estos conceptos.



**Figura 2.14. Esquema explícito.**



**Figura 2.15. Esquema implícito.**

Aunque pareciera que los esquemas implícitos requieren mayor esfuerzo para producir una solución que los esquemas explícitos, la estabilidad de los esquemas implícitos hace favorable el uso de éstos.

#### **2.6.2.2.3 Estabilidad y convergencia**

Al encontrar una solución aproximada a un problema numérico, surge la importante pregunta de cuándo es la solución adecuada. La búsqueda de una solución adecuada puede requerir una gran cantidad de iteraciones para incrementar la precisión. Para un problema numérico, la convergencia y la estabilidad son dos conceptos importantes con respecto al número de iteraciones. Para evitar costos computacionales excesivos, la tasa de convergencia es un importante factor para el éxito del método numérico.

### **2.6.3 Postproceso**

Las tareas del postproceso están basadas en la interpretación gráfica de los resultados:

- Visualización de la geometría y de la malla
- Gráficos de vectores
- Gráficos de contorno
- Animación de resultados

## **2.7 Conclusiones del marco teórico**

De lo expuesto en secciones anteriores se observó que la dinámica de fluidos computacional ha recibido una aceptación creciente en su aplicación en la ingeniería eólica, como lo puede ser en la obtención de distribuciones de presiones medias sobre estructuras. Sin embargo, debido a la variación que existe al utilizar diferentes modelos de turbulencia, la validación de los modelos computacionales realizados mediante comparación con datos experimentales continúa siendo de gran importancia.

En el estudio de estructuras fuseladas, es necesario prestar atención al régimen del fluido, debido a la influencia que este tiene en el comportamiento de las capas límite en las paredes de estos cuerpos.

Para la elaboración de modelos computacionales en la dinámica de fluidos computacional mediante el enfoque RANS, existen parámetros que son de gran importancia y que impactan directamente en los resultados que se pueden obtener, estos son: la malla utilizada, las condiciones de frontera, el modelo de turbulencia y los criterios de convergencia.

## CAPÍTULO III.

### METODOLOGÍA

#### 3.1 Introducción

En este capítulo se describen las etapas de preproceso y postproceso mediante CFD de una estructura inflable tipo hangar sometida al flujo del viento. La estructura que se analizó es una estructura inflable formada por tubos tipo H20-Charlie fabricada por BuildAir. Esta estructura tiene la característica de ser modular, por lo cual puede tener longitudes que van de los 13m hasta los 26m dependiendo del uso que se le pretenda dar. Las dimensiones de la estructura utilizada en este trabajo son las siguientes y se presentan en la Figura 3.1:

- $L = 26m$
- $H = 13m$
- $B = 13m$

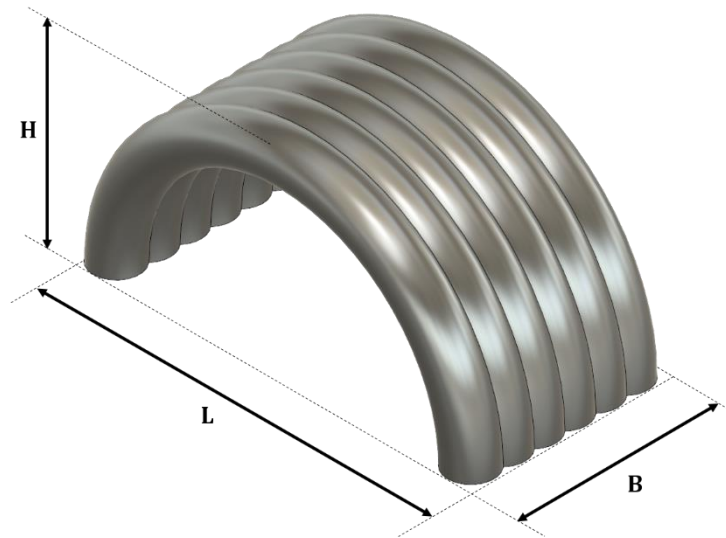
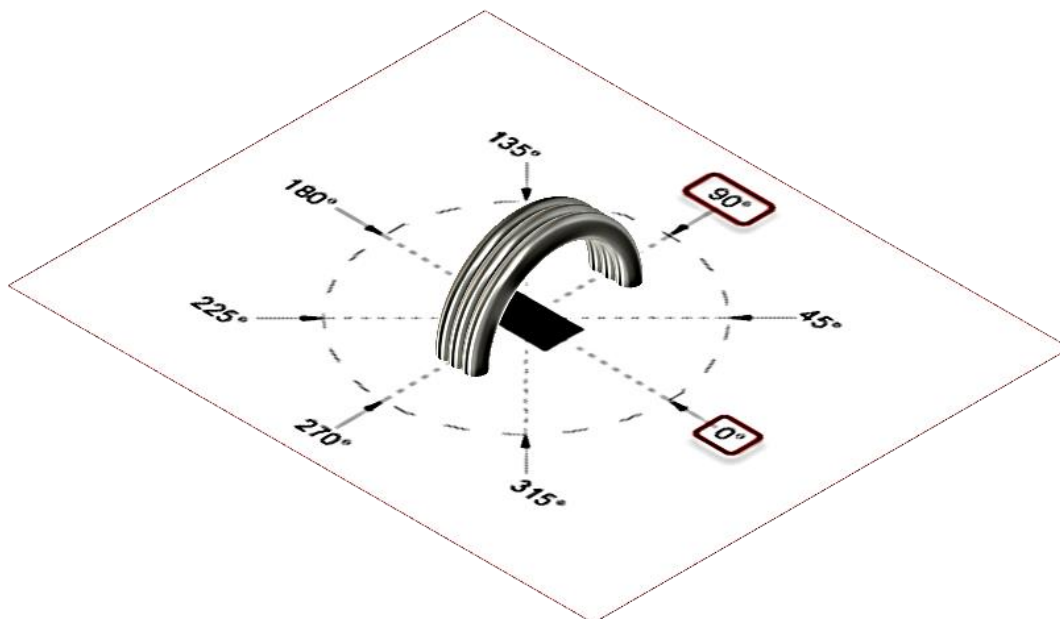


Figura 3.1. Geometría de la estructura inflable.

Las direcciones del flujo estudiadas en este trabajo fueron de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , como se ilustra en la Figura 3.2.



**Figura 3.2. Esquema de los ángulos de la dirección del flujo estudiados sobre la estructura inflable.**

Así mismo, se modelaron las configuraciones abierta y cerrada de la estructura inflable con el fin de conocer las distintas distribuciones de presiones en diferentes condiciones de uso.

El software utilizado fue CFD Motion® de la empresa Autodesk, el cual cuenta con las características necesarias para el estudio que se realizó: desarrollo de modelos tridimensionales, mallado manual y automático de las geometrías del dominio, los modelos más utilizados en el estudio de la aerodinámica de flujos externos y varios esquemas de solución para las ecuaciones de transporte.



## 3.2 Preproceso para el estudio de la estructura inflable

### 3.2.1 Dominio computacional

En esta sección se presenta la descripción de las geometrías utilizadas para el estudio de la acción del viento sobre la estructura inflable. Debido a que la estructura es simétrica en dos planos, se hizo uso de estas simetrías en el modelado de los dominios computacionales. En la Figura 3.3 se muestra una vista lateral de la estructura y en la Figura 3.4, una vista longitudinal de la estructura.

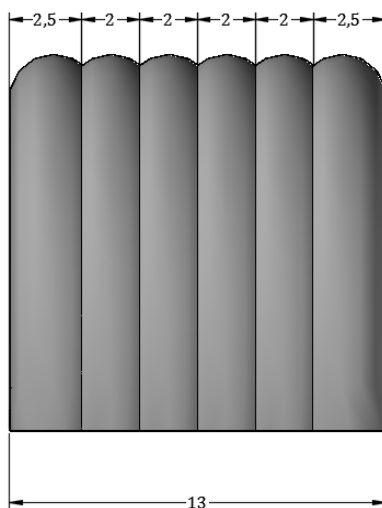


Figura 3.3 Vista lateral de la estructura inflable cerrada, unidades en metros.

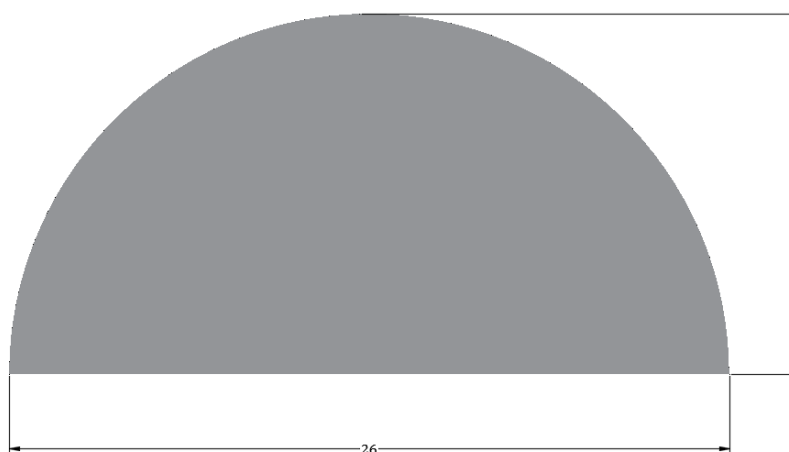
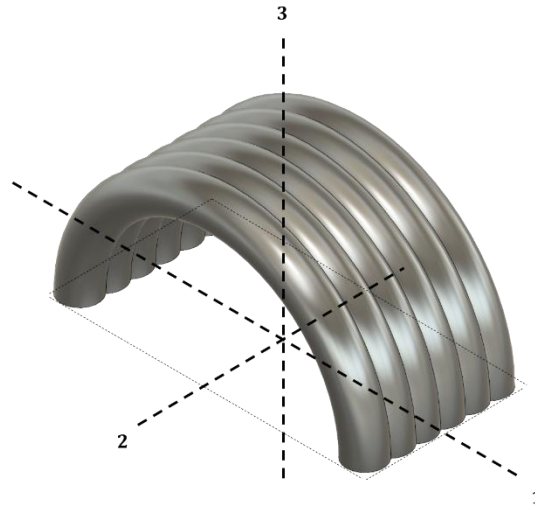


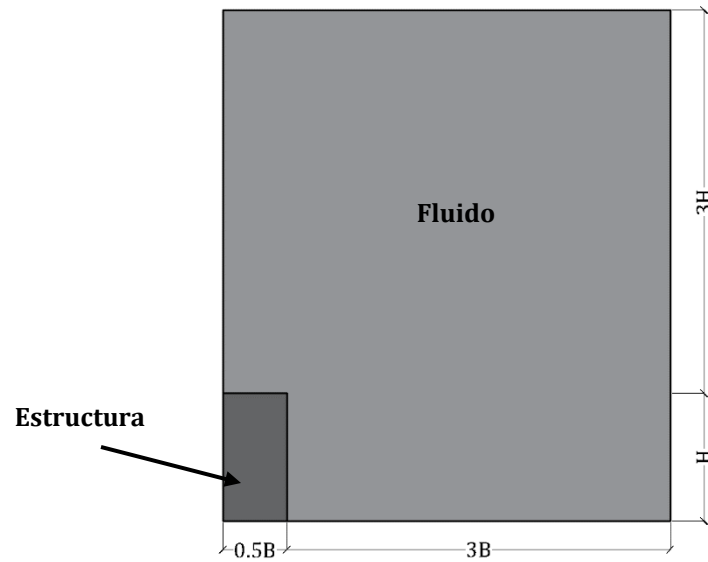
Figura 3.4 Vista frontal de la estructura inflable cerrada, unidades en metros

En la Figura 3.5 se presentan los planos de simetría de la estructura inflable, en el modelado se utilizaron los planos de simetría que se forman con los ejes 1 y 3, y el plano que se forma con los ejes 2 y 3.

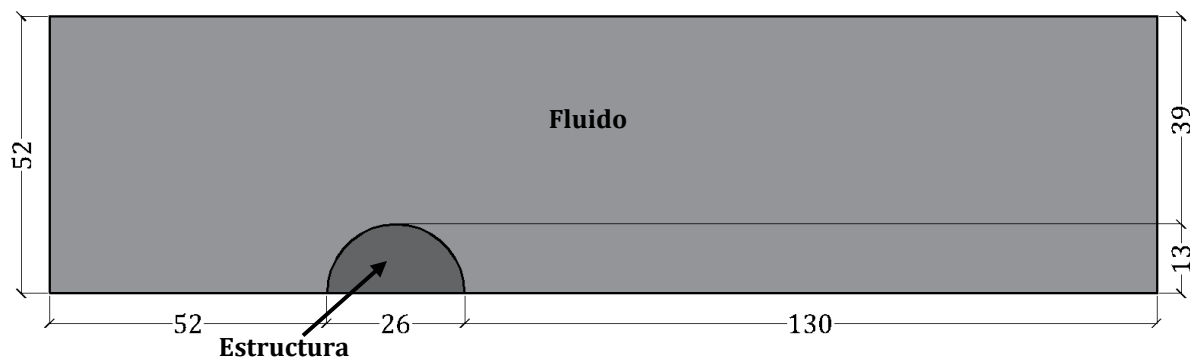


**Figura 3.5. Planos de simetría de la estructura inflable.**

Las dimensiones del dominio del fluido se determinaron a partir de los criterios establecidos en Best Practice Guidelines (Casey & Wintergrete, 2000). Estos criterios permiten que el área que bloquea la estructura sea menor a 5% del área transversal del flujo. Estos criterios se presentan en la Figura 3.6 y en la Figura 3.7 donde B y H representan el ancho y la altura de la estructura real, respectivamente.



**Figura 3.6. Criterio transversal del dominio del fluido.**



**Figura 3.7. Criterio longitudinal del dominio del fluido.**

### 3.2.2 Condiciones de frontera

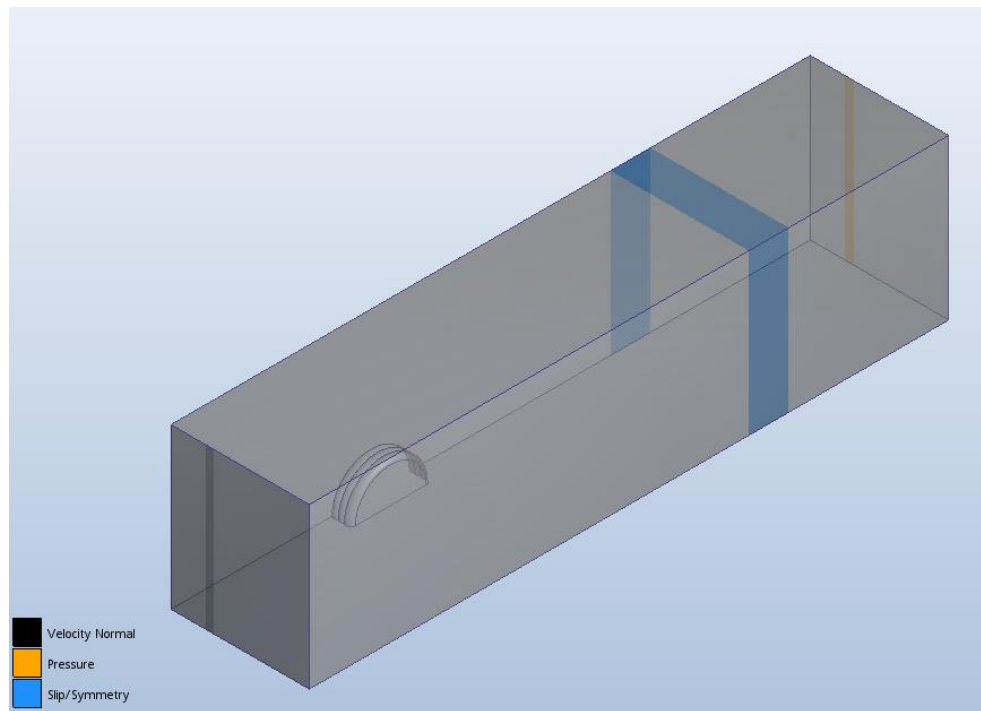
Para el modelado de la estructura, se determinó analizar las distribuciones de presiones en las condiciones abierta y cerrada de la estructura.

Las condiciones de frontera se resumen en la Tabla 3.1 y en las Figuras 3.9 a 3.12.

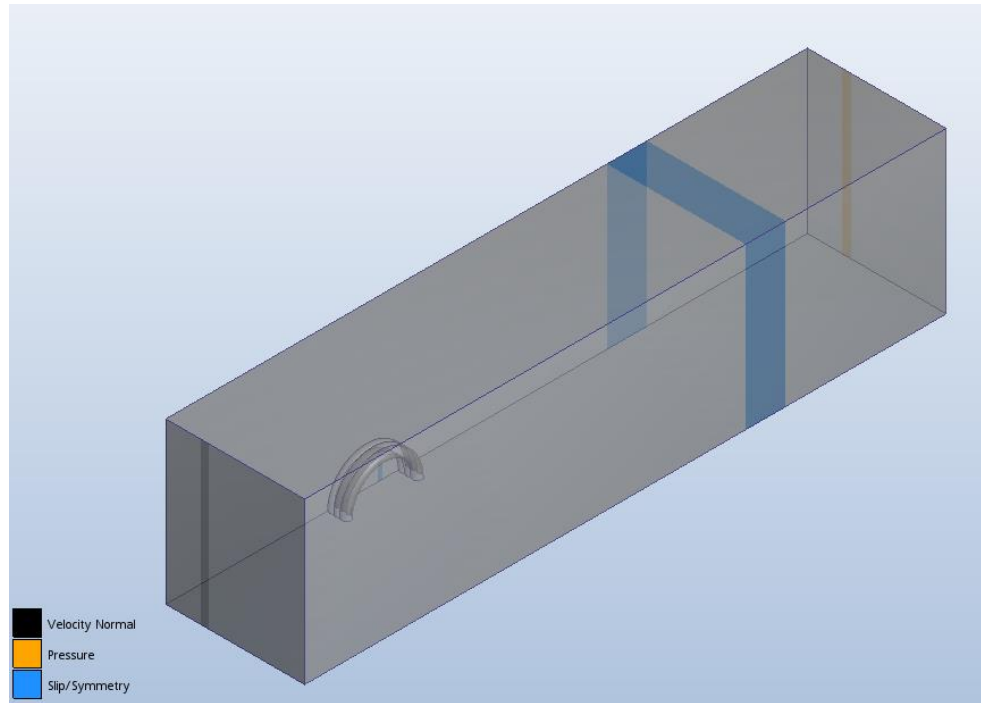
**Tabla 3.1. Resumen de condiciones de frontera aplicadas.**

Condición de Frontera	Valor
Entrada	10 m/s
Salida	0 Pa
Paredes laterales	Deslizamiento/Simetría
Pared superior	Deslizamiento/Simetría
Paredes de la estructura	No deslizamiento

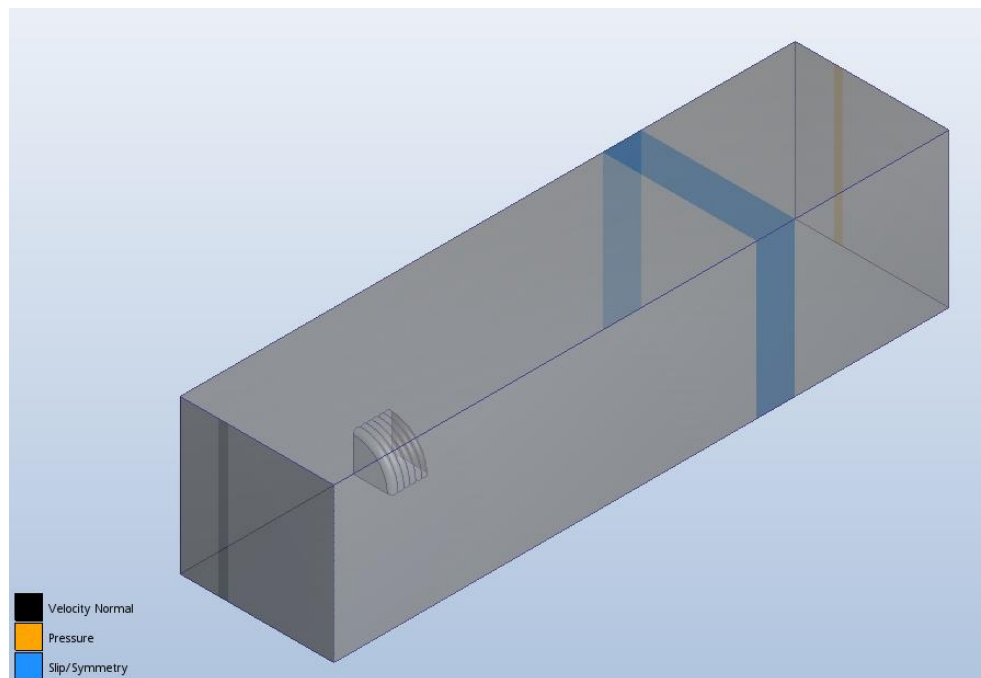
La velocidad de 10 m/s se eligió ya que con esta velocidad se obtiene un mallado de magnitud manejable para el equipo de cómputo utilizado y utilizable para la aplicación de este trabajo.



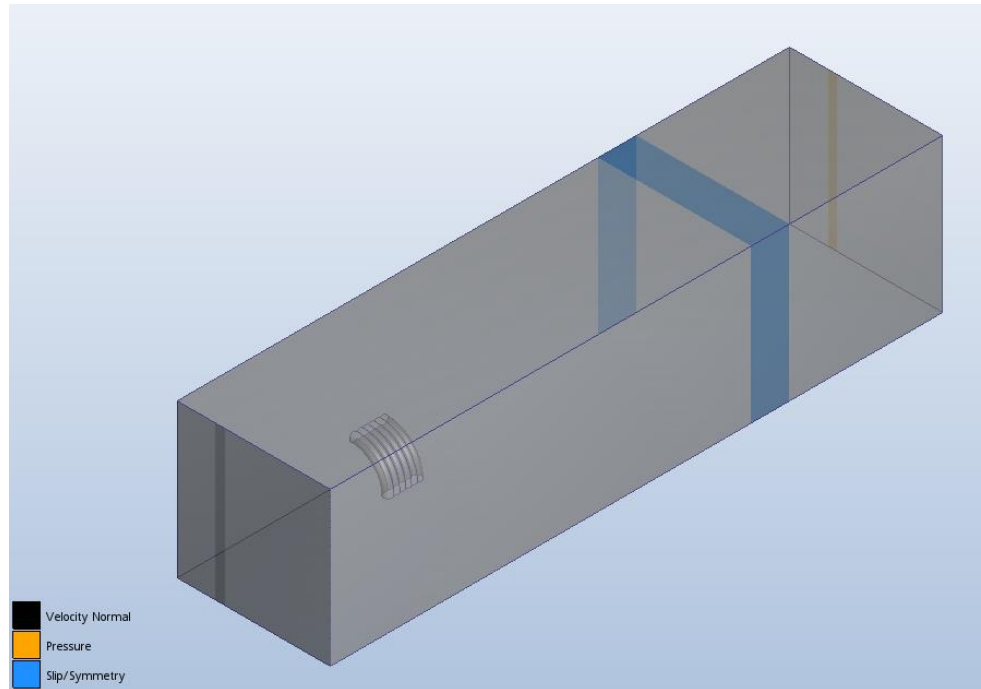
**Figura 3.8. Condiciones de frontera estructura cerrada, dirección del flujo a 90°.**



**Figura 3.9. Condiciones de frontera estructura abierta, dirección del flujo a 90°.**



**Figura 3.10. Condiciones de frontera estructura cerrada, dirección del flujo a 0°.**



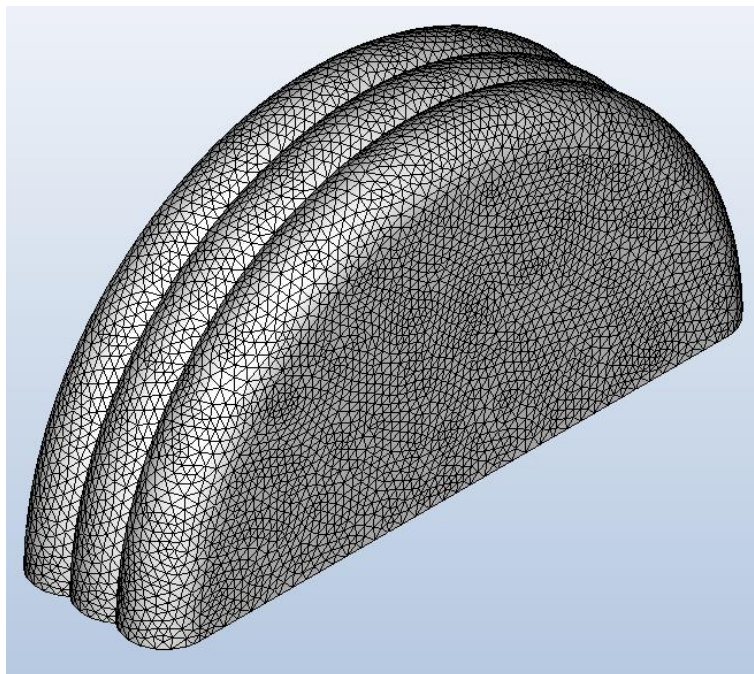
**Figura 3.11. Condiciones de frontera estructura abierta, dirección del flujo a 0°.**

### 3.2.3 Mallado

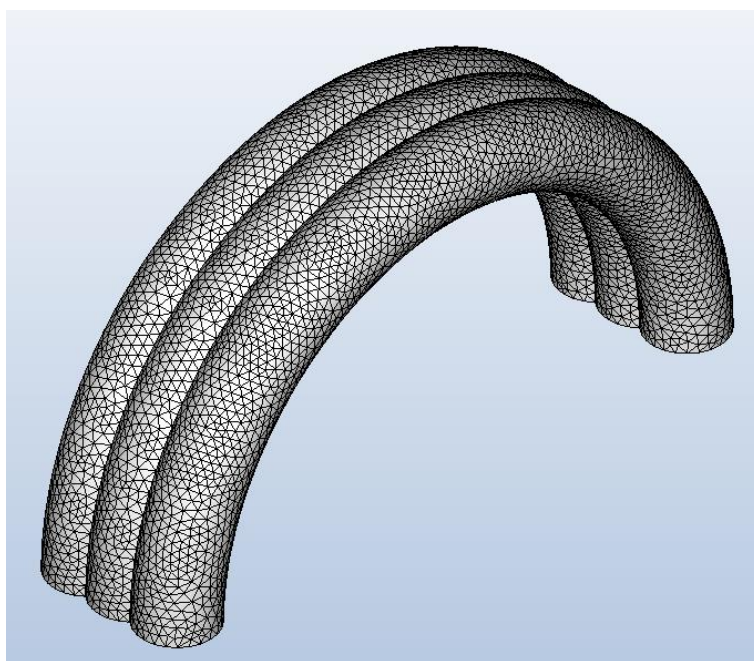
Para el mallado del dominio se utilizaron elementos tetraédricos de 4 nodos con 6 variables por nodo: tres componentes de velocidad:  $u$ ,  $v$  y  $w$ , que corresponden a las velocidades en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , dos variables de turbulencia ( $k$  y  $\varepsilon$ ) asociadas a la energía cinética turbulenta y la disipación de la turbulencia respectivamente, y una variable de presión ( $P$ ).

De un estudio de sensibilidad de la malla se decidió utilizar un tamaño mínimo de 0.3m de la misma en la proximidad de la estructura donde se encuentran los gradientes mayores de presión en todo el dominio, y tamaños mayores a distancias alejadas de la estructura.

En las Figuras 3.13 a 3.16 se presentan los mallados utilizados en la superficie de las estructuras.

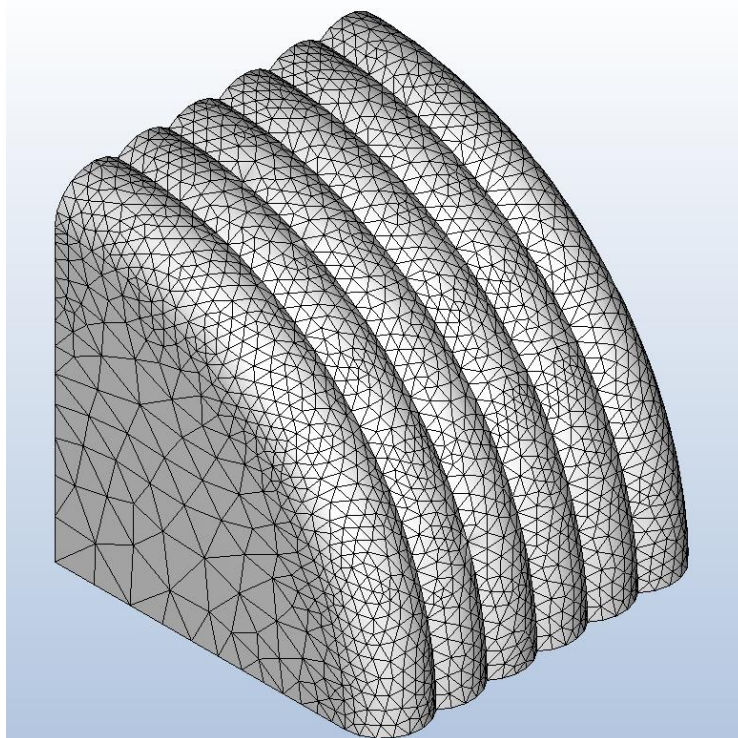


**Figura 3.12. Malla en la superficie: estructura cerrada, dirección del flujo a  $90^\circ$ .**

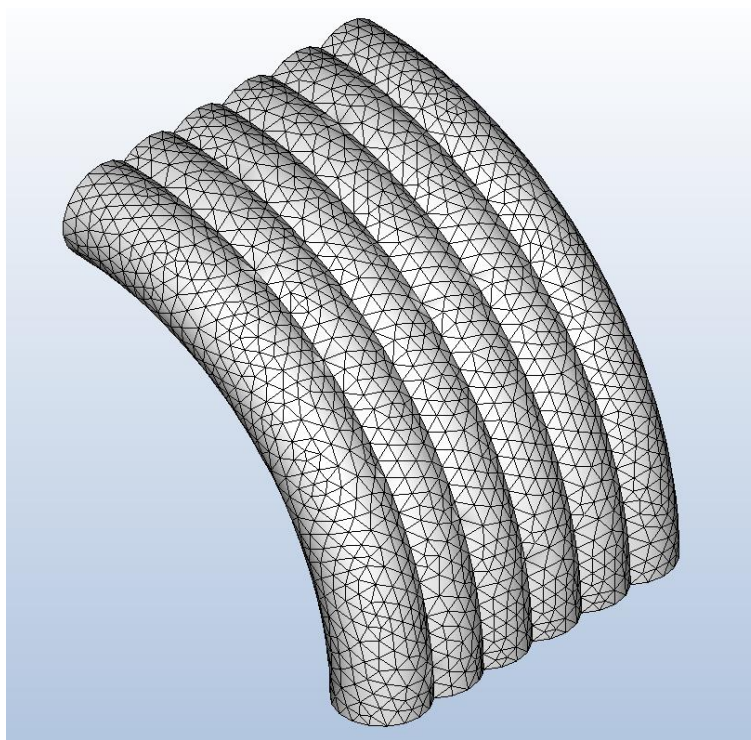


**Figura 3.13. Malla en la superficie: estructura abierta, dirección del flujo a  $90^\circ$ .**





**Figura 3.14. Malla en la superficie: estructura cerrada, dirección del flujo a  $0^\circ$ .**



**Figura 3.15. Malla en la superficie: estructura abierta, dirección del flujo a  $0^\circ$ .**



### 3.2.4 Modelo de turbulencia

En el modelado del flujo sobre la estructura inflable se utilizó el modelo  $k - \varepsilon$  estándar para generar la turbulencia. En la Tabla 3.2 se presenta un breve resumen de los modelos utilizados.

**Tabla 3.2. Modelos utilizados para el análisis.**

Modelo de turbulencia	Usos recomendados	Notas
$k - \varepsilon$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Funciona en la mayoría de las aplicaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo de propósito general.</li> <li>Modelo por defecto.</li> </ul>

### 3.2.5 Propiedades del fluido

En esta etapa se asignaron las propiedades del fluido, el cual es aire que representará la acción del viento. Se asignaron las propiedades estándar para el aire (White, 2010). En la Tabla 3.3 se muestran las propiedades asignadas.

**Tabla 3.3 Propiedades asignadas al fluido.**

Propiedad	Valor
Fluido	Aire
Densidad	1.2 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	1.8 x 10 <sup>-5</sup> Pa-s
Presión Atmosférica	101.3 kPa

### 3.3 Proceso

En la etapa de proceso se eligieron los parámetros para la solución de las ecuaciones de transporte y criterios de convergencia a utilizar. Estos parámetros se resumen en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Parámetros utilizados para el análisis.**

Caso	Valor o descripción
<b>Proceso de solución</b>	Petrov-Galerkin.
<b>Criterio de convergencia</b>	750 iteraciones. Monitoreo de residuos en continuidad: $10^{-3}$ .

## CAPÍTULO IV.

### RESULTADOS COMPUTACIONALES

En este capítulo se presentan mapas de contorno de las distribuciones de presiones obtenidas de las simulaciones mediante CFD. Las distribuciones de presiones están expresadas en coeficientes de presión:

$$Cp = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

$p$  es la presión estática en el punto donde el coeficiente se está evaluando.

$p_{\infty}$  es la presión estática de referencia en el flujo libre.

$\rho_{\infty}$  es la densidad del fluido en el flujo libre.

$V_{\infty}$  es la velocidad en el flujo libre.

#### 4.1 Dirección del flujo a 0°, estructura cerrada

En la Figura 4.1 y la Figura 4.2 se presentan los mapas de contorno para la condición cerrada de la estructura inflable, con dirección del flujo a 0°. El coeficiente de presión de mayor magnitud se presentó cerca de la cresta de la primera sección tubular y es de succión, con magnitud  $Cp = -1.7$ . Las presiones de empuje con mayor magnitud se presentaron en la cara a barlovento de la estructura con magnitud cercana a  $Cp = 0.9$  y en la parte superior. En la cara a sotavento de la estructura se presentaron únicamente presiones negativas.

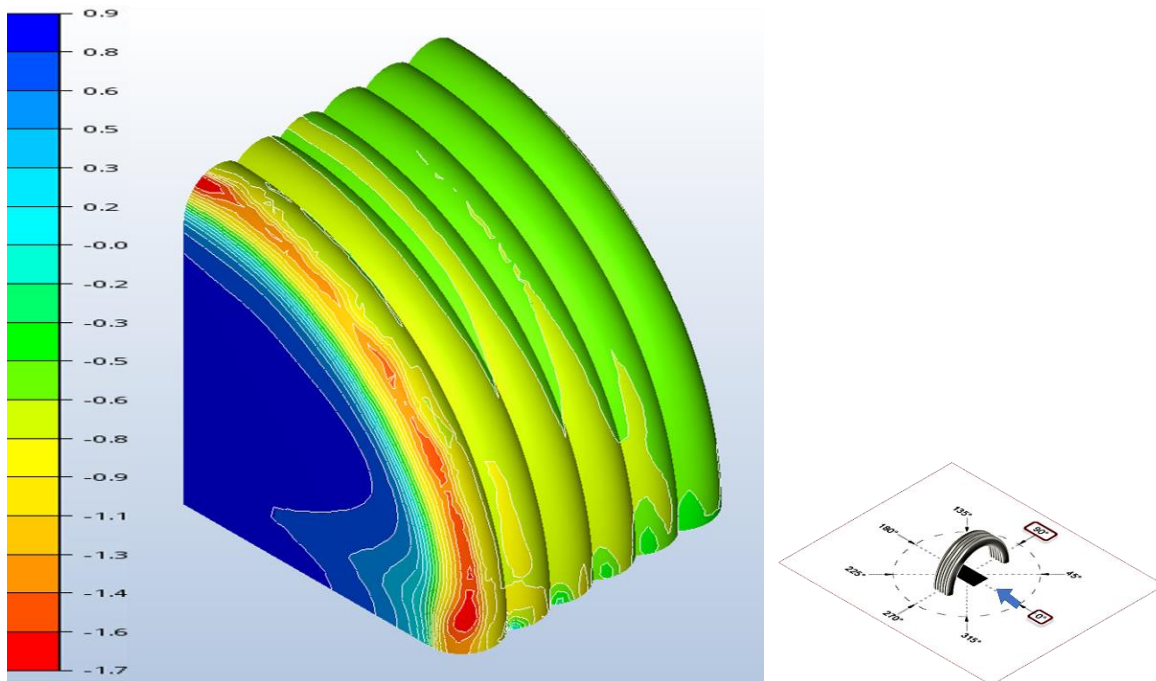


Figura 4.1 Estructura cerrada, dirección del flujo a 0°, vista frontal.

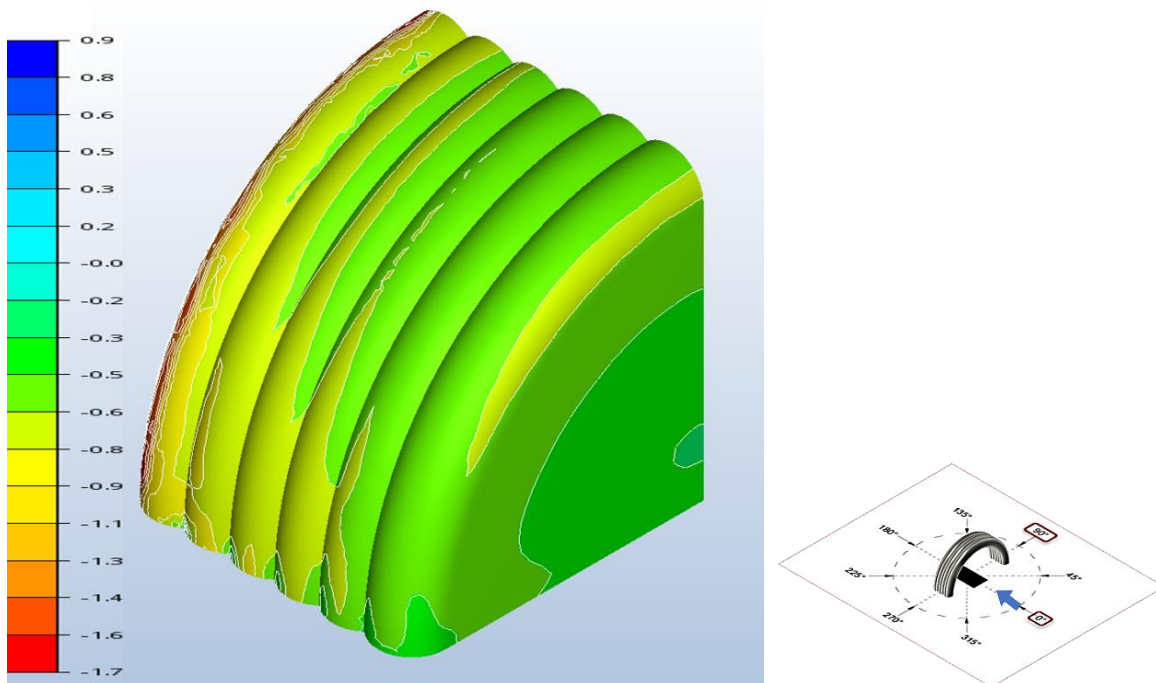
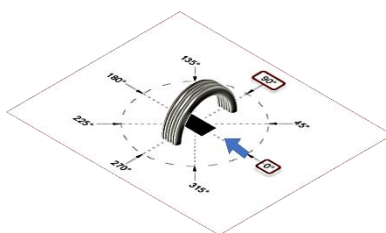
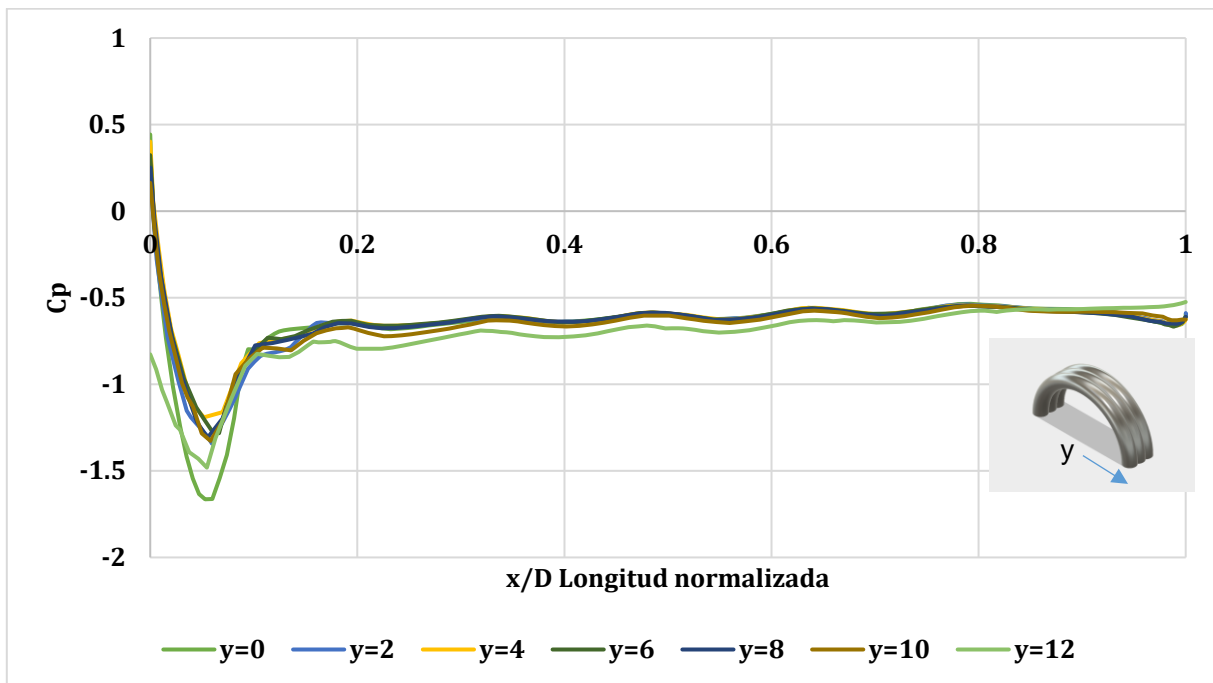


Figura 4.2. Estructura cerrada, dirección del flujo a 0°, vista trasera.

En la Figura 4.3 se presentan las variaciones de las presiones en cortes longitudinales tomados con respecto al eje  $y$  que se considera transversal a la estructura. En esta gráfica se puede observar que existe poca variación en los cortes longitudinales de la estructura y que la variación de las presiones negativas es de mayor magnitud en las primeras secciones tubulares en el área a barlovento.



**Figura 4.3. Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura cerrada con dirección del flujo a  $0^\circ$ .**

## 4.2 Dirección del flujo a 0°, estructura abierta

En las Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6 se presentan los mapas de contorno de la distribución de coeficientes de presión de la configuración abierta de la estructura con dirección del flujo a 0°. Las succiones de mayor magnitud se encontraron en la cresta de la primer sección tubular y la mayor tiene magnitud  $C_p = -1.7$ . En la cara a barlovento se encontraron presiones positivas, siendo la mayor cercana a  $C_p = 1.0$ . En la parte superior de la estructura y la cara a sotavento se generaron succiones. En la parte interior de la estructura se encontraron unicamente succiones y aproximadamente presentaban simetria con las presiones de la parte superior de las secciones tubulares..

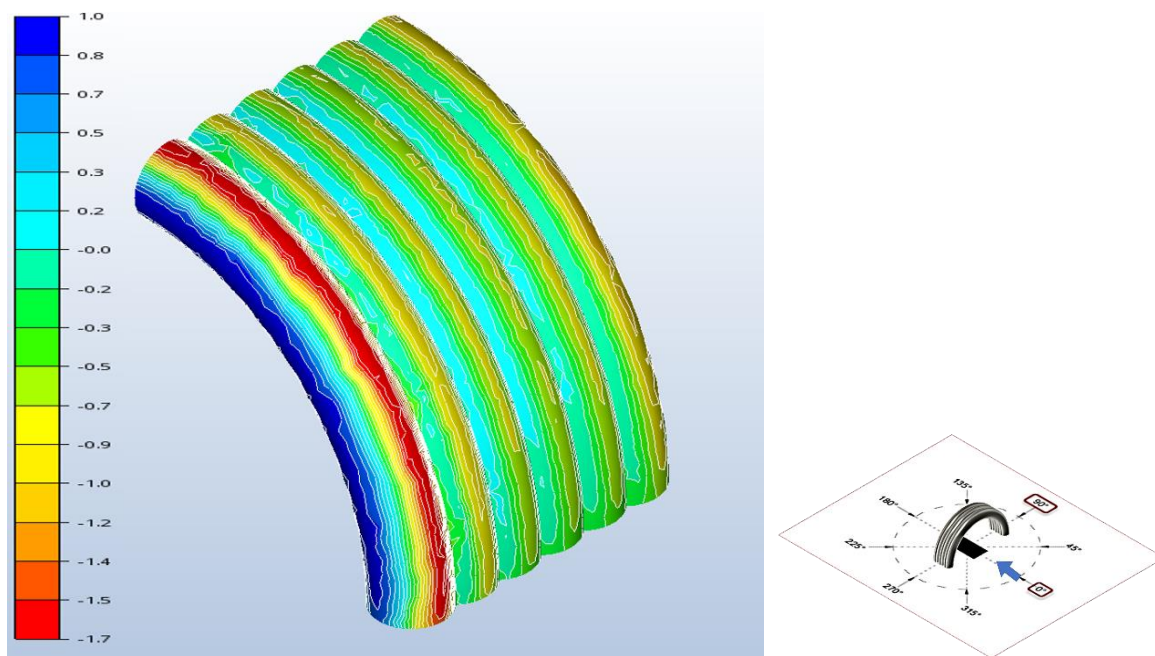


Figura 4.4. Estructura abierta, dirección del flujo a 0°, vista frontal.

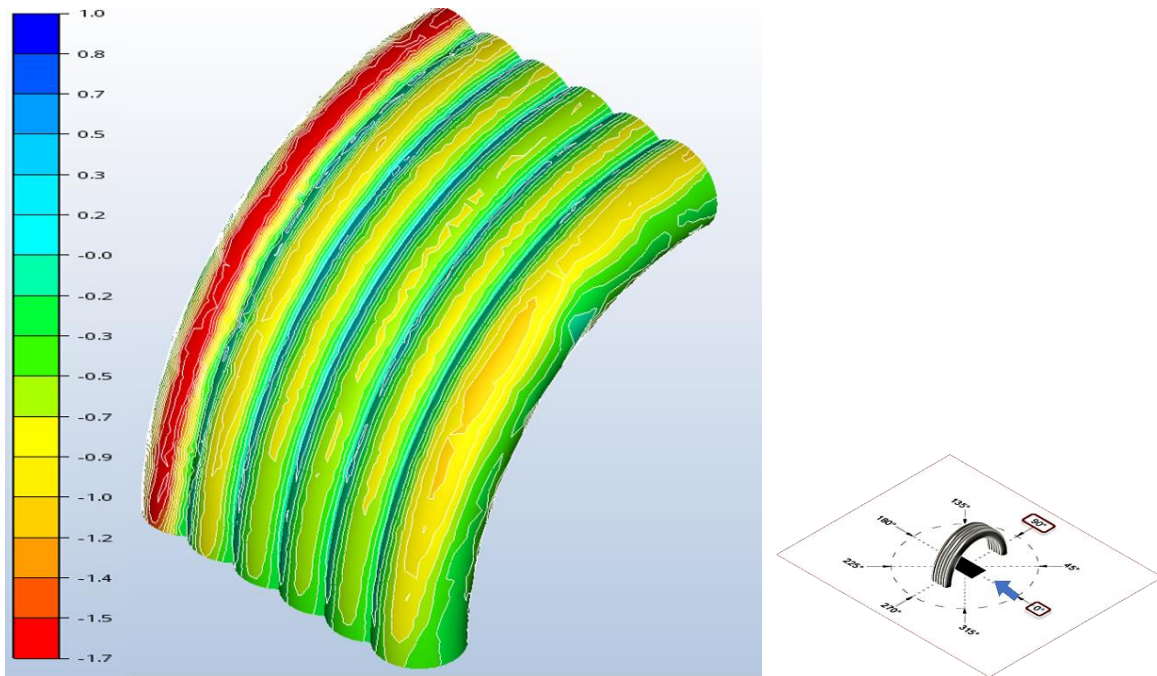


Figura 4.5. Estructura abierta, dirección del flujo a 0°, vista trasera.

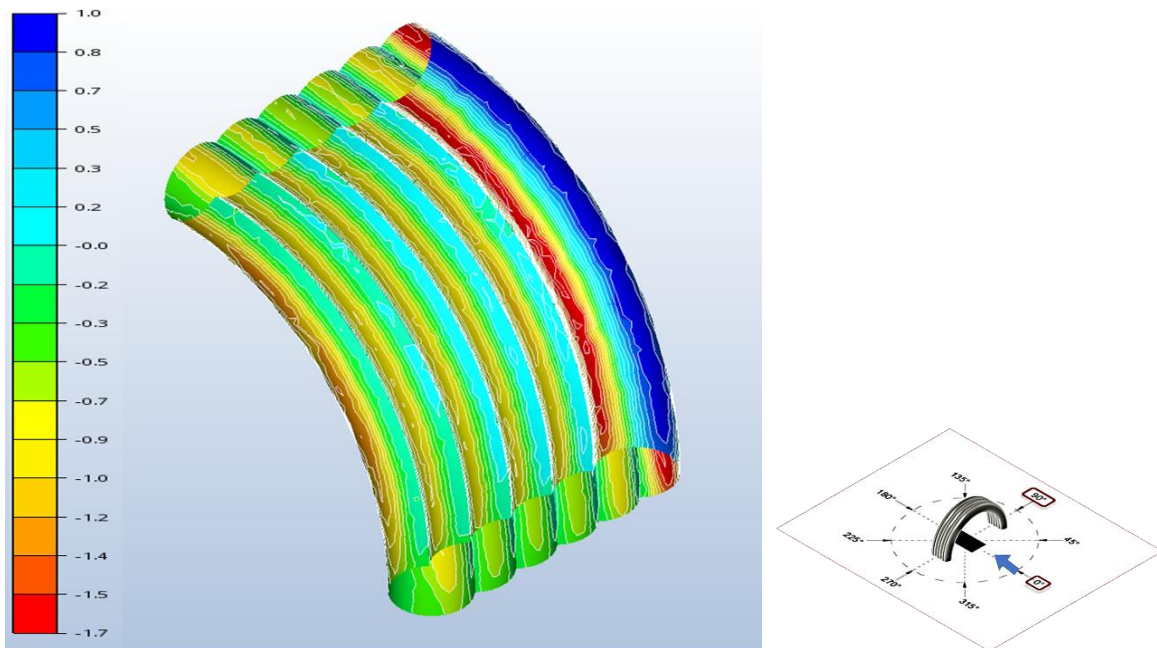
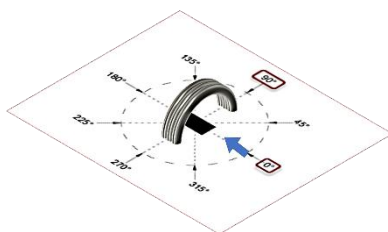
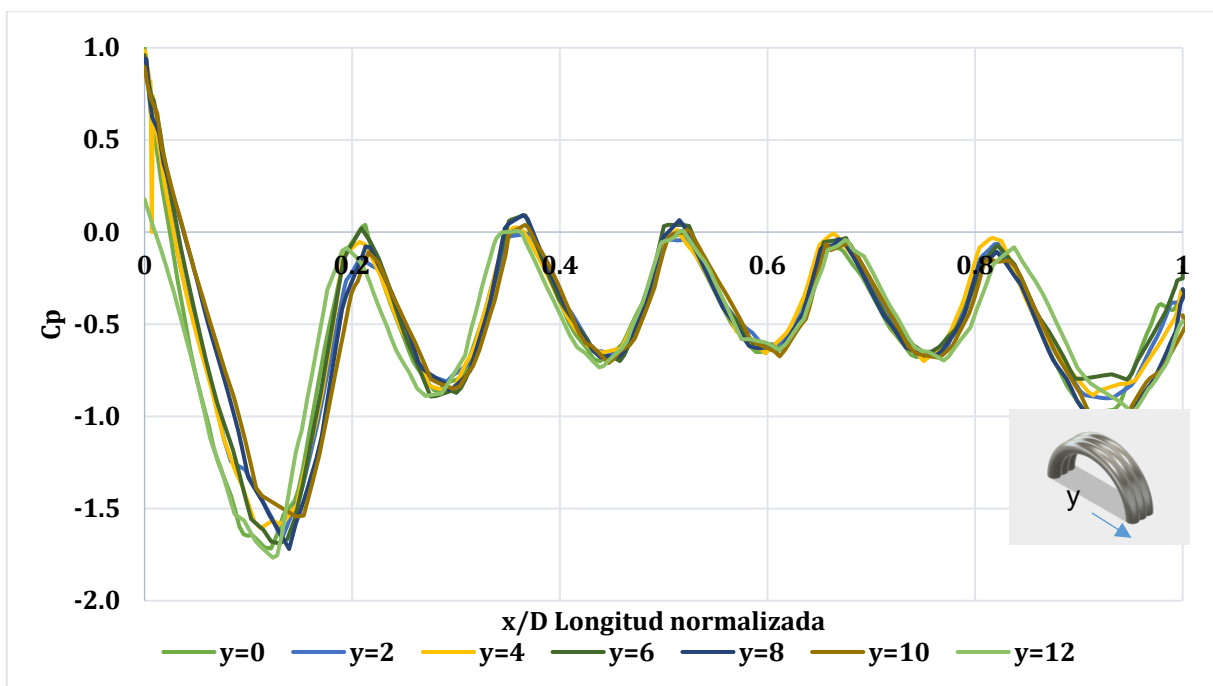


Figura 4.6. Estructura abierta, dirección del flujo a 0°, vista interior.

En la Figura 4.7 se presentan las variaciones de las presiones en cortes longitudinales tomados con respecto al eje  $y$  que se considera transversal a la estructura. En esta gráfica se puede observar que existe poca variación entre los cortes longitudinales, lo cual es esperado ya que las geometrías tubulares son simétricas en ambas direcciones para la condición abierta.



**Figura 4.7 Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura abierta con dirección del flujo a  $0^\circ$**



### 4.3 Dirección del flujo a 90°, estructura cerrada

En la Figura 4.8 y la Figura 4.9 se presentan los mapas de contorno para la condición cerrada de la estructura inflable, con dirección del flujo a 90°. Las presiones de succión con mayor magnitud se presentan cerca de la unión de la geometría curva del último tubo de la estructura (a sotavento) con la geometría plana que cierra la estructura, la magnitud es  $C_p = -2.2$ . Las presiones de empuje con mayor magnitud se presentaron en la cara a barlovento de la estructura con magnitud cercana a la unidad ( $C_p = 1.0$ ). En la cresta de la estructura, en la tapa de la estructura y en la zona a sotavento se presentan succiones, de las cuales las magnitudes varían de  $C_p = -1.3$  a  $C_p = -0.1$ .

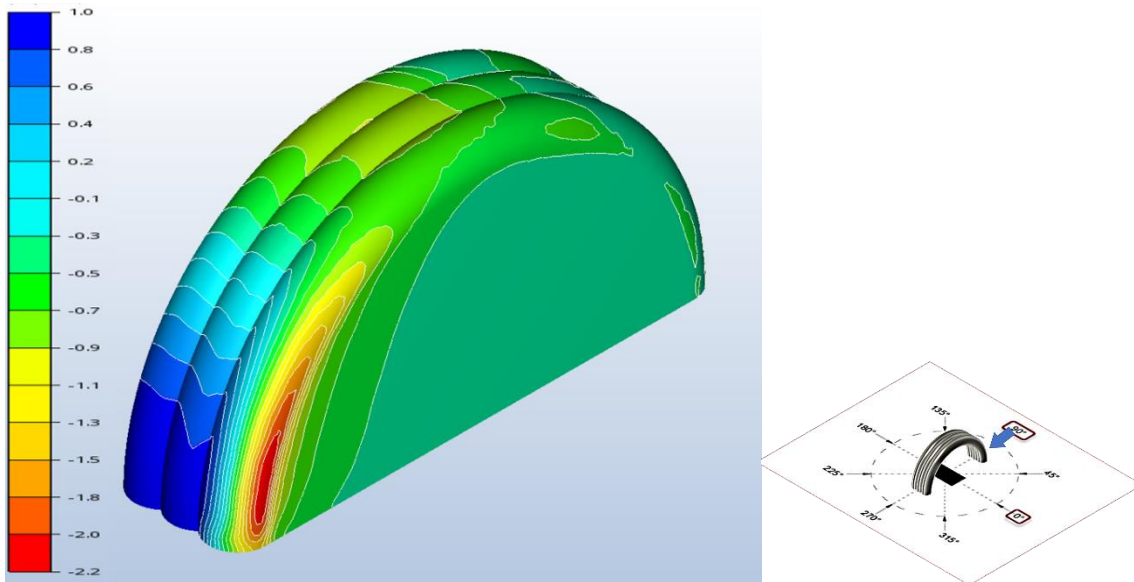
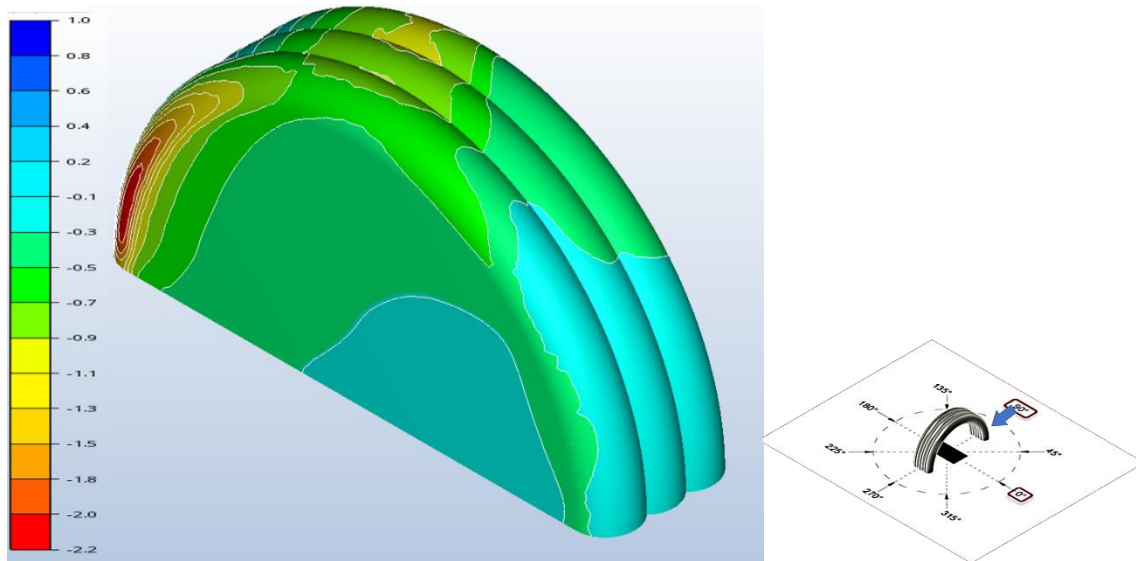
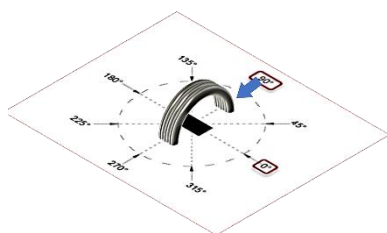
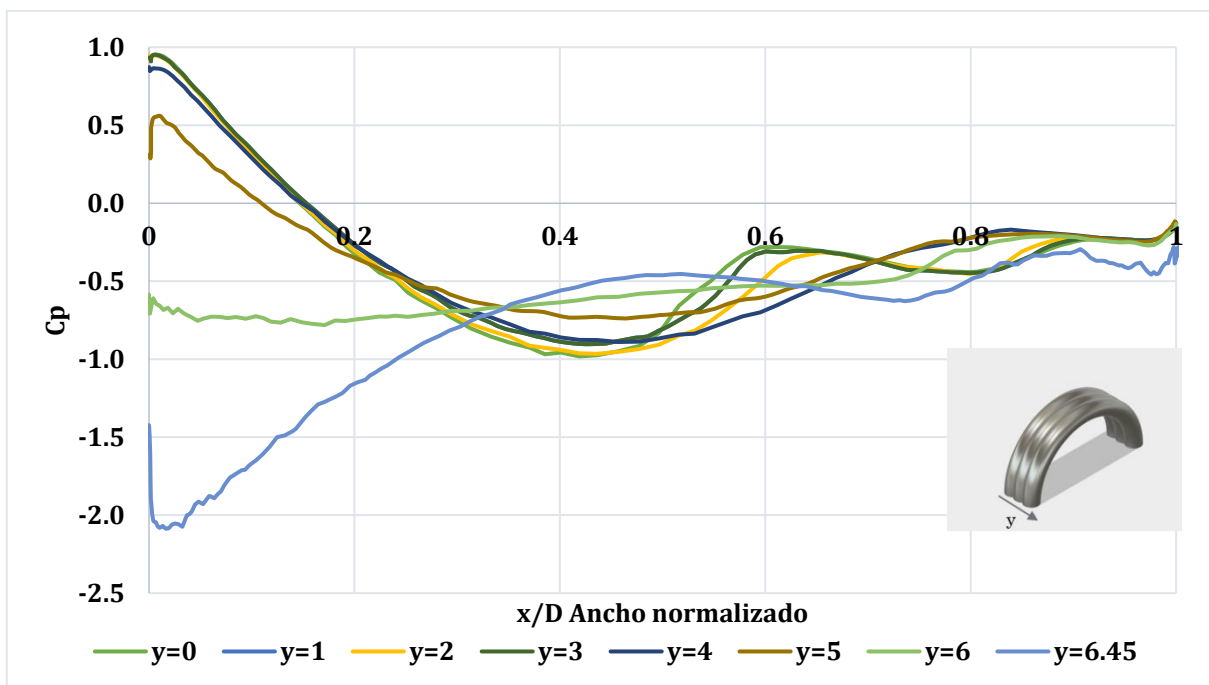


Figura 4.8. Estructura cerrada dirección del flujo a 90°, vista frontal.



**Figura 4.9. Estructura cerrada dirección del flujo a 90°, vista trasera.**

En la Figura 4.10 se presentan a manera de gráfica las variaciones de las presiones en cortes longitudinales tomados con respecto al eje  $y$  que se consideran transversales a la estructura. En esta gráfica se puede observar que existe poca variación en las tres secciones tubulares y en sus uniones. También se observa que los coeficientes con mayor magnitud negativa se encuentran en los cortes  $y = 6$  e  $y = 6.45$ , que están localizados en la sección tubular más próxima a la tapa de la estructura, donde existe un cambio de geometría curva a geometría plana.



**Figura 4.10. Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura cerrada con dirección del flujo a  $90^\circ$ .**

#### 4.4 Dirección del flujo a 90°, estructura abierta

En las Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13 se presentan los mapas de contorno de la distribución de coeficientes de presión de la configuración abierta de la estructura con dirección del flujo a 90°. Las succiones de mayor magnitud se encontraron en la parte lateral de la última sección tubular y la mayor tiene magnitud  $C_p = -1.2$ . En la cara a barlovento se encuentran presiones positivas, siendo la mayor cercana a  $C_p = 0.9$ . En la parte superior de la estructura y la cara a sotavento se generaron succiones. En la parte interior de la estructura se encontraron únicamente succiones de magnitudes que van de  $-0.6$  a  $-0.7$ .

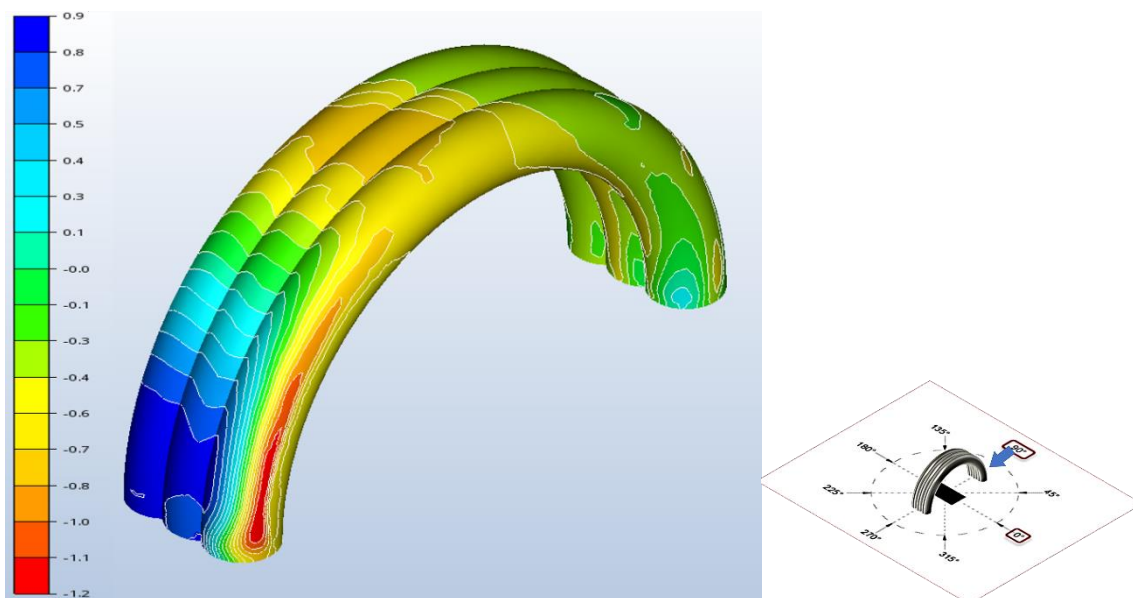


Figura 4.11. Estructura abierta, dirección del flujo a 90°, vista frontal

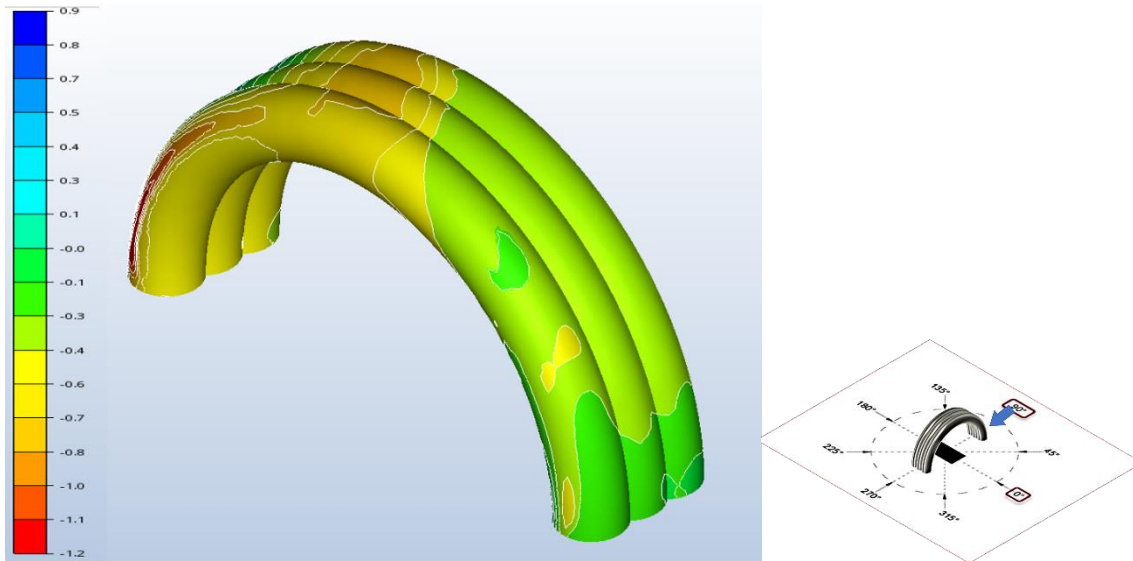


Figura 4.12. Estructura abierta, dirección del flujo a 90°, vista trasera.

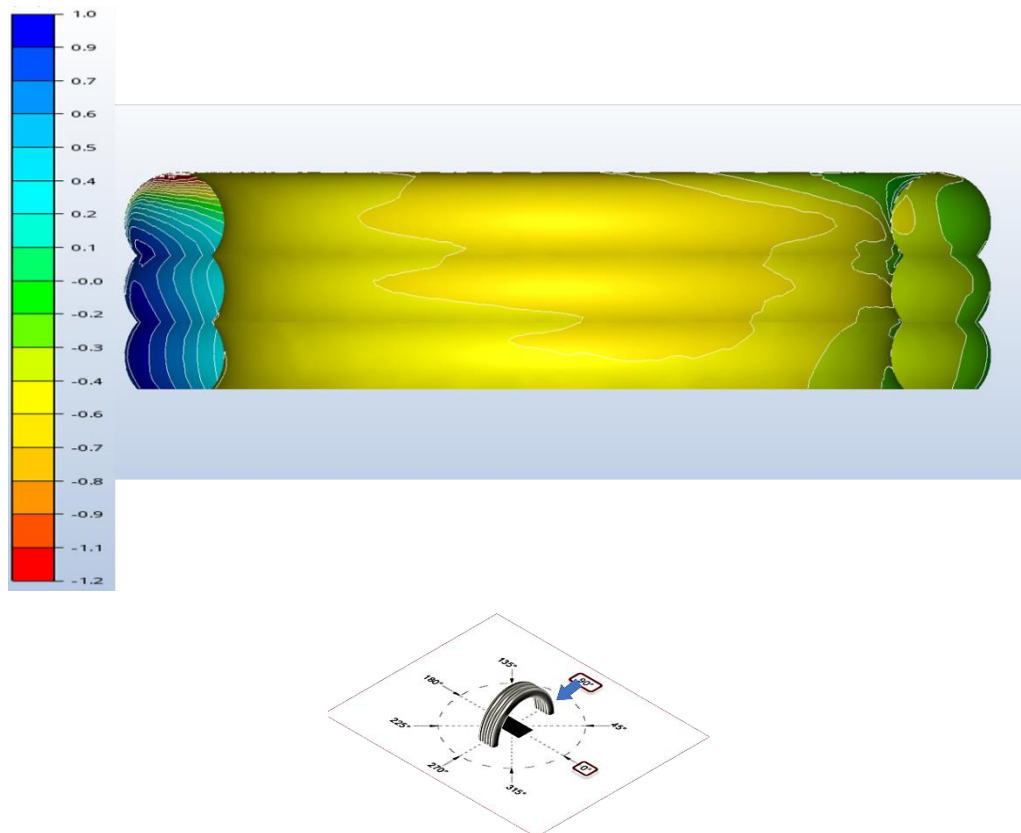
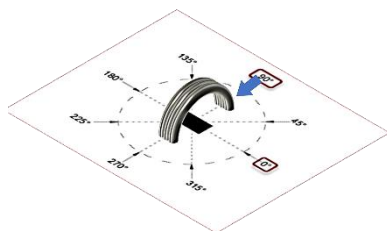
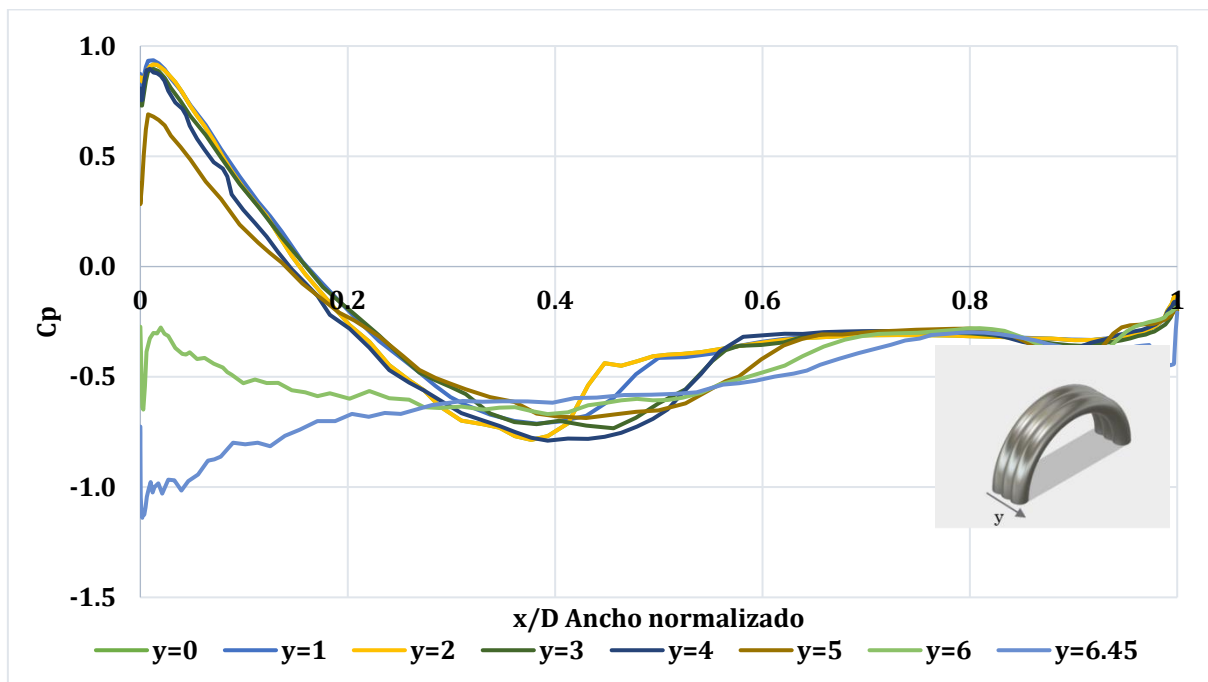


Figura 4.13 Estructura abierta, dirección del flujo a 90°, vista interior.

En la Figura 4.14 se presentan mediante una gráfica las variaciones de las presiones en cortes longitudinales tomados con respecto al eje  $y$  que se consideran transversales a la estructura. En esta gráfica se puede observar que existe poca variación en las tres secciones tubulares y en sus uniones. También se observa que los coeficientes con mayor magnitud negativa se encuentran en los cortes  $y = 6$  e  $y = 6.45$ , que están localizados en la sección tubular más próxima de la estructura (a barlovento).



**Figura 4.14. Variación de coeficientes de presión en cortes longitudinales, estructura abierta con dirección del flujo a 90°**

## CAPÍTULO V.

### VALIDACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos con la modelación mediante CFD con resultados de pruebas experimentales en túnel de viento realizados por Pool (2017), los resultados se compararon con los resultados de la línea central de las secciones tubulares en la que la autora instrumentó en todos los casos.

#### 5.1 Dirección del flujo a $0^\circ$ , estructura cerrada

Para la condición cerrada y dirección del flujo a  $0^\circ$  se obtuvo la relación que se muestra en la Figura 5.1. Se observa que en el primer y últimos tres puntos instrumentados existe una buena relación entre los resultados experimentales y numéricos. La diferencia promedio fue 34% y la desviación estándar 31%. La diferencia más significativa ocurre en los puntos inmediatos posteriores a las presiones de succión de mayor magnitud tanto en el modelo computacional, como en el modelo del túnel de viento.

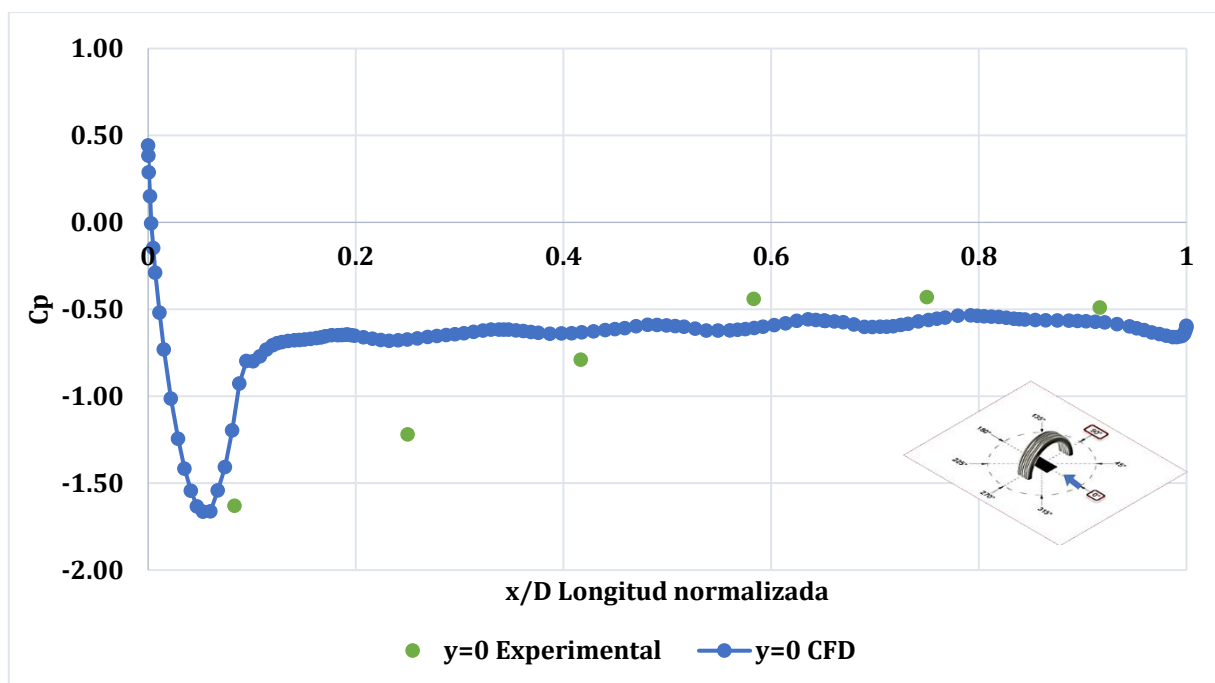


Figura 5.1. Comparación con datos experimentales, condición cerrada y dirección del flujo a  $0^\circ$ .

## 5.2 Dirección del flujo a $0^\circ$ , estructura abierta

Para el caso de dirección de flujo a  $0^\circ$  y condición abierta de la estructura se obtuvo la relación mostrada en la Figura 5.2, en la cual se observa una buena relación en tres de los puntos instrumentados los cuales coinciden con las crestas de las secciones tubulares instrumentadas. Se obtuvo una diferencia media del 32% y una desviación estándar del 36%.

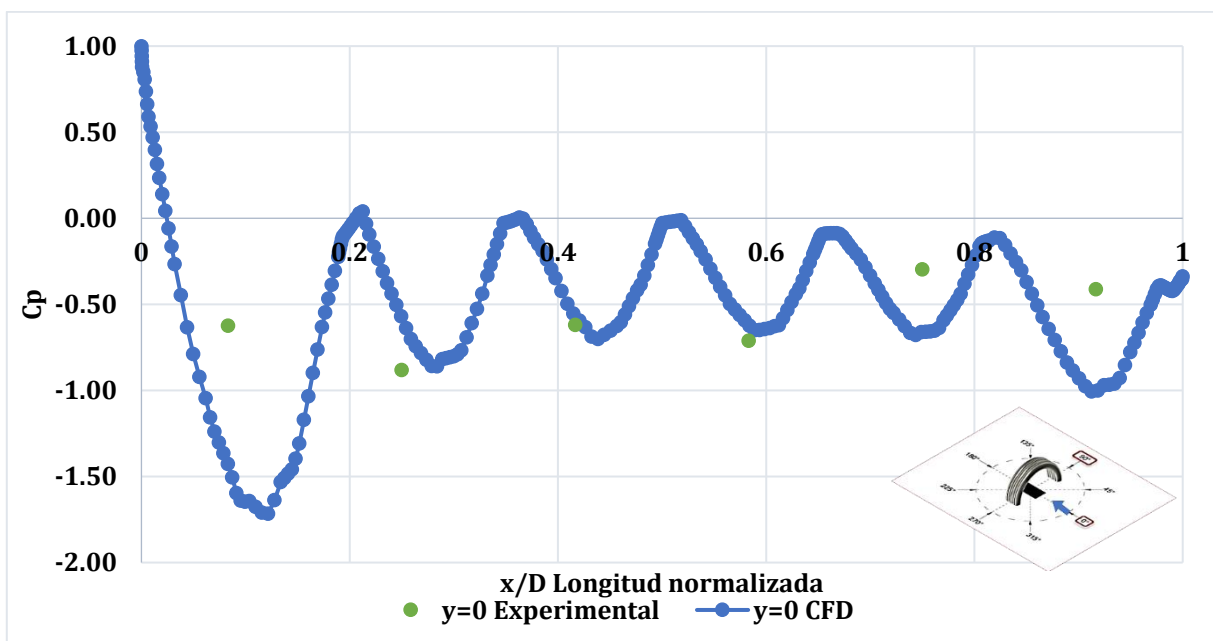


Figura 5.2. Comparación con datos experimentales, condición abierta y dirección del flujo a  $0^\circ$ .



### 5.3 Dirección de Flujo a 90°, estructura cerrada

Para la dirección de 90° y condición cerrada se obtuvo una buena relación entre los resultados numéricos y los experimentales la cual se muestra en la Figura 5.3, tendiendo una distribución similar de presiones positivas y negativas. La diferencia media entre los valores fue 15%, mientras que la desviación estándar 12%.

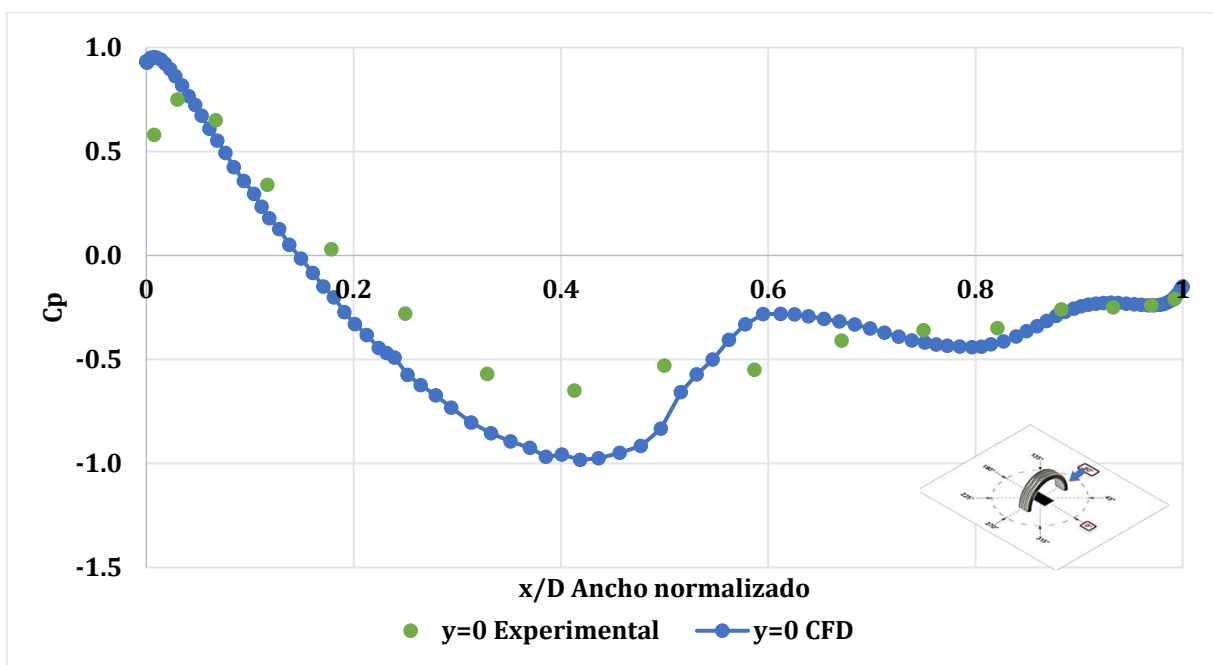


Figura 5.3. Comparación con datos experimentales, condición cerrada y dirección del flujo a 90°.

#### 5.4 Dirección del Flujo a 90°, estructura abierta

Para la condición abierta y dirección del flujo a 90° se obtuvo la relación mostrada en la Figura 5.4, la cual fue buena en la mayoría de los puntos a excepción de dos en la parte a succión que corresponden a la parte superior de la estructura. La diferencia media fue 12% con una desviación estándar de 11%.

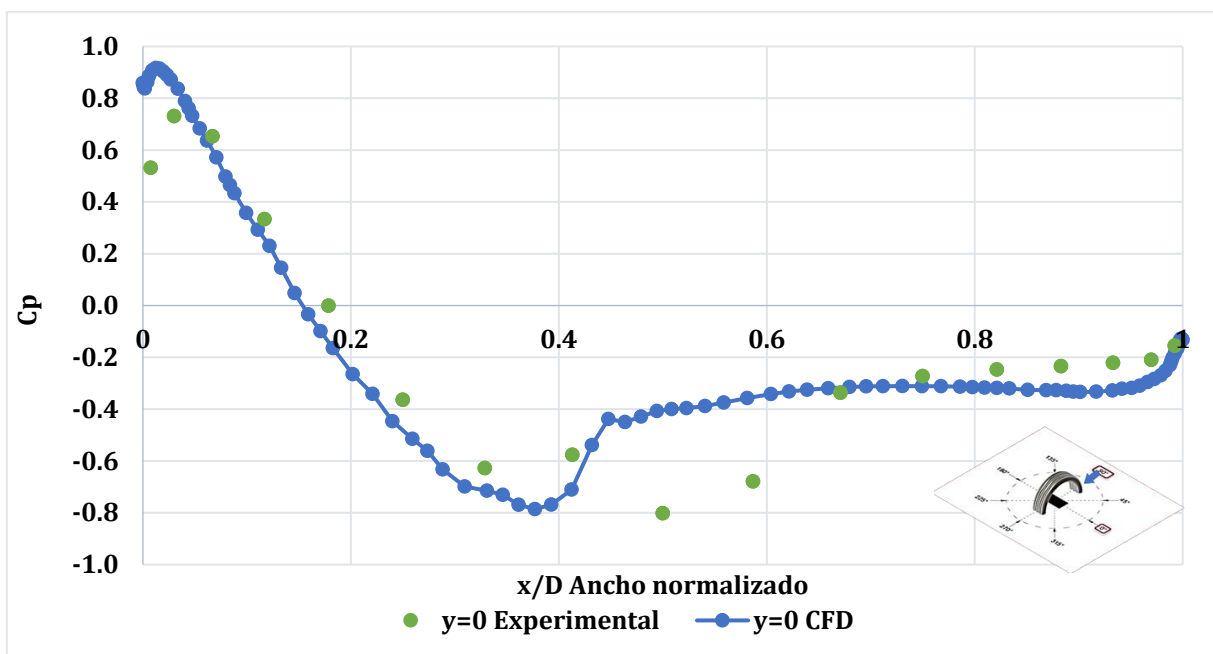


Figura 5.4. Comparación con datos experimentales, condición abierta y dirección del flujo a 90°.

## CAPÍTULO VI.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se estudiaron las distribuciones de presión provocadas por la acción del viento de una estructura inflable tipo hangar bajo diversos escenarios mediante la modelación CFD, utilizando como parámetros principales de modelación un análisis estacionario y el modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$ . Los escenarios estudiados fueron las configuraciones abierta y cerrada de la estructura y direcciones del flujo a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Con base en los resultados numéricos de la modelación y la comparación con los resultados experimentales realizados por otro autor en el túnel de viento se presentan las siguientes conclusiones:

#### 6.1 Conclusiones

1. En el caso de estructuras fuseladas como es el caso de la estructura estudiada, la estabilidad de los coeficientes de presión es dependiente del régimen del flujo. En el caso de la estructura representada, la turbulencia del flujo era la correspondiente a la generada por la misma estructura ya que se aplicó un flujo laminar a la entrada del dominio.
2. Para la configuración abierta de la estructura, la dirección de flujo a  $0^\circ$  presentó los coeficientes de presión de mayor magnitud, tanto en succión con valor  $C_p = -1.7$  como en empuje con valor  $C_p = 1.0$  comparados con los de la dirección de  $90^\circ$  cuyos valores fueron de  $C_p = 0.9$  y  $C_p = -1.2$ , respectivamente. La causa principal por la que los coeficientes sean de mayor magnitud en la dirección de flujo a  $0^\circ$  es debido al que el fluido circula por arriba y por debajo de las secciones tubulares en la configuración abierta, lo que no sucede en la dirección de  $90^\circ$  ya que casi todo el fluido circula sobre la superficie externa de la estructura.
3. Para la configuración cerrada de la estructura, los coeficientes de presión de mayor magnitud se observaron en la dirección de flujo a  $90^\circ$ , siendo para succión la magnitud  $C_p = -2.2$ , y para empuje  $C_p = 1.0$ . comparados con los de la dirección de  $0^\circ$  cuyos valores fueron de  $C_p = 0.9$  y  $C_p = -1.7$ , respectivamente. La

diferencia en magnitudes se debe a que en la dirección de flujo a  $90^\circ$  la geometría cambia de curva a plana en los extremos laterales de la estructura (junto a las tapas longitudinales a la dirección del viento), siendo más favorable este tipo de cambio de geometría para la generación de turbulencia debido al repentino desprendimiento del fluido.

4. Existe coherencia entre el tipo de distribución de los coeficientes de presión obtenidos mediante CFD y los datos experimentales para los casos abierto y cerrado con dirección del flujo a  $90^\circ$ , existiendo una diferencia media de 12% y 15% y una desviación estándar no mayor a 12%. Esta diferencia es aceptable para los parámetros utilizados en la modelación y las diferencias entre los modelos computacionales y el modelo instrumentado en el túnel de viento.
5. El modelo computacional falla en predecir los valores para las direcciones de flujo a  $0^\circ$  tanto en la configuración abierta como en la configuración cerrada en donde se presenta una diferencia media de hasta 34%. Esta diferencia se puede explicar debido a los parámetros utilizados en la modelación (modelo de turbulencia de dos ecuaciones y análisis estacionario), y debido a que estas diferencias se encuentran en los extremos de la estructura, los cuales son los lugares en los que se da el mayor desprendimiento del flujo (al inicio y final de la estructura en la dirección principal del viento) los que generan estos altos valores de diferencias.
6. Los parámetros utilizados en el trabajo predicen de manera satisfactoria las distribuciones de presiones que se pueden presentar en la estructura real bajo las acciones de viento en direcciones de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  en configuraciones abiertas y cerradas de la estructura estudiada. Sin embargo, los modelos utilizados fallan en reproducir los valores obtenidos en el túnel de viento en la dirección de flujo a  $0^\circ$  debido a que es la configuración donde existe un comportamiento más complejo en la separación del flujo y generación de turbulencia.

## 6.2 Recomendaciones

Para estudios de carácter computacional subsecuentes se recomienda estudiar el efecto de la distribución de velocidades debida a la capa límite atmosférica y que efectos tiene en la distribución de presiones sobre la superficie de la estructura.

Así mismo, debido a la geometría fuselada de la estructura estudiada, se recomienda estudiar la aplicabilidad de otros modelos de turbulencia recomendados en la literatura y un análisis de tipo transitorio para la obtención de la distribución de presiones. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que hacer modelados con estos parámetros consumen recursos computacionales mas allá de los disponibles equipos de computo convencionales.

## CAPÍTULO VII.

### REFERENCIAS

Amaya Gallardo, E., 2015. *Estudio de los efectos del viento en naves industriales con cubierta de dos aguas con mecanica de fluidos computacional*. Ciudad de Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.

Anderson, J. D., 1995. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. s.l.:McGraw Hill.

Basset Salom, L., 2013. *Estructura neumáticas*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.

Blocken, B., 2009. *CFD in Building Engineering*. Netherlands: Eidhoven University of Technology.

Blocken, B., 2014. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volumen 129, pp. 69-102.

Casey, M. & Wintergrete, T., 2000. *Best Practice Guidelines, ERCOFTA Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD*, Bruselas: ERCOFTAC.

Castro, I. & Graham, M., 1999. Numerical wind engineering: the way ahead?. *Structures and Buildings*, Volumen 134, pp. 275-277.

Chi, J. & de Olivera Pauletti, R., 2005. *An outline of the evolution of pneumatic structures*. Caracas, s.n.

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. & Carissimo, B., 2011. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the urban environment: a summary. *International Journal of Environmental Pollution*, 44(4), pp. 419-427.

Hunte, S., 2010. *Testing the application of CFD for building design*. Delft: Delft University of Technology.

Kröplin, B., 2005. Inflated Membrane Structures on the Ground, in the Air and in Space - A Classification. En: *Textile Composites and Inflatable Structures*. Dordrecht: Springer, pp. 213-220.

Marcipar, J., Oñate, E. & Miquel, J., 2005. Experiences in the design and construction of low pressure inflatable structures. En: *Textile composites and inflatable structures*. s.l.:Springer, pp. 241-257.

Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J. M. & Pindado, S., 2001. *Aerodinamica Civil: Cargas de viento en las edificaciones*. Madrid: McGraw Hill.

Nalta, R., 2004. *Computational Wind Engineering. Background, Approach and Validation*. s.l.:s.n.

Paterson, D. & Holmes, J., 1993. Mean wind pressures on arched-roof buildings by computation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volumen 50, pp. 235-243.

Pool, S., 2017. *Coeficientes de presión en un hangar inflable por acciones de viento*. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.

Stathopoulos, T., 2002. The numerical wind tunnel for industrial aerodynamics: real or virtual in the new millenium?. *Wind Structures*, Volumen 5, pp. 193-208.

Tamura, T., Nozawa, K. & Kondo, K., 2008. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. *Journal of Wind Engineering*, Volumen 96, pp. 1974-1984.

Versteeg, H. K. & Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Essex: Pearson Education.

White, F., 2010. *Fluid Mechanics*. 7ma ed. New York: McGraw Hill.